

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.009

高频谐波对阻容式直流分压器绝缘性能影响研究

张宏伟

(国网甘肃省电力公司金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:直流换流站阻容式直流分压器由高精密、低温漂电阻进行分压,高频谐波会引起分压器内部电容器发热,绝缘油温度升高,电容元件中的聚丙烯薄膜在高温绝缘油中发生溶蚀,降低电容元件绝缘材料的沿面绝缘强度,造成电容元件击穿。文章分析了某柔性直流电网工程高频谐波造成阻容式直流分压器本体故障的故障现象和发展过程,通过对分压器解体、谐波监测和分解及仿真模拟分析了故障机理,研究了高频谐波对分压器内部电容元件边缘沿面闪络和电容元件绝缘性能的影响,验证了阻容式分压器绝缘性能的影响因素,并从结构工艺、设计选型、阻容性能等方面提出针对性改进措施,为提升阻容式分压器本质安全水平提供理论支撑和技术参考。

关键词:柔性直流工程;直流分压器;阻容式;高频谐波;击穿强度

Study on the Influence of High Frequency Harmonics on Insulation Performance of Resistive-capacitive DC Divider

ZHANG Hongwei

(Jinchang Electric Power Company, State Grid Gansu Electric Power Company,
Gansu Jinchang 737100, China)

Abstract: The high-precision, low-temperature coefficient resistors in resistive capacitive DC voltage divider for DC converter station are used for voltage division. High frequency harmonics can cause heat of the internal capacitors of the voltage divider, rise of insulation oil temperature, and dissolution of polypropylene film in the capacitor element in the high temperature insulation oil, reducing the surface insulation strength of the insulation material of capacitor element and causing breakdown of capacitor element. In this paper the fault phenomenon and heat development process of the resistive capacitive DC voltage divider due to high-frequency harmonics in a VSC-HVDC power grid project is analyzed. The fault mechanism is analyzed through the disassembly, harmonic monitoring, decomposition and simulation of the voltage divider. The influence of high-frequency harmonics on the edge flashover and insulation performance of the capacitive elements inside the voltage divider is studied, and the influencing factors of the insulation performance of the resistive capacitive voltage divider are verified. The specific improvement measures are proposed from the aspects of structural process, design selection, and resistive capacitive performance, providing the theoretical support and technical reference for improving the intrinsic safety level of the resistive capacitive voltage divider.

Keywords: VSC - HVDC engineering; DC voltage divider; resistive capacitive type; high frequency harmonics; breakdown strength

0 引言

某可再生能源柔性直流电网试验示范工程于2020年6月建成投运,输电线路全长666 km,总换流容量900万kW,向国家中心城市年输送绿色清洁

电能141亿kW·h,约占其年用电量的10%。该工程是全球首个输送大规模风能、太阳能、抽水蓄能等多种形态能源的四端环形柔性直流电网,也是世界首个电压等级最高、输送距离最长的风、光、储、输四位一体柔性直流工程,破解了新能源大规模开发利用

收稿日期:2025-07-03

和消纳的世界级难题^[1-7],通过多点汇集、多能互补、时空互补、源网荷协同,将西部风光发电基地和北部储能基地与中心城市负荷相连,让随机波动的风电、光伏等清洁能源转化成稳定可靠的电能^[8-14],源源不断的送往经济规模较大的经济圈,实现了新能源侧自由波动发电和负荷侧可控稳定供电。该柔直电网连接起百余家风电场和千余座光伏电站,为某省北部地区构建了高比例大规模新能源安全智能外送路径,显著提升北部地区新能源外送能力,为国家中心城市“以电代煤”、国家高速铁路主通道牵引站及国际体育盛会等重大工程和活动提供清洁、可靠的能源保障。该工程建有4座 ± 500 kV换流站,其中ZD站和KB站为送端站,主要接入北部地区国家级风光储输示范基地,ZD站换流容量为300万kW,KB站换流容量为150万kW;FK站为调节站,主要接入北部地区抽水储能电站6台机组,换流容量为150万kW;YQ站为受端站,主要连接负荷中心,换流容量为300万kW。工程示意图如图1所示。

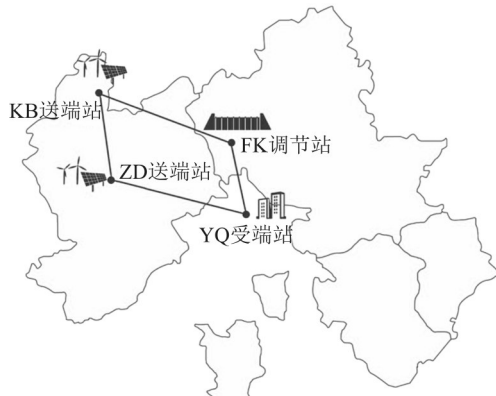


图1 ± 500 kV 四端柔直电网示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ± 500 kV four terminal VSC-HVDC power grid

该工程自2020年6月投运以来,发生3次阻容式中性线直流分压器本体故障。文章通过对阻容式直流分压器解体、谐波监测和分解及仿真模拟分析了故障机理,研究了高频谐波对分压器内部电容元件边缘沿面闪络和电容元件绝缘性能的影响,验证了阻容式分压器绝缘性能的影响因素,并从结构工艺、设计选型、阻容性能等方面提出针对性改进措施,为提升阻容式直流分压器本质安全水平提供理论支撑和技术参考。

1 故障概况

1.1 故障设备概况

该柔直电网采用阻容式直流分压器,由高精度、低温漂电阻进行分压,在电阻两端并联电容以确保其频率特性^[15-17]。分压器一次本体由复合空心

绝缘子将高压和低压臂包裹起来,用 SF_6 气体绝缘。低压臂安装限压元件,以避免元器件被测量系统过电压损坏^[18]。原理如图2所示。

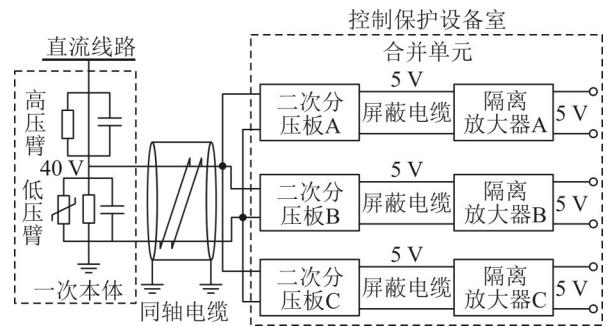


图2 阻容式直流分压器原理图
Fig. 2 Principle diagram of resistive-capacitive DC voltage divider

直流分压器一次本体结构如图3所示。分压器内部电容器的心子结构见图4。其中,分压器内部电容器的心子平均分为两段,如图4(a)所示。每段由74个电容元件串联而成,如图4(b)所示。每个电容元件包含两层铝箔极板、两层电容器膜-电容器纸-电容器膜组成的复合绝缘材料,如图4(c)所示。

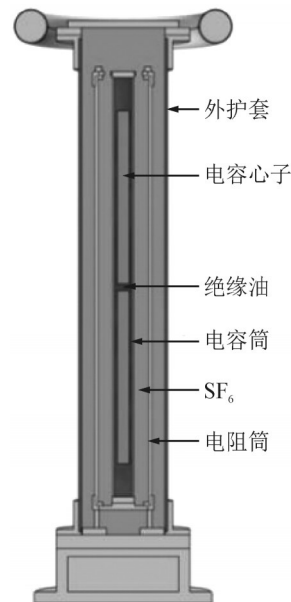


图3 直流分压器一次本体结构
Fig. 3 Primary structure of DC voltage divider

膜纸复合绝缘材料与铝箔极板卷绕多圈,组成一个电容心子,如图5(a)所示。多个电容元件串联的电容器等效结构如图5(b)所示,其中,虚线代表单个电容元件中的高压铝箔,实线代表单个电容元件中的低压铝箔,前一个电容的低压铝箔与后一个电容元件的高压铝箔采用压接方式连接,虚线和实线之间的空白部分为电容器膜-电容器纸-电容器膜组成的复合绝缘材料。

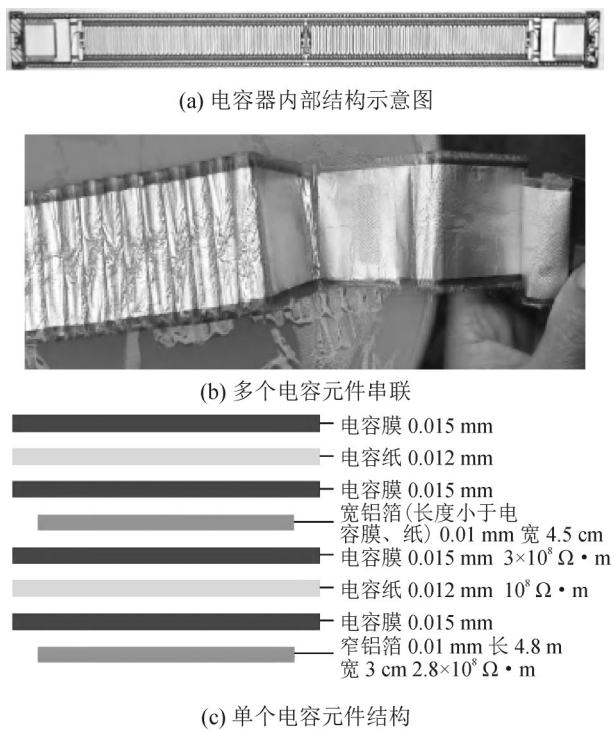


图4 电容心子结构
Fig. 4 Capacitor core structure

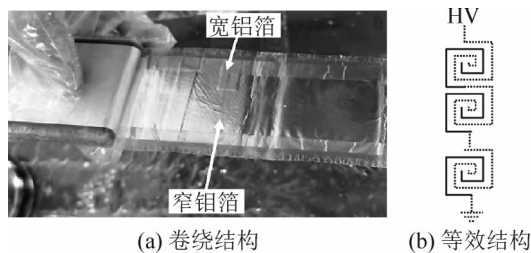


图5 电容心子等效结构
Fig. 5 Equivalent structure of capacitor core

为避免直流分压器故障影响柔直电网运行,4座换流站分压器由2个厂家交叉供货,ZD送端站和YQ受端站由NR厂家供货,KB送端站和FK调节站由XJ厂家供货。柔直工程换流站各设备参数如表1所示。

表1 柔直工程换流站各设备参数
Table 1 Parameters of each equipment of VSC-HVDC converter station

参数	数值
阀塔平均对地电容/pF	674
阀塔串联杂散电感/ μ H	19.8
交流套管对地电容/pF	157
极线套管对地电容/pF	150
极线分压器内部电容/pF	238
中性线分压器内部电容/pF	1 430

1.2 故障概况

1)第1次故障

2021年11月30日,FK调节站极Ⅱ(负极线)

中性线直流分压器故障,输出电压幅值迅速增大,随后又迅速减小,故障波形如图6所示。



图6 FK站分压器故障波形
Fig. 6 Fault waveform of voltage divider of FK station

现场临时用备品对故障直流分压器进行了替换。为避免再次发生故障,将FK站和同一厂家供货的KB送端站4台在运中性线直流分压器更换为改进型分压器。改进型分压器的电容值由1 700 pF降低至700 pF,4台改进型分压器运行至今暂未发生故障。

2)第2次故障

2023年7月1日,YQ受端站年检期间发现极Ⅰ(正极性)中性线直流分压器故障,现场采用站内备用直流分压器对故障分压器进行了替换。查看历史录波图,发现该分压器在2023年4月24日已发生故障。故障波形如图7所示,其中,波形1为极Ⅰ故障测点的电压曲线,波形2为极Ⅱ正常测点的电压曲线,故障测点的电压波形有迅速增大和振荡过程,随后降低至0附近。

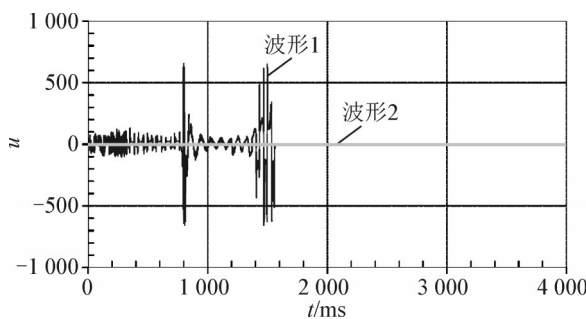


图7 YQ站分压器第1次故障波形
Fig. 7 The 1st fault waveforms of voltage divider of YQ station

3)第3次故障

2023年7月20日,YQ受端站极Ⅰ中性线直流分压器故障,即7月1日新更换的分压器运行不到1个月后发生故障,故障波形如图8所示,与YQ站7月1日更换前分压器故障波形类似。

2023年8月2日,将故障分压器替换为去除电容器的纯电阻直流分压器。同时,将YQ站和与其同一厂家供货的ZD送端站在运的另外3台中性线直流分压器,均替换为纯电阻直流分压器。4台纯

电阻直流分压器运行至今无故障。

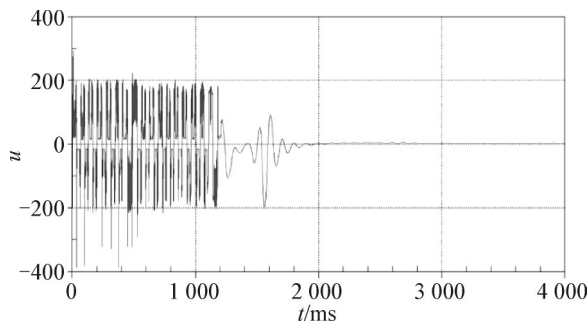


图8 YQ站分压器第2次故障波形
Fig. 8 The 2nd fault waveforms of voltage divider of YQ station

对故障分压器进行解体,发现3次本体故障均为分压器内部的高压电容器损坏,损坏情况基本相同:电容器端部损坏,外表面有熏黑痕迹;电容器内部严重碳化,部分区域形成空腔,有少量电容元件被挤压到电容筒外部;大部分电容元件的边缘融化变黑,但电容元件内部未发现碳化和发黑。高压电容器损坏情况如图9所示。

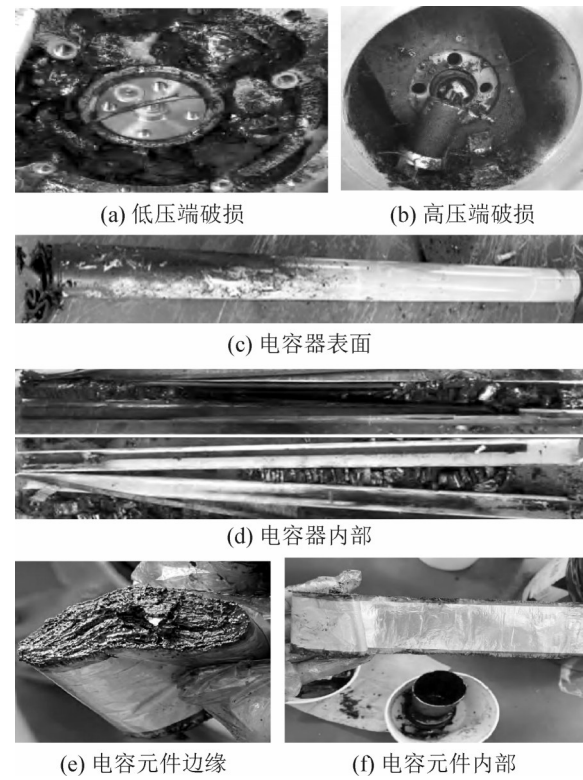


图9 高压电容器损坏情况
Fig. 9 Damage of high-voltage capacitor

1.3 系统谐波测量结果

通过增加50 k故障录波装置,对YQ站极母线和中性线谐波进行监测,发现极线 and 中性线电压的200次谐波(10 kHz)含量较大,其中负极 U_{dn} 监测到的最大谐波为8.592 kV。谐波监测结果见表2,录

波如图10所示。

表2 系统谐波监测结果表
Table 2 Harmonic monitoring result of system

测点	谐波电压次数	各次谐波电压值/kV	各次谐波电流值/mA
极Ⅱ U_{dn}	1	0.138	0.062
	2	0.041	0.037
	3	0.253	0.341
	200	8.592	771.987
极Ⅱ U_{dp}	1	3.363	0.251
	2	0.516	0.077
	3	1.051	0.236
	200	6.908	103.302
U_{dnb}	1	0.031	0.014
	2	0.001	0.001
	3	0.043	0.058
	200	0.025	2.246

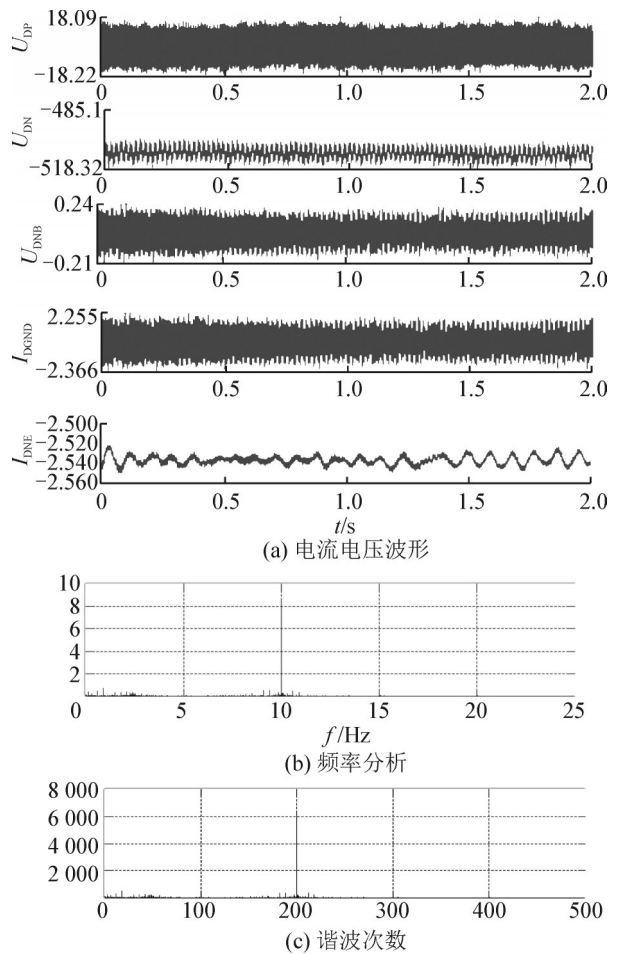


图10 YQ站现场故障录波图
Fig. 10 Site fault recording diagram of YQ station

由于工程设计等环节未对直流分压器高频谐波耐受和测量参数提出明确要求,因此厂家研制分压器时未进行针对性设计,电容器选型仅满足规程

规定的Y级温升45 K、最高工作温度90℃^[19]。

1.4 故障过程分析

YQ受端站第1次故障的发现时间是2023年7月1日年检期间,查看历史录波图,发现该分压器在2023年4月24日16:16就已经发生故障。2023年4月24日4个不同时刻的极I和极II中性线 U_{dn} 测点的波形如图11所示。

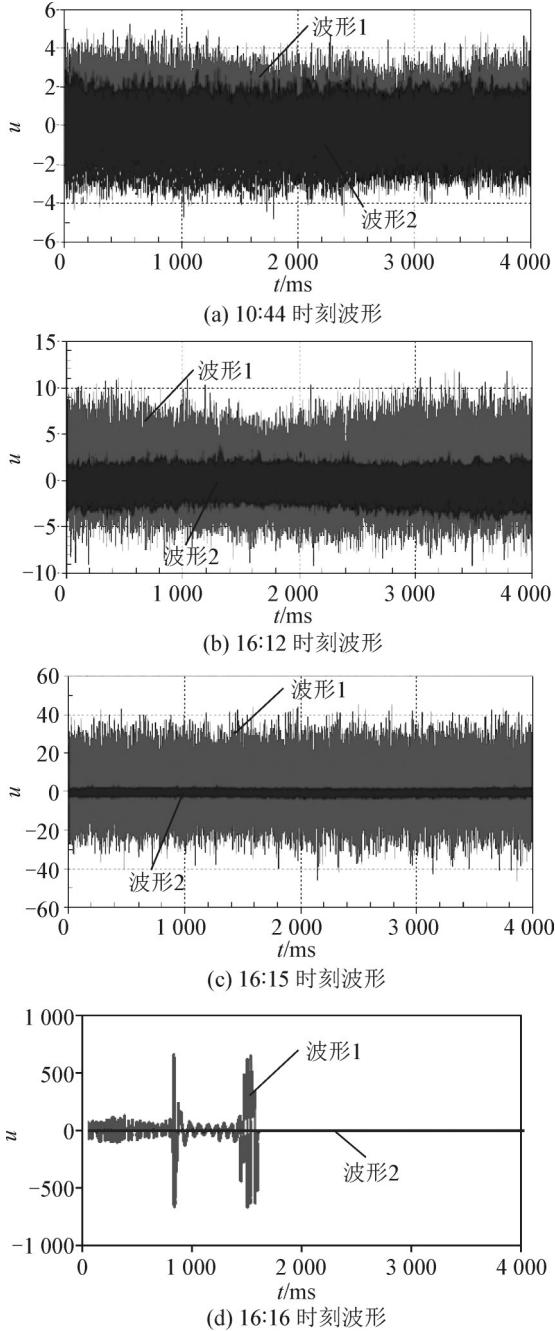


图11 YQ站分压器第1次故障的4个时刻波形
Fig. 11 Waveforms of the four moments in the first fault of voltage divider of YQ station

图11中,波形1为发生故障的极I中性线分压器波形,波形2为未发生故障的极II中性线分压器波形,正常情况下两个波形的幅值应较为接近。

10:44时刻波形1的幅值整体略高于波形2,16:12时刻波形1的幅值已增大到波形2的数倍,16:15时刻波形1的幅值继续增大到波形2的数十倍,16:16时刻波形1幅值继续增大,最高达波形2的数百倍,随后快速降低至0附近。

据此判断,该分压器在2023年4月24日10:44已发生异常,10:44~16:15期间异常持续发展,直至16:16故障爆发,分压器损坏。整个过程中,该测点的实际电压在2 kV左右,但故障分压器测量电压幅值的显示值从2 kV逐渐升高到100 kV,说明分压器的变比在逐渐减小。

中性线直流分压器的等效电路如图12所示^[20], R_1 和 C_1 分别为高压臂电阻和电容, R_2 和 C_2 分别为低压臂电阻和电容。其中,高压臂电阻 $R_1=100\text{ M}\Omega$,高压臂电容 $C_1=1\,430\text{ pF}$,低压臂电阻 $R_2=100\text{ k}\Omega$,低压臂电容 $C_2=2.86\text{ }\mu\text{F}$ 。

在10 kHz工况下,分压器高压臂和低压臂的容抗值远小于电阻值,公式为

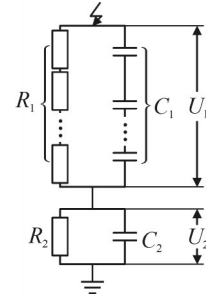


图12 直流分压器等效电路
Fig. 12 Equivalent circuit of DC voltage divider

$$X_{F1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = 11.130\text{ k}\Omega \quad (1)$$

$$X_{c1} \ll R_1 = 100\text{ M}\Omega \quad (2)$$

$$X_{F2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = 5.565\text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$X_{c2} \ll R_2 = 100\text{ k}\Omega \quad (4)$$

因此,在10 kHz下,分压器的变比约等于低压臂电容与高压臂电容之比,公式为

$$K \approx \frac{C_2}{C_1} \quad (5)$$

故障发展过程中,分压器变比的变化过程分析为:初始阶段,故障分压器测量得到的电压幅值约为2 kV,如图11(a)所示。当分压器高压臂电容器内的个别元件发生短路时,高压臂电容器的电容值 C_1 增大,在高频谐波电压下,根据公式(5)可知,分

压器的变比 K 将减小,测量电压显示值会增大,如图 11(b)所示。随着故障的发展,发生短路的元件数量越来越多,分压器的变比 K 越来越小,测量电压显示值越来越大,如图 11(c)所示。故障发生前,分压器的测量电压幅值显示值约为 100 kV,如图 11(d)所示,比正常分压器的测量值 2 kV 增大了 50 倍,因此判断此时高压臂电容 C_1 增大到原来电容量的 50 倍,即有效串联的电容心子数量减少为正常数量的 $1/50=2\%$ 。

正常状态下,电容器内部电容心子的总长度约为 160 cm,当有效串联的电容元件数量变为正常数量的 2%时,电容心子的有效绝缘长度约为 $160 \times 2\% = 3.2$ cm。由于高频运行工况时绝缘介质的绝缘水平低于工频运行工况,同时长期高温环境会造成电容器内部绝缘劣化进一步降低内绝缘强度,3.2 cm 的有效绝缘长度无法承受高频谐波电压,导致绝缘击穿。击穿时的放电能量将电容器心子向两侧挤压,在电容器内部产生空腔,造成空腔位置及金属连接片严重烧蚀,如图 13 所示。因此,判断最终击穿位置应在电容器中部。



图 13 电容筒空腔及金属连接片烧蚀

Fig. 13 Erosion of the cavity of the capacitor cylinder and the metal connection piece

放电后高压臂电容器内部开路,即 $X_{c1} \approx \infty$,由于 $X_{c2} \ll R_2$,此时分压器的变比 K 为

$$K \approx \frac{R_1}{X_{c2} // R_2} \approx \frac{R_1}{C_2} \gg \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

放电后,由于高压臂电容开路,使分压器的变比 K 远大于正常值,导致放电后分压器的测量电压显示值远低于正常值。2024 年 4 月 24 日 16:29 时刻(即故障后 13 min),YQ 站的中性线电压波形如图 14 所示,图中可见,波形 1 幅值(对应发生故障的极 I

中性线分压器输出电压)明显低于波形 2 幅值(对应未发生故障的极 II 中性线分压器输出电压)。自 2024 年 4 月 24 日 16:16 时直流分压器故障发生后,故障分压器一直以该状态运行,直至 2024 年 7 月 1 日年检时发现异常。

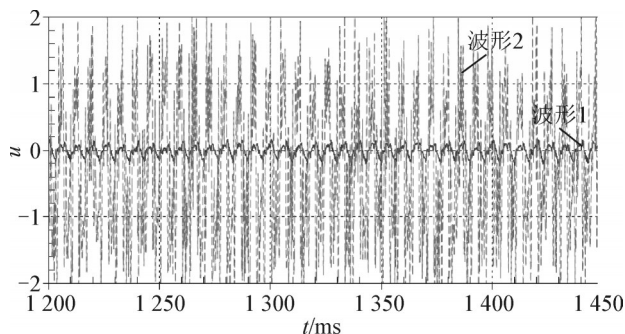


图 14 YQ 站第 1 次故障后中性线电压波形

Fig. 14 Neutral voltage waveform of YQ station after the first fault

根据 2024 年 4 月 24 日 YQ 站极 I 中性线直流分压器的故障发展过程判断,从 10:44 到 16:12 之间的约 5.5 h 内,故障分压器测量电压幅值的增大倍数约为 2~3 倍;从 16:12 到 16:15 之间的 3 min 内,故障分压器测量电压幅值的增大倍数约为 2~3 倍;从 16:15 到 16:16 之间的 1 min 内,故障分压器测量电压幅值的增大倍数约为 2~3 倍。可见,故障分压器测量电压幅值的增大速度越来越快。从理论角度分析^[21-22],高压臂电容器中短路元件的数量越多,则电容器的电容值越大、容抗值越小,流过电容器的电流越大,电容器内部发热就越严重;电容器内部发热越严重,则电容器内绝缘劣化速度越快,电容器元件就越容易短路;整个故障过程形成正反馈^[23-24],导致电容器元件短路速度越来越快,表现出来的现象则是故障分压器测量电压幅值的增大速度越来越快。

2 高频谐波溯源

2.1 谐波电压产生机理

柔直流换流器桥臂电压波形如图 15 所示。从图可看出桥臂子模块离散投切导致输出电压波形为阶梯式曲线,如果换流阀子模块个数较多,阀控难以满足每个周期只有 1 个子模块投切,造成部分阶梯为 $n \times U_c$ 电压阶跃,产生幅值波动的高频谐波电压^[25-26]。该柔直电网单个桥臂子模块数量为 264 个,在 5 ms 正弦波(0~90°)内完成 132 个子模块投切,对应单个子模块平均持续时间为 37.8 μs ,100 μs 阀控周期内平均有 2~3 个子模块投切,调制波过零点一般有 4~5 个子模块同时投切。

柔直换流器产生高频谐波电压^[27],高频谐波电压频率与换流阀调制频率相关,采用最近电平逼近调制策略产生阀控频率 f_s 倍频谐波。影响不同频次谐波电压幅值的主要因素包括调制比(无功功率)、子模块电压波动(桥臂电流)、阀端间电压(子模块个数)、谐波频率,与运行方式关系不大^[28]。调制比越大,整体高频电压谐波幅值越大;直流电压越大,整体高频电压谐波幅值越大;谐波频率越高,对应频率高频电压谐波幅值越低;子模块电容电压波动影响调制波电压阶跃幅度,但影响程度较小。

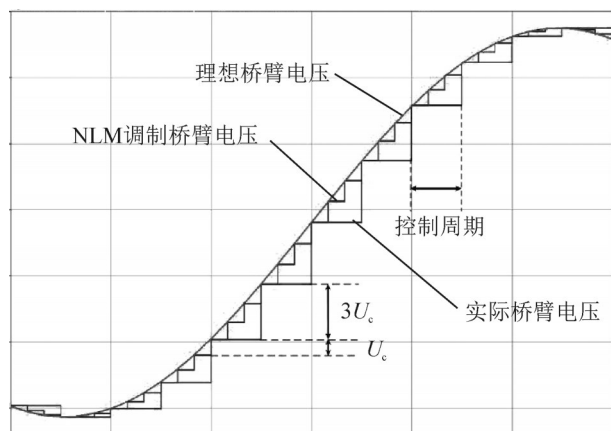


图15 柔直换流器桥臂电压波形

Fig. 15 Voltage waveform of VSC-HVDC converter arm

2.2 高频谐波传递路径

换流阀与交直流套管、分压器、换流变绕组等对地呈容性特征的设备间形成谐波电流通路^[29]。柔直换流器直流侧高频分量在直流分压器内部电容、交直流套管对地电容、阀塔对地电容等之间形成直流侧电流通路。柔直换流器高频谐波通路如图16所示。

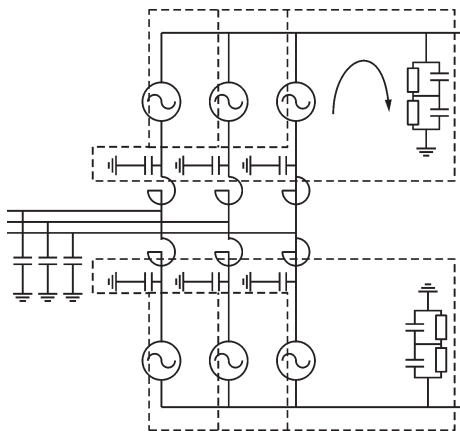


图16 柔直换流器高频谐波通路

Fig. 16 Haigh frequency hrmonic path of VSC

2.3 仿真分析与实测验证

通过理论分析和仿真模拟,柔直电网在直流分压器处存在 $n \times f_s \pm 150$ Hz 高频谐波电压,阀控周期

为 $100 \mu s$,因此直流侧存在 $10 \text{ kHz} \pm 150 \text{ Hz}$ 高频谐波,谐波幅值为 1 kV ,如图17所示。

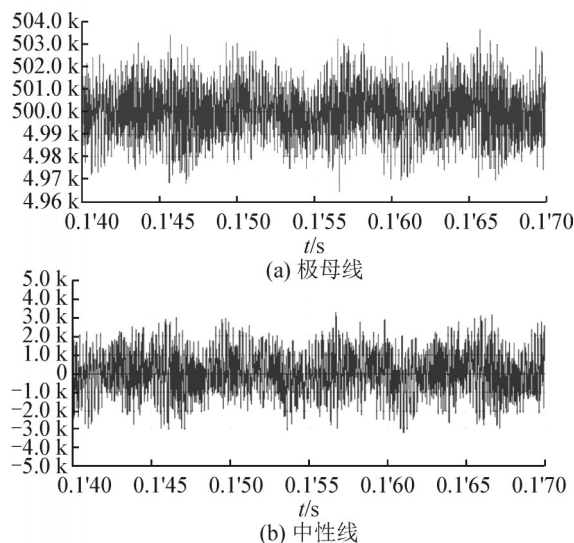


图17 极母线、中性线电压仿真波形

Fig. 17 Pole line and neutral line voltage simulation waveform

从现场实测结果来看,直流分压器处存在 10 kHz 频率附近谐波电压,平均幅值为 $2 \text{ kV} \sim 4 \text{ kV}$,电压谐波频谱如图18所示,波形如图19所示。实测结果与理论分析略有差异,主要原因是换流阀等设备高频建模不够精确,未能体现子模块电容电压波动对高频谐波电压的影响。

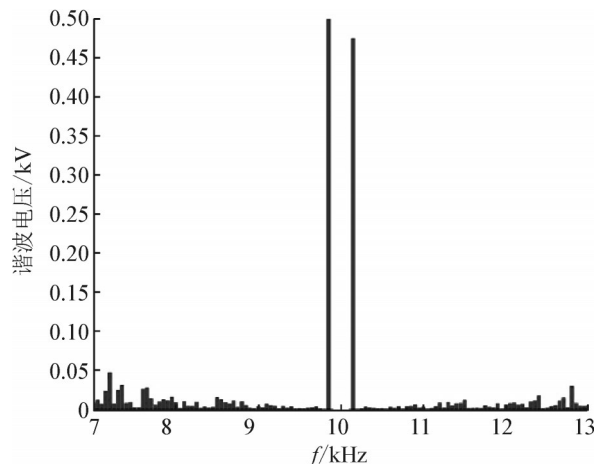


图18 中性线分压器谐波频谱

Fig. 18 Harmonic spectrum of neutral voltage divider

2.4 交流侧高频谐波溯源

除了直流侧高频谐波通路外,理论上存在交流侧高频谐波通路,交流套管等位置存在高频谐波分量。现场对交流套管末屏高频谐波电流进行测量,并与仿真结果进行对比,两者基本接近,如图20所示。高频谐波仿真模拟与现场实测结果验证,该柔直电网交流侧也存在高频谐波分量。

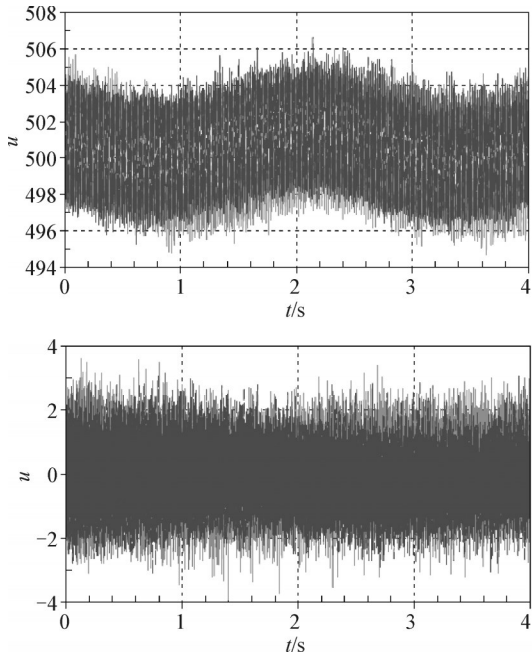


图19 中性线分压器实测波形

Fig. 19 Actual measurement waveform of neutral voltage divider

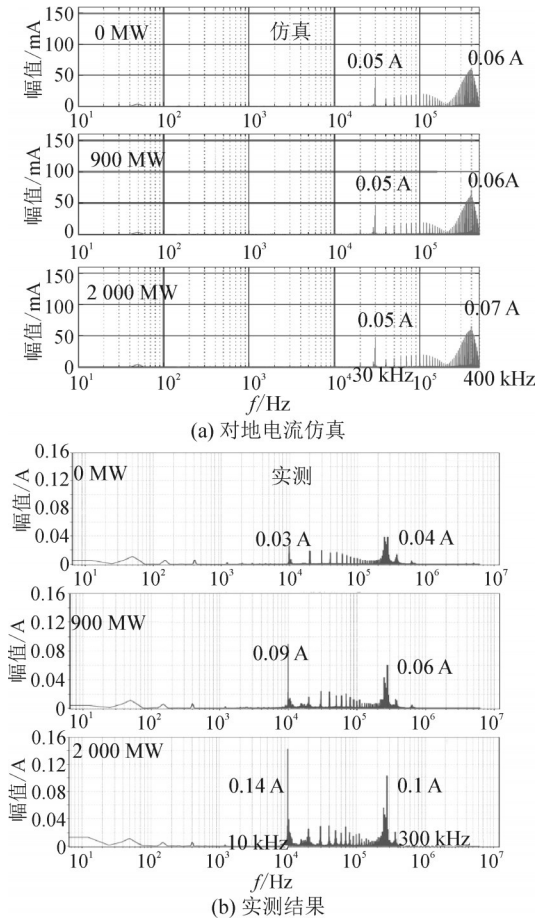


图20 交流套管对地电流仿真与实测结果对比

Fig. 20 Comparison between simulation and measurement results of current of AC bushing to ground

2.5 分压器自身谐振分析

在高频谐波电压作用下,如果电容器发生自身

谐振或直流分压器整体发生自身谐振,有可能导致分压器故障。为了验证自身谐振损坏情况,对电容器和直流分压器整体进行 LCR 扫频试验,扫频频率范围为 5 Hz~5 MHz。

1)电容器扫频

电容器在不同频率下的阻抗、阻抗角、电容值、电感值和电阻值如图 21 所示。扫频试验结果表明,频率由 5 Hz 增长至 5 MHz 的过程中,电容器的阻抗值呈减小趋势,阻抗角呈增大趋势,电容值和电阻值均呈减小趋势,电感值呈增大趋势,电容器在 1 MHz 以下频段未呈现自身谐振现象。

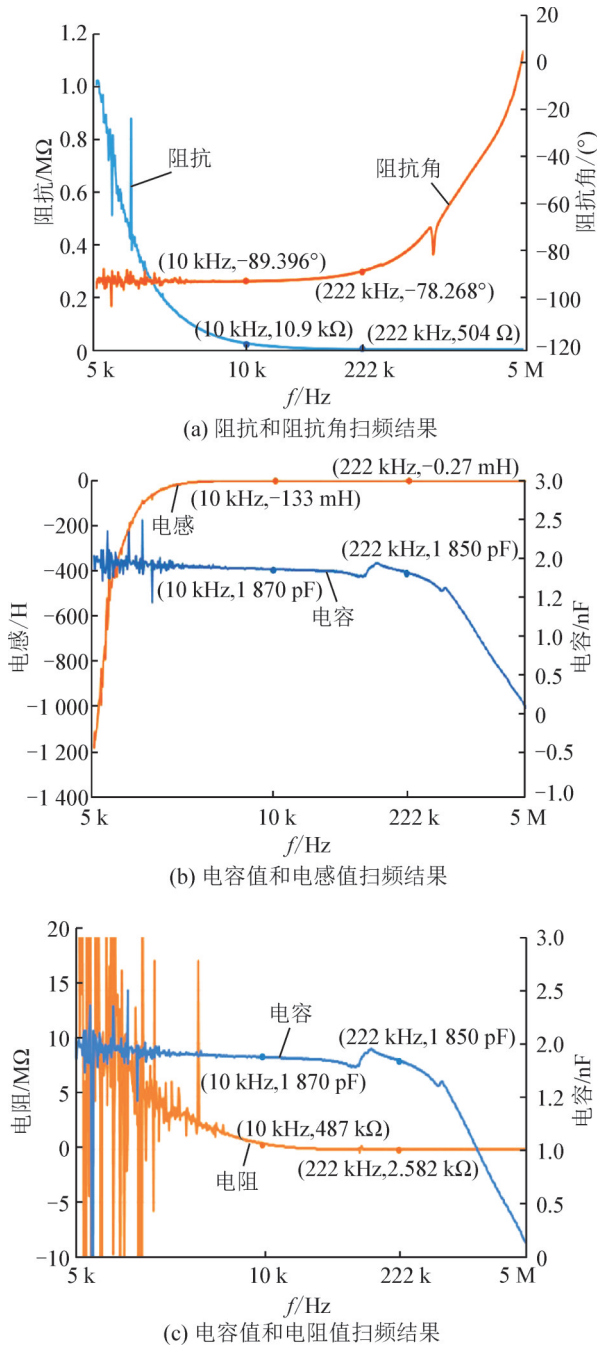
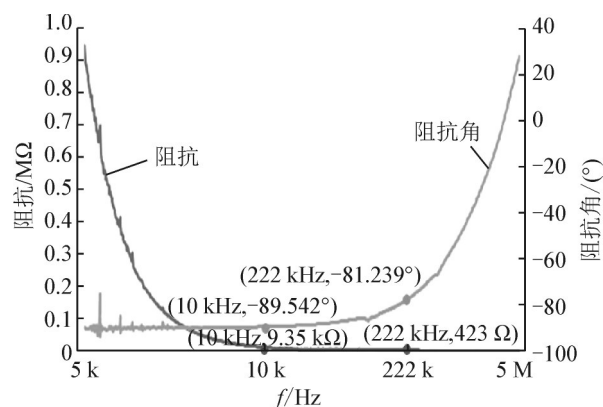


图21 电容器扫频结果

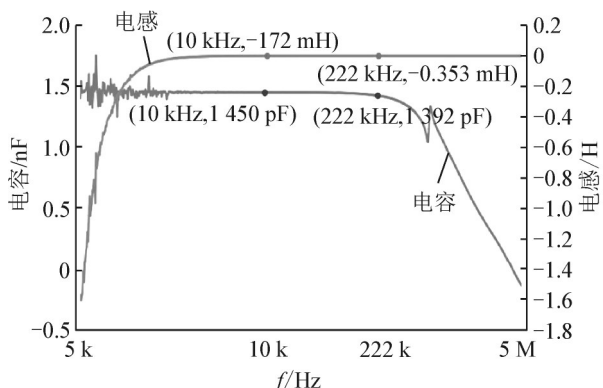
Fig. 21 The sweep frequency results of capacitor

2) 直流分压器扫频

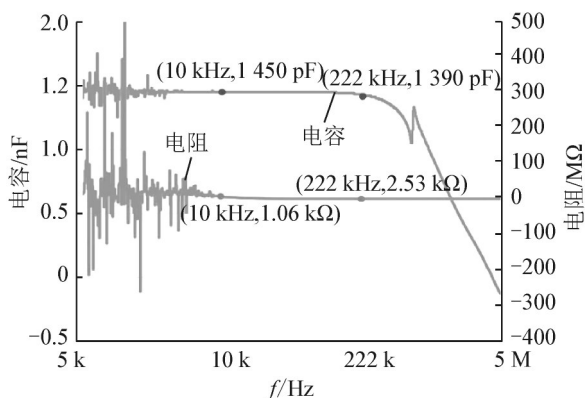
直流分压器在不同频率下的阻抗值、阻抗角、电容值、电感值和电阻值如图22所示。扫频试验结果表明,频率由5 Hz增长到5 MHz的过程中,直流分压器的阻抗值呈减小趋势,阻抗角呈增大趋势,电容值和电阻值均呈减小趋势,电感值呈增大趋势,直流分压器在1 MHz以下频段未呈现自身谐振现象。



(a) 阻抗和阻抗角扫频结果



(b) 电容值和电感值扫频结果



(c) 电容值和电阻值扫频结果

图22 直流分压器扫频结果

Fig. 22 The sweep frequency results of DC voltage divider

综上,电容器和直流分压器整体在1 MHz以下频段均未出现谐振,可以排除其自身谐振造成的损坏。

3 绝缘性能影响分析

3.1 高频谐波电效应分析

高频谐波会造成绝缘材料绝缘强度降低和劣化^[30-33],为验证电效应对电容器击穿强度的影响,对电容器聚丙烯薄膜、绝缘纸、电容器膜等绝缘材料进行击穿性能试验。

1) 聚丙烯膜击穿强度测试

对单层聚丙烯膜开展空气中50 Hz工频和10 kHz高频电压下的击穿强度测试^[34],结果如图23所示。

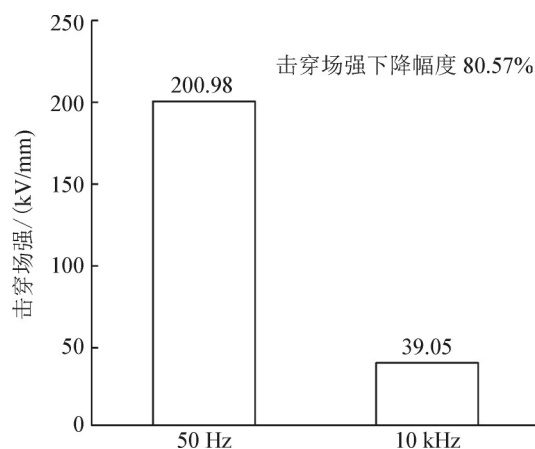


图23 空气中不同频率下聚丙烯薄膜击穿强度
Fig. 23 Breakdown strength of polypropylene films at different frequencies in the air

由图23可以看出,聚丙烯膜的工频击穿场强为200.98 kV/mm,10 kHz高频击穿场强为39.05 kV/mm,与工频相比下降幅度约为80.57%。测试结果表明,频率与聚丙烯膜的击穿强度呈反比例关系,随着频率的升高,其击穿强度显著下降。

2) 绝缘纸击穿强度测试

对单层绝缘纸开展空气中50 Hz工频和10 kHz高频电压下的击穿强度测试,结果如图24所示。

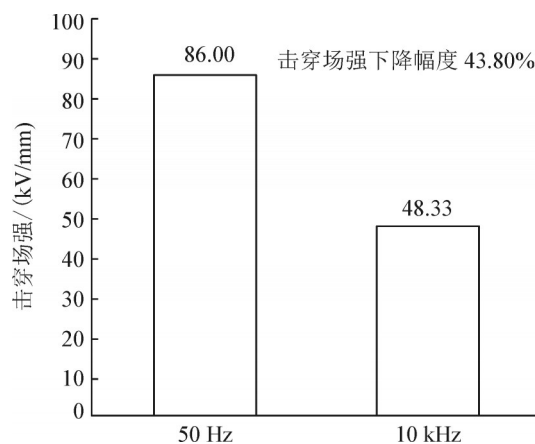


图24 空气中不同频率下绝缘纸击穿强度
Fig. 24 Breakdown strength of insulation paper under different frequencies in oil

由图 24 可以看出,绝缘纸的工频击穿场强为 86.00 kV/mm, 10 kHz 高频击穿场强为 48.33 kV/mm, 与工频相比下降幅度超过 43.80%。测试结果表明, 随着频率的升高, 绝缘纸的击穿强度显著下降^[35]。

3) 电容器膜击穿强度测试

对一层聚丙烯膜-绝缘纸-聚丙烯膜复合结构的电容器膜, 在电容器油中进行不同电压波形下的击穿强度测试, 结果如图 25 所示。其中, 工频电压下电容器膜的击穿场强为 663 kV/mm, 10 kHz 高频电压下电容器膜的击穿场强为 218 kV/mm, 与工频下的相比下降了 67.12%, 工频叠加高频谐波分量下电容器膜的击穿场强介于两者之间^[36]。

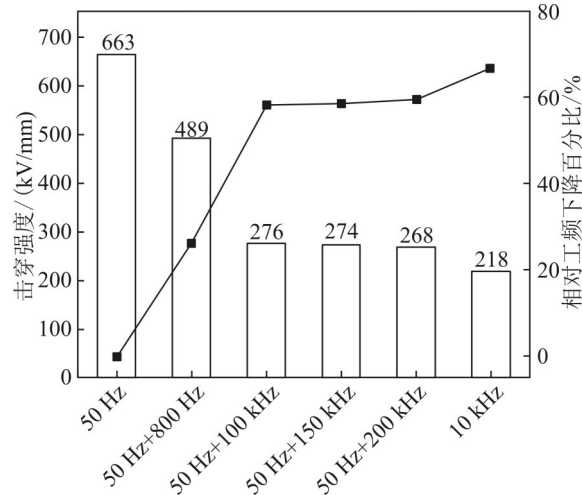


图 25 油中不同电压波形下电容器膜击穿场强
Fig. 25 Breakdown electric field strength of capacitor film under different voltage waveforms in oil

测试结果表明, 电压波形对电容器膜击穿强度的影响明显, 电容器膜击穿强度由大到小依次为: 工频 > (工频+800 Hz 正弦) > (工频+高频双极性方波) > 单一高频正弦。

4) 电容器各绝缘材料击穿强度对比

工频与 10 kHz 高频电压下电容器各绝缘材料击穿强度如表 3 所示。表 3 可以看出, 绝缘材料在高频下的体击穿场强较工频显著下降。但与实际工况相比, 电容器绝缘材料仍有很大绝缘裕度。同时结合故障分压器解体情况(电容心子并未发生元件击穿), 可以判断, 电效应不是造成直流分压器损坏的原因。

表 3 电容器各绝缘材料击穿强度
Table 3 Breakdown strength of each insulating material of capacitor

击穿强度/(kV/mm)	工频	10 kHz	下降幅度/%
聚丙烯薄膜(空气中测试)	200.98	39.05	80.57
绝缘纸(空气中测试)	86.00	48.33	43.80
电容器膜(油中测试)	663.00	218.00	67.12

3.2 高频谐波热效应分析

1) 热来源分析

在电容器两端施加电压, 电容器中的电流路径为: 电流由高压端流向第 1 个电容元件的高压极板, 电流在第 1 个电容元件高压极板的流动过程中, 经介质不断流向第 1 个电容元件的低压极板, 再从第 1 个元件的低压极板流向第 2 个元件的高压极板, 直至从最后一个元件的低压极板流出, 电流路径如图 26 所示。因此, 电容器的发热来源包括两部分, 电流流过铝箔极板时的阻性损耗发热, 以及电流流过绝缘介质时的介质极化损耗发热^[37]。

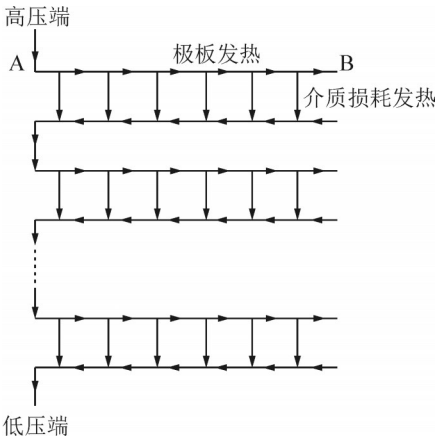


图 26 电容器中的电流路径
Fig. 26 Current path in capacitor

阻容式直流分压器损耗发热包括其内部电阻器发热和电容器发热两部分, 当其承受高频电压时, 主要热来源是电容器发热^[38]。这也说明, 高频谐波对内部电容器绝缘性能的影响更大。

2) 温度仿真计算

利用有限元分析软件(Ansys)建立分压器三维温度场仿真模型^[39], 如图 27(a)所示, 分压器中的电容筒内部心子模型如图 27(b)所示。

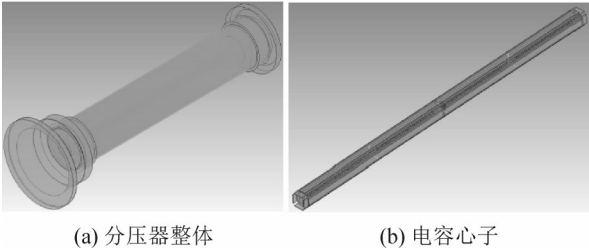


图 27 分压器建模
Fig. 27 Voltage divider modelling

根据分压器电气结构参数, 计算实际工况下分压器的总损耗约为 79.86 W。计及热传导、热对流与热辐射等因素影响^[40], 仿真计算分压器整体温度分布、外表面温度分布、内部 SF₆ 气体温度分布, 结果如图 28 所示。

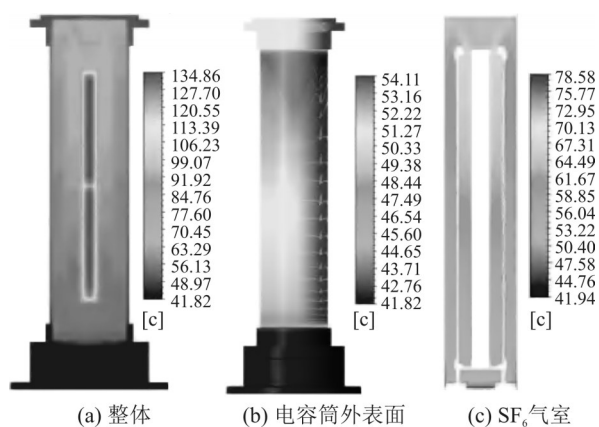
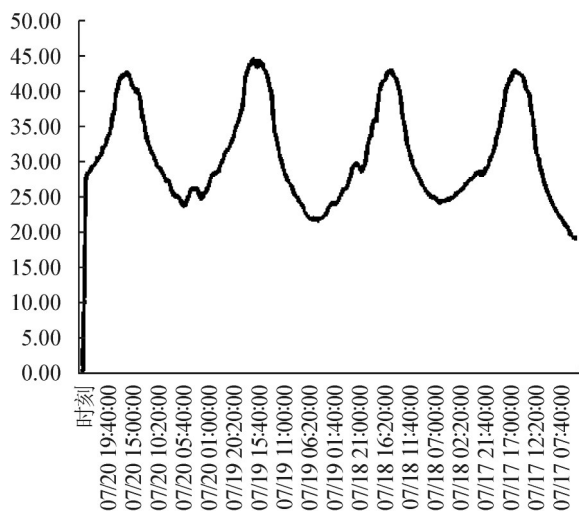


图28 分压器温度分布仿真结果

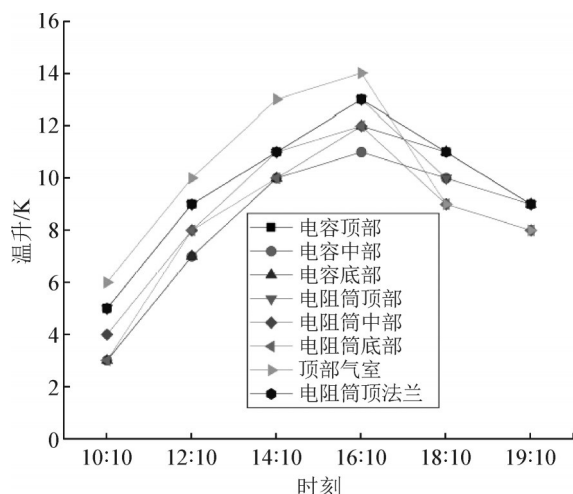
Fig. 28 Temperature distribution simulation result of voltage divider

根据仿真结果可知,当环境温度为42℃时,电容心子最高温度约为134.86℃,电容器外表面最高温度为54.11℃。此时电容器底部SF₆温度约为45℃,与现场SF₆温度传感器测试数据基本一致,验证了仿真计算结果的准确性,故障前后72h的现场SF₆温度传感器测试数据如图29所示,最高温度为45℃(15:40时刻)。

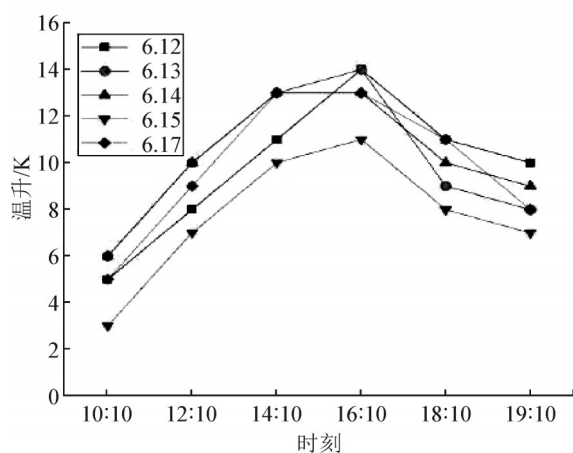
图29 现场SF₆温度传感器测试数据Fig. 29 Test data of SF₆ temperature sensor at site

在分压器不带电状态下,测量分压器不同日照条件时的内部温升,使用太阳辐射测量仪对分压器所处环境不同时段的日照辐射强度进行测量并记录,使用无线测温仪进行温度测试并记录。将温度传感器抱夹在分压器上,温度传感探头与被测分压器紧贴,从上到下布置多个测点,测试气体温度时探头悬空放置于气室内。

测得的分压器温升变化曲线如图30所示,最大温升为14 K,该位置位于分压器的顶部气室。其中,图30(a)为分压器各部位最大温升变化曲线,图30(b)为顶部气室各时刻温升变化曲线。



(a) 分压器各部位最大温升变化曲线



(b) 顶部气室各时刻温升变化曲线

图30 分压器温升变化曲线

Fig. 30 Temperature rise variation curve of voltage divider

计及日照引起的温升14 K,结合分压器温度分布仿真结果,则电容器内部最高温度达到148.86℃,远超规程规定的90℃最高允许工作温度^[19]。

3.3 白色絮状物溯源

1) 正常运行分压器解体检查

2023年11月,将ZD送端站、YQ受端站正常运行的两台中性线直流分压器退出运行,返厂解体发现电容器油中有絮状杂质、较为浑浊,电容器心子表面有白色絮状物附着。

2) 电容器油色谱分析

对电容器油进行油色谱检测,未检测到C₂H₂和H₂,检测到少量CO和大量CO₂,且CO₂/CO = 113.68 > 7,属于正常值范围^[41]。检测结果如表4所示。

据此判断,解体的两台正常运行的直流分压器内部无放电、闪络等故障,但存在低温过热现象(低于150℃),内部的固体绝缘材料的绝缘性能已发生老化、劣化。

表4 电容器油色谱分析结果
Table 4 Chromatography analysis result of capacitor oil

成份	含量/($\mu\text{L/L}$)
CH_4	6.0
C_2H_4	0.1
C_2H_6	2.6
C_2H_2	未检出
H_2	未检出
CO	24.1
CO_2	2 739.8
总烃	8.7

3) 絮状物成分检测

对电容器心子表面附着的白色絮状物进行取样,通过红外、FTIR、Py-GCMS 测试,结果表明白色絮状物的主要成分为含有烷烯烃和苯环基团的聚合物,判断白色絮状物来源于聚丙烯膜和绝缘油(苄基甲苯)。

4) 絮状物溯源试验

将电容器心子分别浸泡在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度间隔为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的油中高温老化 3 天,温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电容器油从无色透明状逐渐变为淡黄色、浑浊状,温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电容器油变色浑浊现象更明显。

待油冷却后,发现 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上老化温度的油中析出白色絮状物,且老化温度越高,冷却后析出的絮状物越多。将绝缘油分别放入两个烧瓶中,一个只放绝缘油,另一个在绝缘油中添加电容元件,两个烧瓶置于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温箱内,每隔 24 h 观察一次。老化 7 天后,只放置绝缘油的烧瓶中未出现絮状物,添加了电容元件的烧瓶中的绝缘油出现白色固体。据此,白色絮状物是绝缘油与电容元件中某组分发生反应生成,绝缘油自身无法单独生成。

在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行“绝缘油+聚丙烯薄膜”与“绝缘油+铝箔”热老化试验,经 5 天老化后,仅“绝缘油+聚丙烯薄膜”产生白色絮状物,排除絮状物由绝缘油经铝催化裂解产生,证明絮状物由绝缘油和聚丙烯薄膜发生反应产生。

5) 电容器电老化试验

对电容器施加频率为 25 kHz 的电压 2.88 kV/8 h、9.8 kV/40 min、8.7 kV/2 h (表面温升约 75 K)、4.6 kV/90 h (表面温升约 55 K) 后解体,发现电容器油明显浑浊,电容器内有白色絮状物析出,验证了电老化可以产生白色絮状物。不同电压下的温升特性如图 31 所示。

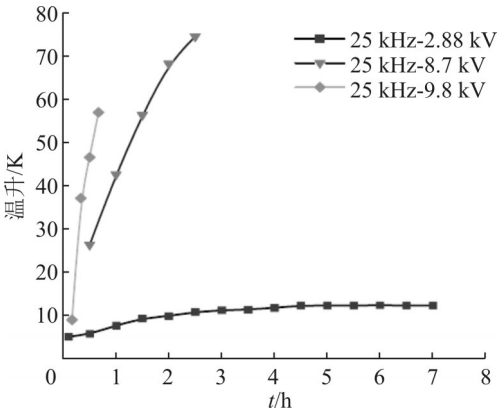


图31 不同电压幅值下温升特性
Fig. 31 Temperature rise characteristics at different voltage amplitudes

3.4 沿面绝缘强度影响

1) 絮状物和频率的影响

对聚丙烯薄膜材料分别在含有絮状物、不含絮状物的变压器油中进行沿面击穿强度测试^[42],将工频电源/10 kHz 高频电源输出与指型电极一端相连,电极另一端接地,两电极间距 0.5 mm,以 1 kV/s 的升压速率线性升压直至击穿,用高压探头采样,输入示波器并记录。试验平台如图 32 所示。

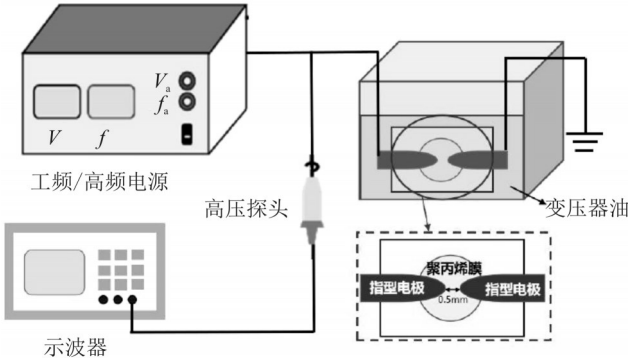


图32 沿面击穿强度试验平台
Fig. 32 Surface breakdown strength test platform

从测试结果来看,电压频率升高、增加絮状物均使聚丙烯薄膜材料的沿面击穿强度降低,测试结果如表 5 和图 33 所示。

表5 絮状物和电压频率对聚丙烯薄膜材料沿面击穿强度的影响

Table 5 Influence of flocculent substances and voltage frequency on the surface breakdown strength of polypropylene film materials

测试条件	不含絮状物	含絮状物	下降幅度/%
工频下沿面击穿电压/kV	20.89	14.50	30.60
高频下沿面击穿电压/kV	17.20	7.10	58.72
下降幅度/%	17.66	51.03	—

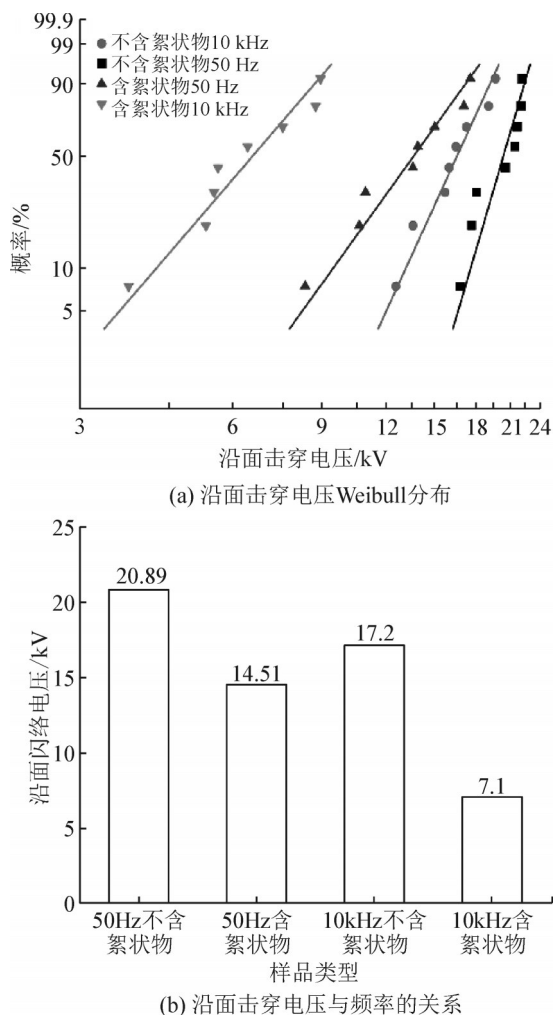


图33 电容器薄膜材料沿面击穿试验

Fig. 33 Surface breakdown test of capacitor film material

10 kHz 高频电压下电容器薄膜材料沿面击穿强度显著低于工频电压,且絮状物存在会进一步降低沿面击穿强度:无絮状物油中聚丙烯 10 kHz 沿面击穿强度较工频下降了 17.66%;有絮状物油中聚丙烯 10 kHz 沿面击穿强度较工频下降了 51.03%;工频和 10 kHz 下有絮状物油中聚丙烯薄膜沿面击穿强度较无絮状物油分别下降了 30.59%和 58.72%。

2) 绝缘纸板的影响

闪点是反映绝缘油的易燃性、挥发性、气化程度和安全性的指标^[43]。为降低高温老化过程中绝缘油因温度过高而接近其闪点引发的火灾和爆燃风险,保证试验的安全性,140℃以上的高温老化试验采用反应釜进行^[44]。反应釜由金属上盖和腔体组成,金属上盖含温度传感器,腔体容量为 100 ml。

在绝缘纸板老化试验中,将 35 ml 的绝缘油与 0.8 cm×2 cm 的绝缘纸板放置于反应釜腔内,密封后抽除腔体内的空气并充入氮气,以防止老化过程中发生氧化反应,随后将反应釜通过加热套加热,以

控制高温老化温度和时间。由老化试验结果可知,在 160℃ 的长时老化条件下,绝缘油颜色随老化时间的增加而变黄。绝缘纸板的颜色随老化时间的增加而逐渐加深。当老化进行到第 9 天时,反应釜盖上出现黑色的碳化附着物,同时绝缘油内也出现了少量黑色碳化悬浮物。试验结果表明,绝缘纸板在 160℃ 的高温下会发生碳化现象。

3.5 对电容器绝缘性能影响

高频谐波引起直流分压器内部电容器发热,主要会产生以下影响:

1) 绝缘油温度升高,电容元件中的聚丙烯薄膜在高温绝缘油中发生溶蚀,降低了电容心子绝缘材料的沿面绝缘强度;

2) 高温作用下电容器绝缘纸和绝缘纸板发生老化,产生含碳导电物;

3) 絮状物附着含碳导电物在低温时凝聚于电容心子边缘,使得场强最为集中的电容元件边缘场强畸变。

上述因素共同作用导致单个电容元件边缘发生沿面闪络,其他串联连接的多个电容元件相继发生短路,最终导致电容器击穿、分压器故障。

4 改进措施

1) 阻容性能方面。FK 站、KB 站采用降低电容值的方式,改造中性线直流分压器。ZD 站、YQ 站通过拆除电容器的方式,将中性线直流分压器改造为纯电阻分压器,改进分压器阻容性能后暂未发生故障。

2) 结构工艺方面。可采用降低电容器电容值、电容器选用全膜结构介质、分压器采用 RCR 新拓扑等方式,提升直流分压器高频谐波耐受性能。

3) 设计选型方面。在进行高压臂电容器选型时,增加电容器在典型高频谐波下的高温耐受考核等试验。增加分压器宽频监测装置,提升分压器的高频谐波测量性能。

4) 针对柔直工程宽频振荡、电力电子化等特点^[45],进一步开展柔直高频课题基础理论和专题技术研究,结合有源滤波和无源阻尼等综合抑制技术^[46-47],推进谐波溯源、材料分析、新设备研制、试验方法等理论研究,全面提升系统高频段的本质稳定性。

5 结语

当阻容式直流分压器承受高频谐波电压时,受其影响最大的部件是内部电容器,会造成电容器发

热,降低、劣化其绝缘强度。

1)柔直电网存在高频谐波。系统中存在较高幅值的谐波电压,高频谐波是在柔直换流阀子模块投切过程中产生。其中,200次谐波(10 kHz)含量较大,负极最大谐波 $U_{dn}=8.592$ kV。

2)高频谐波会导致电容器内部过热。实际运行中,直流分压器的总损耗为 79.86 W,当环境温度为 42℃,电容内部最高温度可达 148.86℃,远超规程规定的最高允许工作温度 90℃。

3)高频谐波是导致直流分压器内部电容器损坏的唯一原因。高频谐波会引起分压器内部电容器发热,绝缘油温度升高,电容元件中的聚丙烯薄膜在高温绝缘油中发生溶蚀,降低电容元件绝缘材料的沿面绝缘强度,造成电容元件边缘沿面闪络。

参考文献

- [1] 刘泽洪,郭贤珊.含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J].电网技术,2020,44(9):3595-3603.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC grid with renewable source connected[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3595-3603.
- [2] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等.基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR · Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter - interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [3] 陆瀚,郑会奇.浅谈 35 kV 及以下油浸式新能源变压器的负载特性[J].变压器,2024,61(12):10-15.
LU Han, ZHENG Huiqi. Discussion on load characteristics of 35 kV and below oil-immersed new energy transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12): 10-15.
- [4] 张慧,王存旭,王亮.农网电动汽车充电站及分布式光伏协同规划研究[J].东北电力技术,2024,45(7):9-19.
ZHANG Hui, WANG Cunxu, WANG Liang. Research on collaborative planning of electric vehicle charging stations and distributed photo voltaics in rural power grid[J]. North-east Electric Power Technology, 2024, 45(7): 9-19.
- [5] 魏伟,叶利,方毅,等.考虑碳排放配额和碳交易的新能源电力系统日前优化调度[J].电网与清洁能源,2024,40(1):130-136.
WEI Wei, YE Li, FANG Yi, et al. Day-ahead optimal scheduling of new energy power system considering Carbon emission quota and Carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 130-136.
- [6] 张晓同,杨庆福,冯娟,等.新能源非晶合金立体卷铁心变压器技术参数的确定及设计[J].变压器,2024,61(6):1-5.
ZHANG Xiaotong, YANG Qingfu, FENG Juan, et al. Determination of technical parameters and design for new energy amorphous alloy tridimensional wound core transformer[J]. Transformer, 2024, 61(6): 1-5.
- [7] 龚凯,肖晃庆,张展,等.新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J].浙江电力,2024,43(11):3-14.
GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 3-14.
- [8] 马喜平,董晓阳,李亚昕,等.考虑新能源接入的电网有功无功协调双层优化策略研究[J].电网与清洁能源,2024,40(1):137-142.
MA Xiping, DONG Xiaoyang, LI Yaxin, et al. Research on the two-layer optimal strategy of active power and reactive power coordination considering integration of new energy [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 137-142.
- [9] 王兴国,于溯.新能源电源送出线路不同类型距离保护动作性能比较[J].浙江电力,2024,43(7):20-28.
WANG Xingguo, YU Su. A comparison of the operational performance of different types of distance protection in new energy power transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 20-28.
- [10] 彭茂兰,许洁翊,严喜林,等.基于相对等效短路比的新能源—柔直送出系统振荡风险评估[J].电网与清洁能源,2024,40(5):96-104.
PENG Maolan, XU Jieyi, YAN Xilin, et al. Oscillation risk assessment of renewable connected to MMC-HVDC system based on relative equivalent short - circuit ratio[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 96-104.
- [11] 刘书瀚,庄园,梁战,等.含直流断路器的柔直配电网过电压与绝缘配合[J].电力工程技术,2023,42(3):61-71.
LIU Shuhan, ZHUANG Yuan, LIANG Zhan, et al. Over-voltage and insulation coordination of flexible DC distribution network with DC circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 61-71.
- [12] 艾小清,袁旭峰,熊炜,等.柔直配电系统混合型MMC可靠性评估[J].电测与仪表,2023,60(9):88-95.
Ai Xiaoqing, Yuan Xufeng, Xiong Wei, et al. Reliability evaluation of hybrid MMC for flexible DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 88-95.
- [13] 李宁,胡佳乐,詹晓暄,等.故障关联矩阵下弹性配电网可靠性评估[J].西安工程大学学报,2024,38(2):1-8.
LI Ning, HU Jiale, ZHAN Xiaoxuan, et al. Reliability as-

- assessment of elastic distribution network based on fault correlation matrix[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(2): 1-8.
- [14] 赵文广, 李云丰, 文涛. 风电柔直并网虚拟阻抗次同步振荡抑制策略[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(6): 137-144.
ZHAO Wenguang, LI Yunfeng, WEN Tao. The virtual damping control strategy of flexible HVDC connecting to PMSG-based wind farm for sub-synchronous resonance suppression [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 137-144.
- [15] 张耀月. ± 800 kV 直流分压器低能量放电故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 98-105.
ZHANG Yaoyue. Analysis on low energy discharge fault analysis of ± 800 kV DC voltage divider[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 98-105.
- [16] 王奇, 谭炳源, 刘青松, 等. 特高压换流站直流分压器闪络故障研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(10): 934-940.
WANG Qi, TAN Bingyuan, LIU Qingsong, et al. Analysis of DC voltage divider internal flashover fault in UHVDC converter station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(10): 934-940.
- [17] 顾泰宇, 孙丝萝, 田野, 等. 高比例分布式光伏并网无功电压控制方法综述[J]. 东北电力技术, 2023, 44(3): 1-5.
GU Taiyu, SUN Siluo, TIAN Ye, et al. Overview of reactive voltage control methods for high proportion distributed photovoltaic grid connection[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(3): 1-5.
- [18] 董巍, 叶子阳, 孙泽来, 等. 阻容分压器高精度测量技术与试验[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 328-335.
DONG Wei, YE Ziyang, SUN Zelai, et al. Measurement technology and tests for high precision RC voltage dividers[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 328-335.
- [19] 互感器 第1部分 通用技术要求: GB/T 20840. 1—2010[S]. 2010.
Instrument transformers—Part 1: General requirements: GB/T 20840. 1—2010[S]. 2010.
- [20] 叶杰, 汤广福, 赵成勇. 多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1433-1441.
YE Jie, TANG Guangfu, ZHAO Chengyong. Modeling and stability analysis for flexible DC power grid with multi-voltage levels[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1433-1441.
- [21] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [22] 朱博, 徐攀腾, 崔远卓, 等. 连接无源网络的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 151-160.
ZHU Bo, XU Panteng, CUI Yuanzhuo, et al. AC fault ride-through control strategy for LCC-FHMMC hybrid HVDC system with passive network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 151-160.
- [23] OGATA K. Modern control engineering (5th edition) [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.
- [24] FRANKLIN G F, POWELL J D, EMAMI-NAEINI A. Feedback control of dynamic systems[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.
- [25] 秦小华, 侯俊杰, 樊艳芳, 等. 柔性直流电网双端量自适应限流控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(8): 81-95.
QIN Xiaohua, HOU Junjie, FAN Yanfang, et al. Research on two-terminal adaptive current limiting control strategy for flexible HVDC grids[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(8): 81-95.
- [26] 周啸, 阳岳希, 寇龙泽, 等. 模块化多电平柔性直流换流器高频振荡抑制策略与参数优化设计[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 50-60.
ZHOU Xiao, YANG Yuexi, KOU Longze, et al. Strategy design and parameter optimization of high-frequency resonance suppression for modular multilevel converter[J]. Electric Power, 2025, 58(1): 50-60.
- [27] 杨诗琦, 刘开培, 秦亮, 等. MMC-HVDC 高频振荡问题研究进展[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3485-3496.
YANG Shiqi, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Research progress of high frequency oscillation in MMC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3485-3496.
- [28] 郭龙, 黄莹, 李岩, 等. 直流回路谐振原理与抑制措施分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(7): 1-7.
GUO Long, HUANG Ying, LI Yan, et al. Analysis on the principle and suppressing measures of DC loop resonance[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 1-7.
- [29] 陈继开, 孙崇博, 李阳, 等. 多端柔直换流站高频谐振及传播机理分析与抑制[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 26-36.
CHEN Jikai, SUN Chongbo, LI Yang, et al. Analysis and suppression of high-frequency resonance and propagation mechanism in multiterminal flexible direct converter station [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 26-36.
- [30] TEIXEIRA MATEUS, HOYO IGNÁCIO DE, WANDROW-ELSTI FERNANDO, et al. Evaluation of thermal degradation in isotactic polypropylene films used in power capacitors[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2017, 130(2): 45-56.
- [31] LI Shengtao, MIN Daomin, WANG Weiwang, et al. Linking traps to dielectric breakdown through charge dynamics for polymer nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2777-2785.
- [32] MACHADO GUSTAVO DE OLIVEIRA, COUTINHO G L, SILVEIRA AUGUSTO WOHLGEMUTH FLEURY VELO-

- SO DA, et al. Impacts of harmonic voltage distortions on the dynamic behavior and the PRPD patterns of partial discharges in an air cavity inside a solid dielectric material[J]. *Energies*, 2022, 15(7):2650-2660.
- [33] 张宏伟, 杨晓静, 姬凯. 暂态过电压对双极中性线冲击电容器绝缘性能影响分析[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2025, 46(3):61-68.
- ZHANG Hongwei, YANG Xiaojing, JI Kai. Analysis on influence of transient overvoltage on insulation performance of bipolar neutral line surge capacitor[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2025, 46(3):61-68.
- [34] 许然然. 柔性直流换流阀直流支撑电容器用聚丙烯薄膜绝缘失效及其抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [35] 吴东乐, 孙胜然, 刘群华, 等. 变压器用绝缘纸击穿强度的多因素协同影响研究[J]. *绝缘材料*, 2020, 53(10):96-102.
- WU Dongle, SUN Shengran, LIU Qunhua, et al. Study on multi-factor synergy effect of breakdown strength for insulating paper[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(10):96-102.
- [36] 劳斯佳, 何樱, 唐勇, 等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(4):12-17.
- LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on the influence of temperature and film thickness on breakdown characteristic of metallized films under AC-DC composite voltage[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(4):12-17.
- [37] 陈伟, 严飞, 王子建, 等. 特高压工程用并联电容器单元热稳定性[J]. *高电压技术*, 2018, 44(6):1853-1860.
- CHEN Wei, YAN Fei, WANG Zijian, et al. Thermal stability performance of shunt capacitor unit for UHV project[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6):1853-1860.
- [38] 吴永利, 国江, 冯春林, 等. 电力电容器在工频与谐波条件下的热稳定性能研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(1):136-144.
- WU Yongli, GUO Jiang, FENG Chunlin, et al. Research on thermal stability performance of power capacitor under power frequency and harmonic condition[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(1):136-144.
- [39] 翟少磊, 罗奕, 段怡, 等. 直流分压器暂态温升及冷却特性研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(3):140-149.
- ZHAI Shaolei, LUO Yi, DUAN Yi, et al. Study on transient temperature-rise and cooling characteristic of DC voltage divider[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(3):140-149.
- [40] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [41] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 2014.
- Guide to analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014[S]. 2014.
- [42] 赵洪, 吕洪雷, 杨佳明, 等. 结晶特性对聚丙烯空间电荷及直击击穿强度影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7):88-93.
- ZHAO Hong, LYU Honglei, YANG Jiaming, et al. Effect of crystalline characteristics on space charge and DC breakdown strength of polypropylene[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(7):88-93.
- [43] 潘志城, 邓军, 张晋寅, 等. 换流变压器绝缘材料燃烧试验和防火能力研究[J]. *变压器*, 2020, 57(7):66-70.
- PAN Zhicheng, DENG Jun, ZHANG Jinyin, et al. Study on flame test of insulation material and fire resistance ability of converter transformer[J]. *Transformer*, 2020, 57(7):66-70.
- [44] 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2021[S]. 2021.
- Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021[S]. 2021.
- [45] 杜镇宇, 阳岳希, 季柯, 等. 张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(8):3066-3075.
- DU Zhenyu, YANG Yuexi, JI Ke, et al. High frequency harmonic resonance and suppression in zhangbei project[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8):3066-3075.
- [46] SONG Xi, ZHANG Hongwei, WANG Hailong, et al. Design of load balancing routing in electric power ASON network[C]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2021(6):1657-1661.
- [47] 叶育林, 于艇, 刘晨, 等. 直流微网中双有源桥变换器精确直接功率控制[J]. *西安工程大学学报*, 2023, 37(6):96-105.
- YE Yulin, YU Ting, LIU Chen, et al. Accurate direct power control for dual active bridge converter in DC microgrid[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2023, 37(6):96-105.

作者简介:

张宏伟(1976—), 男, 正高级工程师、高级技师, 研究方向为超特高压电磁特性与新能源并网特性。E-mail:gs_zhanghw@163.com。