

气隙对换流阀阳极饱和电抗器发热影响研究

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: 阳极饱和电抗器的主要作用是限制电流变化率和浪涌电流、抑制电压变化率和浪涌电压、消除谐波和振荡、平滑波形,保障换流阀运行稳定性。阀电抗器运行中,受磁致伸缩效应、麦克斯韦力和洛伦兹力的长期共同作用,铁心振动会造成气隙变小、消失,导致铁心损耗增大、温度上升,严重危及换流阀安全。文章分析了铁心气隙脱离引起铁心损耗增大的案例,通过参数测量、振动测试、损耗测试、垫片状态检查等手段,探索气隙对损耗、温度、电动力等参数的影响,分析研究阀电抗器气隙与发热故障间的逻辑关系,提出了设计制造、日常运行、检修维护等阶段的改进措施,对保证阀电抗器、晶闸管等设备安全运行具有重要的借鉴和参考意义。

关键词: 阳极饱和电抗器; 磁致伸缩效应; 气隙; 损耗

Research on the Influence of Air Gap on Heating of Anode Saturable Reactor in Converter Valves

ZHANG Hongwei

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

Abstract: The main function of the anode saturable reactor is to limit the rate of current change and surge current, suppress the rate of voltage change and surge voltage, eliminate harmonics and oscillations, smooth waveforms and assure operation stability of the converter valve. During the operation of valve reactors, vibration of the iron core, due to the long-term and combined effects of magnetostriction, Maxwell force and Lorentz force, can cause the air gap to reduce or disappear, resulting in increase of iron core loss and rise of temperature, and seriously endangering the safety of the converter valve. In this paper, the case of increase of iron core loss due to the detachment of iron core air gap is analyzed. The influence of air gap on such parameters as loss, temperature, and electro dynamic force is explored through the means such as parameter measurement, vibration testing, loss testing, pad status inspection etc. The logical relationship between reactor air gap and heating faults of valve reactor is analyzed and studied, and the preventive measures at such different stages as design, manufacturing, daily operation, maintenance are proposed, which have important reference and guidance significance for assuring safe operation of equipment such as valve reactors and thyristors.

Keywords: anode saturable reactor; magnetostriction effect; air gap; loss

0 引言

阳极饱和电抗器(anode saturable reactor, ASR, 以下简称“阀电抗器”)串联在晶闸管阳极回路,是换流阀重要的保护元件^[1],主要功能是保护换流阀免受高压浪涌和恶劣环境的损害。阀电抗器的基本特性是利用非线性电感来限制电流变化率和浪涌电流、抑制电压变化率和浪涌电压、消除谐波和

振荡、平滑波形,起到“缓冲器”和“稳定器”的作用,确保换流阀安全稳定运行。

阀电抗器具有非线性特性,串联在晶闸管阳极回路后相当于非线性电感和非线性电阻并联。其主要作用表现在3个方面:1)在晶闸管导通初始阶段,阀电抗器电感值较大,可以有效限制电流上升率(di/dt)^[2]。随着晶闸管导通电流增大,阀电抗器电感值变小,直至降为0;2)晶闸管关断阶段,回路电

流减小,阀电抗器电感值增大,从而有效抑制电压上升率(du/dt),限制阀误导通的反向峰值电压在其承受范围;3)当回路出现短路故障时,阀电抗器可以限制浪涌电流,确保过电压时可以承担较大的总电压。

近年来,国内外学者对阀电抗器开展了大量研究,但涉及气隙对阀电抗器性能及发热影响的研究鲜有报道。本文选取1个铁心气隙脱离引起铁心损耗增大、温度上升的典型案例,旨在通过参数测量、振动测试、损耗测试、垫片状态检查等技术手段,探索气隙对阀电抗器的损耗、温度、电动力等参数的影响,分析、研究阀电抗器气隙与发热故障间的物理关联,提出预防措施并在设备设计制造、日常运行、检修维护等环节落实,保证阀电抗器和晶闸管等设备安全运行。

1 阀电抗器运行机理

1.1 阀电抗器作用

换流阀是高压直流系统核心设备^[3],主要作用是把交流电转换成直流电或实现逆变换^[4]。换流阀单极每端包括2个串联的12脉动桥,每个12脉动桥由2个串联的6脉动桥组成,每个6脉动桥换流阀为双重阀结构,双重阀悬吊于阀厅顶部。每个双重阀的阀臂由数个阀组件构成,每个阀组件由若干晶闸管和与其紧靠的触发控制单元、均压回路及阀电抗器等组装构成。阀组件结构示意图如图1所示^[5]。

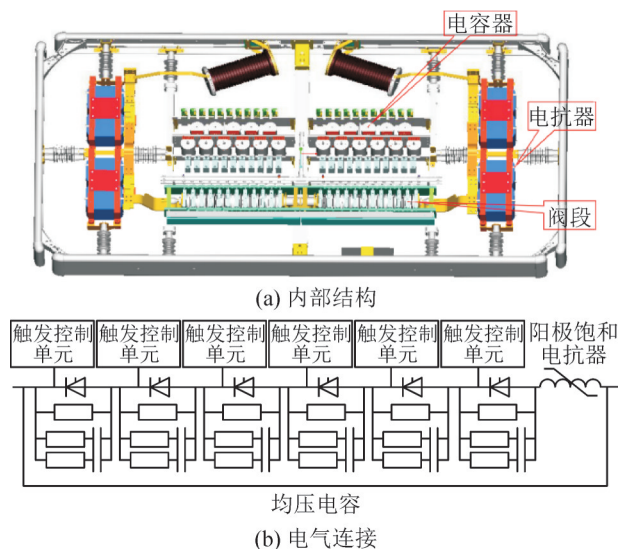


图1 阀组件结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of valve module

阀组件中最主要的工作元件是晶闸管换流阀^[6]。由于运行中电流、电压等电气量变化很快,晶闸管

误导通或损坏的概率极高,因此需要与其串联一个电感元件做为其保护,限制电流、电压突变且具有阻尼功能。由于线性电感元件可以提高换流器对电压和无功的需求,因此串联电感元件后阀组件体积会随之增大^[7]。直流工程实践中,一般在晶闸管阳极回路串联阀电抗器来保护晶闸管,磁饱和度由晶闸管根据电流大小来调整,这样可以不改变阀电抗器电感值也不额外消耗无功。基于上述运行工况,阀电抗器的核心功能是抑制换相时电流振荡频率和振幅,限制晶闸管导通阶段较大的电流上升率(di/dt)和浪涌电流,保护晶闸管不被烧毁;当晶闸管关断阶段,抑制较高的电压上升率(du/dt),确保晶闸管不会因浪涌电压而误导通;限制电力系统运行中出现的暂态电流和故障电流,保障晶闸管运行稳定性^[8-9]。单阀电抗器示意图如图2所示。

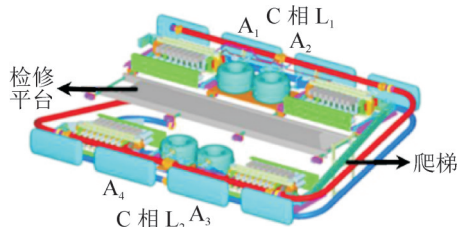


图2 单阀电抗器示意图
Fig. 2 Schematic diagram of single valve reactor

1.2 阀电抗器原理

晶闸管导通初始阶段,电流上升率(di/dt)较大,而此时阀电抗器处于饱和状态阻抗值很大,可以有效抑制电流上升率。晶闸管导通后,当载流子积累到足够多时,阀电抗器将呈现低阻抗特性,因此运行中阀电抗器表现为非线性饱和特性^[10]。

阀电抗器的性能是基于电磁感应定律^[11],利用其电感特性($V=Ldi/dt$)来实现其非线性饱和特性^[12]。电感值是阀电抗器设计最关键的参数之一,并需综合考虑保护导通过程中的晶闸管,以及保护阀电抗器自身温度不超过限值。阀电抗器的电感值主要由气隙决定,气隙大小与电感值呈反比例关系。气隙变小时,电感值变大;气隙增大时,电感值降低。电感值公式为

$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{\delta} \quad (1)$$

式中: L 表示电感值; N 表示线圈匝数; A 表示铁心截面积; μ_0 表示空气磁导率; δ 表示气隙长度。阀电抗器运行时,线圈匝数 N 、铁心截面积 A 、空气磁导率 μ_0 为常量。

当磁导率变化时,磁感应强度同步改变。阀电

抗器运行时,磁场强度和运行电流相关,运行工况稳定时,磁感应强度与磁导率成正比例关系。根据电磁感应定律^[11],铁心气隙变小时,磁阻减小、磁导率增大,磁感应强度增大;气隙增大时,磁阻变大、磁导率减小,磁感应强度减小。据此,铁心气隙与磁感应强度成反比例关系。磁感应强度公式为^[13]

$$B = \mu_0 H \quad (2)$$

式中: B 表示磁感应强度; μ_0 表示磁导率; H 表示磁场强度。

阀电抗器运行中,其发热源主要是铁心磁畴不断翻转、摩擦而产生的磁滞损耗^[14-15],这种损耗以热量形式扩散到周围介质中^[16]。铁心磁滞损耗符合斯坦梅茨方程^[17-18],其计算可用式(3)表示。运行中,铁心材质、有效体积、磁化频率不变,磁滞损耗与磁通密度 α 倍方成正比例关系。

$$P = K_h f B_m^\alpha V \quad (3)$$

式中: P 表示磁滞损耗; K_h 表示磁滞损耗系数; f 表示磁化频率; B_m 表示磁通密度峰值; α 表示斯坦梅茨指数,对于硅钢片常数取 1.6; V 表示铁心体积。

结合式(2)和式(3),可以得出,气隙减小,磁通密度增加,铁心磁滞损耗增大;反之,铁心磁滞损耗降低。通过对式(1)~式(3)推导可以得出,铁心气隙的变化会造成阀电抗器电感值和发热量 2 个物理量随之变化^[19]。因此,可以通过温度监测、电感值测量等技术手段,有效判断正常运行中阀电抗器铁心气隙状态,综合评估阀电抗器实时健康状况^[20]。

阀电抗器等值电路如图 3^[21]所示。图 3 中: $u(t)$ 表示绕组端电压; $i_m(t)$ 表示励磁电流; C_{sr} 表示杂散电容; R_{cu} 表示线圈直流电阻,可反映铜耗情况; L_0 表示线圈等效空心电感; R_m 表示铁心电阻,可以反映铁心磁滞损耗和涡流损耗; L_m 表示铁心励磁电感。以上参数中, C_{sr} 、 R_{cu} 、 L_0 为常量, R_m 、 L_m 、 i_m 为变量^[22]。

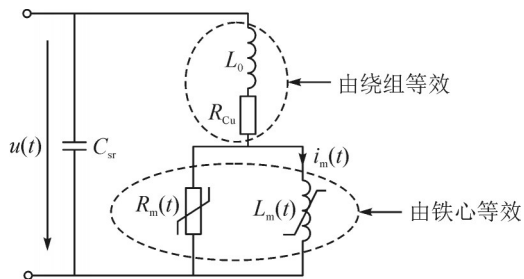


图3 阀电抗器等效电路模型
Fig. 3 Equivalent circuit model of valve reactor

1.3 阀电抗器类型

阀电抗器属于铁心式电抗器,其主体包含铁心和绕组,如图 4 所示。按照铁心和线圈的耦合方式的不同,将阀电抗器分为芯式和壳式 2 类^[23],2 类阀电抗器只是结构型式不同,在电路中发挥的作用相同。

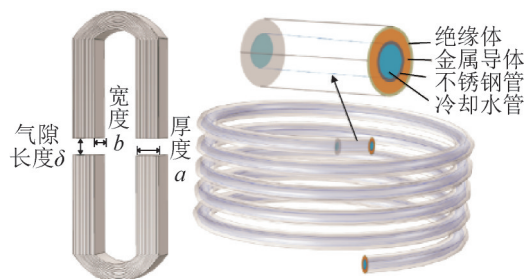


图4 铁心和绕组示意图
Fig. 4 Schematic daigram of core and winding

1) 芯式阀电抗器。芯式阀电抗器的优点是温升低,其结构与单相双绕组变压器类似,磁路通路为 1 个环形铁心,铁心周围绕制线圈,2 组线圈间采用串联方式连接。同时,带有外加阻尼装置,如图 5 所示。

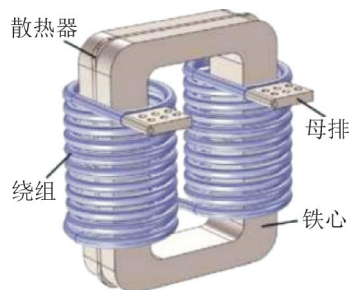


图5 芯式阀电抗器结构
Fig. 5 Structure of core valve reactor

2) 壳式阀电抗器。壳式阀电抗器不带阻尼装置,其优点是噪声小,采用多对铁心和 1 组线圈耦合,铁心和线圈的耦合方式有 2 种:铁心放射状分布于圆形绕组上和集中分布于跑道形绕组两侧,如图 6 所示。

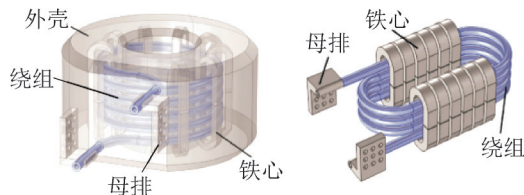


图6 壳式阀电抗器的2种结构
Fig. 6 Two types of shell-type valve reactor structures

2 故障概况

2.1 系统条件

某背靠背换流站是西北电网和华中电网联网

直流输电工程的枢纽,位于华中电网的西北端,是我国第一个背靠背直流换流站。该换流站以背靠背形式,将西北 330 kV 电压等级与华中 220 kV 电压等级联接起来,联网容量为 1 110 MW(单元 I 为 360 MW,单元 II 为 750 MW),功率双向传送,于 2005 年 6 月成功投运。

换流站交流系统 220 kV 和 330 kV 均采用单母线接线方式,直流系统额定电压为 ± 120 kV,额定功率为 360 MW,额定电流为 3 000 A。220 kV 系统通过某 220 kV 线路与华中电网相连,线路全长 500 m;330 kV 系统通过某 330 kV 线路与西北电网相连,线路全长 93 km。330 kV 交流场设备有 1 组电抗器、3 组 HP 12/24 滤波器、1 组 HP 3 滤波器、3 组并联电容器、1 回 330 kV 线路、1 回换流变支路;220 kV 交流场设备有 1 组电抗器、3 组 HP 12/24 滤波器、2 组 HP 3 滤波器、2 组并联电容器、1 回 220 kV 线路、1 回换流变支路。换流变为单相三绕组,单台容量为 143.6 MVA,每侧 3 台换流变通过外部联接线实现 Y_{y12} 接线和 Y_{d11} 接线,与换流阀晶闸管组成 12 脉动桥。330 kV 侧换流阀采用电触发晶闸管换流阀,220 kV 侧换流阀采用光触发晶闸管换流阀,两侧阀由直流母线串接平波电抗器相连。换流站主接线如图 7 所示。

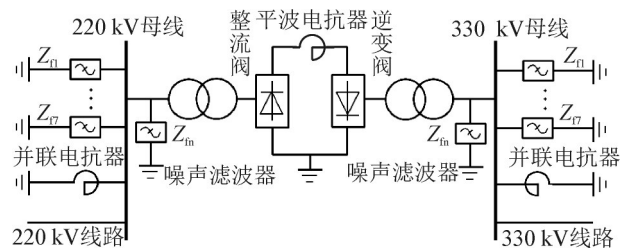


图7 换流站主接线
Fig. 7 Primary wiring of converter station

2.2 故障设备概况

1) 阀电抗器结构

换流站单元 II 交流 220 kV 侧换流阀电抗器为壳式电抗器,型号 1JNL 100 204-433,于 2009 年 12 月投运,目前已运行 16 年。由 10 对铁心、5 匝绕组线圈构成,铁心呈放射状分布于绕组线圈上,其内部结构示意图和剖面图如图 8 所示。每组铁心由上下 2 块 U 形铁心及其间的气隙垫片构成,整体通过钢扎带进行固定。绕组线圈的匝间采用交联聚乙烯绝缘,整体由聚氨酯(填充材料)浇筑成型,铁心和气隙分布如图 9 所示。

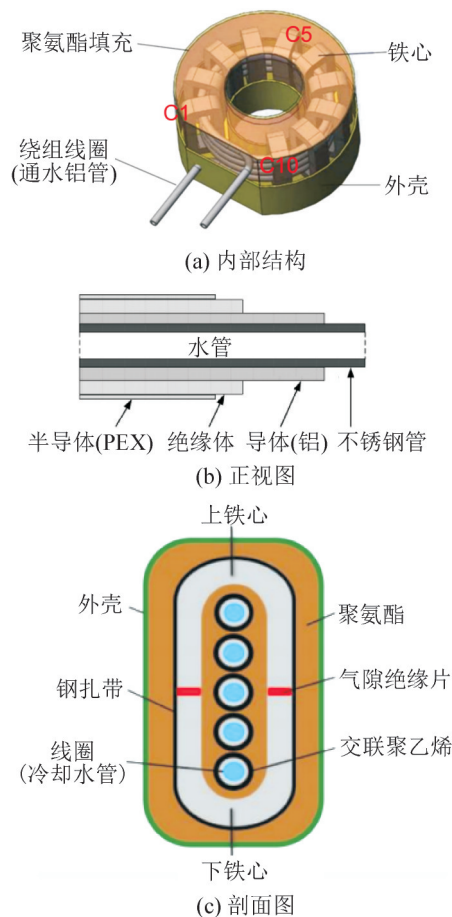


图8 阀电抗器结构示意图
Fig. 8 Structural schematic diagram of valve reactor

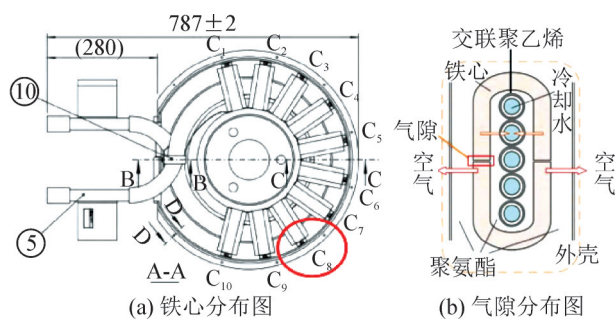


图9 阀电抗器铁心和气隙分布示意图
Fig. 9 Distribution schematic diagram of core and air gap of valve reactor

2) 运行情况

为做好设备运行监测,自 2023 年开始,换流站逐年开展交流 220 kV 侧换流阀在运 48 台阀电抗器不解引流电感值测量,测试结果均符合设计要求(0.9 mH~1.45 mH)。单台阀电抗器电感值近 3 年数据稳定,最大偏差均小于 $\pm 5\%$ 。本次发热故障涉及的 2 台阀电抗器电感值均在设计范围内,近 3 年电感值在 0.96 mH~1.09 mH 范围内,符合规程规定和设计要求。

3)大电流冲击情况

2024年以来单元Ⅱ交流220 kV侧共发生换相失败9次,其中D₅单阀流经换相失败电流5次(D₅-A₄和D₅-A₁阀电抗器同属D₅单阀),7月5日电流高达11 580.8 A(2.57 p.u.),冲击情况见表1。

表1 D₅单阀相失败统计(2024年1月~2025年7月)
Table 1 D₅ single valve phase failure statistics (Jan 2024 ~ July 2025)

换相失败时间	故障电流/A	故障电流方向
20240804	10 447.0	D桥:C相旁通对Y桥:C相旁通对
20241010	10 418.8	D桥:C相旁通对Y桥:B相旁通对
20241022	5 986.8	D桥:C相旁通对
20241215	5 586.3	D桥:C相旁通对
20250705	11 580.8	D桥:C相旁通对Y桥:B相旁通对

2.3 故障概况

2025年7月2日和12日,换流站运行人员在红外精确测温时,发现单元Ⅱ交流220 kV侧换流阀C相D₅阀A₄、A₁电抗器先后出现异常发热点。其中,6月15日至7月2日,D₅-A₄阀电抗器温度分别为:69.9℃、66.7℃、71.9℃、80.5℃、81.7℃、85.6℃、88.3℃、92.6℃、94.3℃、98.0℃、104.4℃;6月15日至7月12日,D₅-A₁温度分别为:67.5℃、66.0℃、66.4℃、71.1℃、70.9℃、71.2℃、72.5℃、71.0℃、86.5℃、93.0℃、93.0℃、94.0℃、96.0℃、98.0℃、98.0℃,7月5日换相失败(电流为11 580.8 A)时的温度为72.5℃。从红外精确测温结果来看,D₅-A₄和D₅-A₁阀电抗器温度呈平稳上升趋势,且异常发热点温度超过或接近允许温度上限值100℃。

为保证电网安全运行,及时更换了D₅-A₄和D₅-A₁发热阀电抗器,并将D₅-A₃阀电抗器更换后一并返厂对比评估。阀电抗器更换后,对D₅阀4台电抗器温度进行跟踪监测,其中,D₅-A₁阀电抗器温度在73℃~84℃间,D₅-A₄温度在67℃~75℃间,D₅-A₃温度在76℃~86℃间,D₅-A₂温度在57℃~66℃间。从跟踪测温结果来看,新更换的3台阀电抗器温度均高于原阀电抗器,判断应是单阀内电抗器电感值不同引起电压分布不均导致温度存在差异。

3 检查试验

3.1 现场检查

现场对异常发热阀电抗器开展外观检查、电阻

和电感测试。

1)D₅-A₄阀电抗器C₈铁心外壳处存在横向裂纹,与红外测温发热点位置一致,电阻值与电感值符合设计要求。裂纹位置如图10所示。

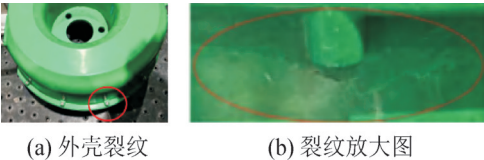


图10 D₅-A₄阀电抗器故障位置
Fig. 10 Fault location of D₅-A₄ valve reactor

2)D₅-A₁阀电抗器外壳处存在聚氨酯粉末,填充物外溢部位与红外测温发热点位置一致,电阻值与电感值符合设计要求。裂纹位置如图11所示。

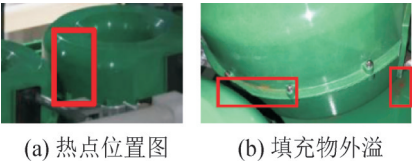


图11 D₅-A₁阀电抗器故障位置
Fig. 11 Fault location of D₅-A₁ valve reactor

3)对同一单阀内D₅-A₃阀电抗器进行电感值测量,电感值为1.13 mH,较出厂值1.04 mH增加8.65%。

3.2 解体检查

为分析发热原因,将D₅-A₄、D₅-A₁异常发热阀电抗器返厂解体检查,并将D₅-A₃阀电抗器一并返厂对比评估。

1)常规检测

解体前,开展电感值、直流电阻、电压-时间面积等关键参数检测,测试结果均未发现异常。测试结果见表2。

2)振动测试

现场对阀电抗器注入30 A工频电流,利用振动测试仪(FLUKE 802CN)在阀电抗器铁心处外壳进行振动位移和加速度测试。

测试结果显示,D₅-A₁、D₅-A₄阀电抗器发热铁心处位移和振动加速度值均高于温度正常的铁心。其中,D₅-A₁阀电抗器最大位移位于铁心C₁处、最大值为21.7 μm,最大振动加速度位于铁心C₂处、最大值为36.26 m/s²;D₅-A₄阀电抗器最大位移和振动加速度均位于铁心C₈处,最大值为18.7 μm、28.42 m/s²。D₅-A₃阀电抗器铁心数据较均衡,无明显异常。测试结果见表3。

表2 阀电抗器测试结果对比
Table 2 Comparison of valve reactor test results

试验项目	标准	D ₅ -A ₁	D ₅ -A ₄	D ₅ -A ₃
水压	1.5±0.1 MPa 无渗漏	无渗漏	无渗漏	无渗漏
流量压差/kPa	24≤ΔP≤34	27.3	正常	27.3
直流电阻/μΩ	≤450	424.9	427.7	423.2
20 A 下电感值/mH	0.90~1.45	0.97	1.11	1.13
电压-时间面积/mVs	120.0~140.0	132.0	131.5	132.0
工频耐压及局放/pC	—	7.4	3.0	6.2
等效温升/K	—	79.2	72.0	75.1

表3 阀电抗器位移和振动加速度测试结果对比
Table 3 Comparison of valve reactor displacement and vibration acceleration test results

铁心位置	位移值/μm			加速度值/(m/s ²)		
	D ₅ -A ₁	D ₅ -A ₄	D ₅ -A ₃	D ₅ -A ₁	D ₅ -A ₄	D ₅ -A ₃
C ₁	21.70	3.10	0.24	32.34	2.94	0.107 8
C ₂	11.20	3.50	0.08	36.26	3.92	0.039 2
C ₃	5.46	8.90	0.08	4.90	9.80	0.019 6
C ₆	7.21	8.10	0.16	6.86	15.68	0.029 4
C ₈	4.81	18.70	0.14	11.76	28.42	0.029 4
C ₁₀	4.01	7.50	0.08	7.546	10.78	0.019 6

3) 聚氨酯材料检查

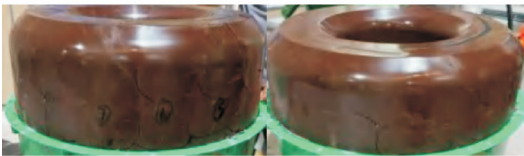
3 台阀电抗器均存在聚氨酯填充材料硬化、开裂现象,其中 D₅-A₁ 阀电抗器 C₁、C₂ 位置硬化开裂最为严重,与现场测温发热点位置一致;D₅-A₃ 阀电抗器表面存在不同程度开裂,D₅-A₄ 阀电抗器 C₈、C₉ 位置硬化最为严重。阀电抗器表面开裂如图 12 所示。



(a) D₅-A₄表面开裂



(b) D₅-A₁表面开裂



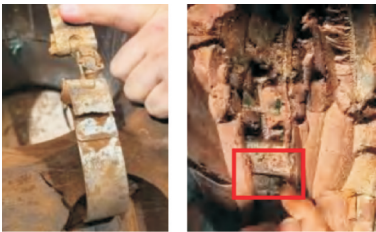
(c) D₅-A₃表面开裂

图12 阀电抗器聚氨酯表面开裂情况
Fig. 12 Polyurethane surface cracking of valve reactor

4) 铁心检查

①外观检查。从阀电抗器铁心外观检查来看,存在部分铁心上下错位、且聚拢在一起的情况。其

中,D₅-A₁ 阀电抗器 C₁、C₂ 铁心钢扎带断裂,D₅-A₄ 阀电抗器 C₉、C₁₀ 铁心钢扎带断裂。钢扎带断裂如图 13 所示。



(a) D₅-A₁断裂 (b) D₅-A₄断裂

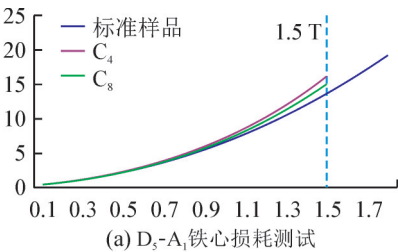
图13 钢扎带断裂
Fig. 13 Steel strapping breakage

②单只电感值测试。对 3 台阀电抗器开展 20 A 电流下单只铁心电感值测试,测试结果显示,部分铁心电感值较出厂值 0.11 mH 明显降低,应是拆解后铁心松动,气隙增大,造成电感值降低。由于 D₅-A₁ 阀电抗器 C₁、C₂ 和 D₅-A₄ 阀电抗器 C₉、C₁₀ 铁心钢扎带断裂,采用取新扎带固定后,进行二次电感值测试。测试结果见表 4。

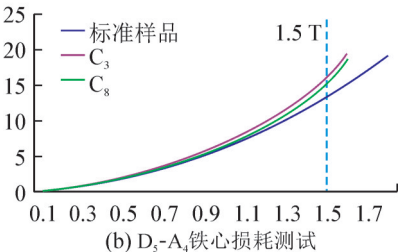
③铁心损耗测试。单只铁心损耗测试结果显示,400 Hz、磁密 1.50 T 条件下铁心损耗≤15 W/kg,均大于其设计值;个别铁心损耗测试超仪器量程,损耗值远远大于设计值;D₅-A₁、D₅-A₄ 阀电抗器发热处铁心损耗明显高于其他铁心,D₅-A₃ 阀电抗器铁心同样存在损耗超标情况。综合铁心损耗测试结果分析,认为受长期的恶劣运行环境及高温、振动、磁场、噪声等因素影响,造成铁心性能下降,损耗增加^[24]。铁心损耗测试如图 14 所示。

表4 单只铁心电感值测试结果
Table 4 Test results of single core inductance

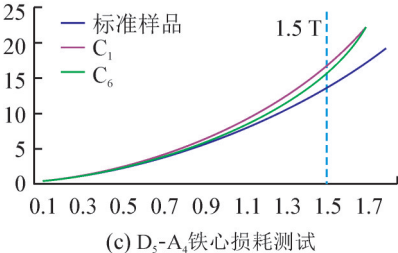
铁心位置	铁心电感值/mH		
	D ₅ -A ₁	D ₅ -A ₄	D ₅ -A ₃
C ₁	0.050	0.990	0.080
C ₁ 二次测试	0.062	—	—
C ₂	0.049	0.860	0.076
C ₂ 二次测试	0.124	—	—
C ₃	0.090	0.820	0.119
C ₄	0.102	0.930	0.116
C ₅	0.111	0.650	0.112
C ₆	0.108	0.810	0.116
C ₇	0.110	0.119	0.119
C ₈	0.113	0.101	0.114
C ₉	0.110	0.360	0.116
C ₉ 二次测试	—	0.143	—
C ₁₀	0.112	0.050	0.233
C ₁₀ 二次测试	—	0.181	—



(a) D₅-A₁铁心损耗测试



(b) D₅-A₄铁心损耗测试



(c) D₅-A₃铁心损耗测试

图14 铁心损耗测试
Fig. 14 Loss test of core

5)气隙垫片状态

从气隙垫片状态检查结果来看,3台阀电抗器气隙垫片均存在不同程度磨损,单只铁心硅钢片散片磨损如图15所示。其中,D₅-A₁阀电抗器C₁、C₂铁心气隙垫片缺失,C₃、C₅、C₁₀气隙垫片缺损面积超过50%,如图16所示;D₅-A₄阀电抗器C₉、C₁₀气隙垫片缺失,C₇、C₈气隙垫片缺损面积超过50%,如图17所示;D₅-A₃阀电抗器C₁₀铁心气隙垫片缺失,C₁、C₂、C₃、C₈、C₉气隙垫片缺损面积超过50%,如图18所示。

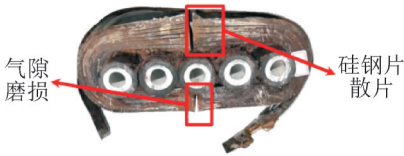


图15 单只铁心硅钢片散片
Fig. 15 Single of iron core silicon steel sheet

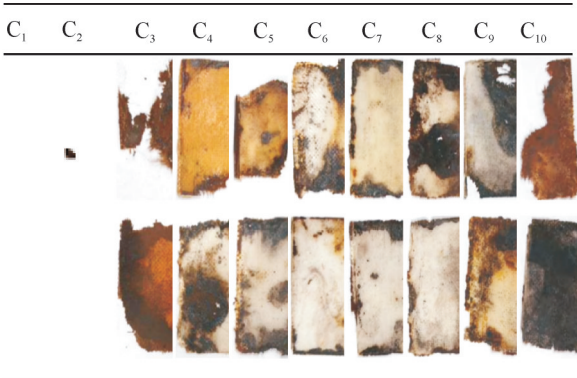


图16 D₅-A₁气隙垫片磨损
Fig. 16 Wear of D₅-A₁ air gap pad

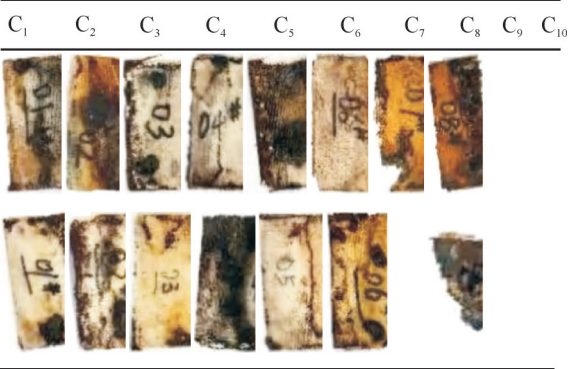


图17 D₅-A₄气隙垫片磨损
Fig. 17 Wear of D₅-A₄ air gap pad

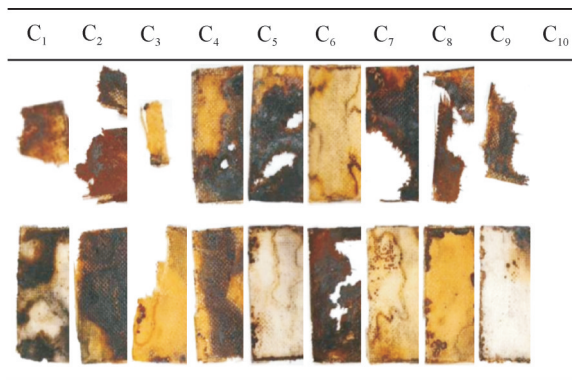


图 18 D₅-A₃气隙垫片磨损
Fig. 18 Wear of D₅-A₃ air gap pad

综合上述检查分析,3台阀电抗器存在以下问题:

①D₅-A₄、D₅-A₁异常发热阀电抗器故障痕迹明显,主要故障有:发热点位置聚氨酯填充材料硬化、开裂、失效,发热点位置铁心钢扎带变形、断裂,铁心绝缘垫片磨损严重、气隙变小或消失,铁心损耗增加。如图 19 所示。

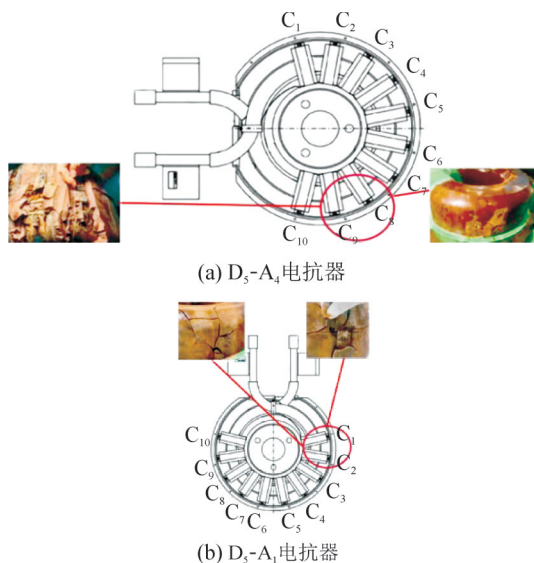


图 19 异常阀电抗器故障痕迹和位置
Fig. 19 Fault traces and position of abnormal valve reactor

②未发热的 D₅-A₃ 阀电抗器 10 对铁心相对完好,部分 U 形铁心存在上下错位、绝缘垫片磨损现象,暂未引起发热,据此判断其他在运阀电抗器也存在类似隐患。如图 20 所示。

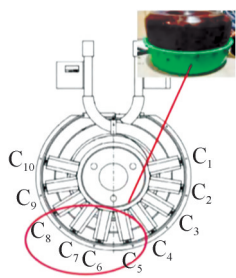


图 20 D₅-A₃ 阀电抗器故障痕迹和位置
Fig. 20 Fault traces and location of D₅-A₃ valve reactor

③D₅-A₁、D₅-A₄ 阀电抗器钢扎带断裂处振动位移及加速度明显异常,因此应将振动参数做为重要的诊断性检测项目,结合电感值、温升等参数综合评估阀电抗器运行状态和健康状况。

4 故障分析

综合分析解体检查、参数检测、铁心检查等结果,铁心气隙磨损、变小、消失是造成其损耗增大、温度升高的原因^[25]。

1) 阀电抗器制造过程中,存在气隙绝缘片粘接力不足的隐患。运行时,铁心的磁致伸缩效应会造成其尺寸发生形变,引发振动和噪声^[26-29]。受磁致伸缩效应、麦克斯韦力^[30]和洛伦兹力^[31]长期共同作用,铁心上下间气隙绝缘片发生松脱^[32]。

2) 气隙脱离后,铁心振动不断磨损绝缘垫片,气隙进一步变小直至消失,导致铁心损耗增大、温度上升^[33]。

3) 长期高温运行环境造成聚氨酯填充材料出现硬化、皴裂,其固定和缓冲性能下降,铁心振动加剧^[34],如此周期往复。叠加换相失败电动力冲击效应^[35],铁心钢扎带出现疲劳断裂。

5 防范措施

1) 设计制造阶段

①加强上下铁心气隙粘合力,结合仿真计算明确设计值,并进行拉力值测试,确保在大电流、磁热等因素影响下,不发生气隙材料上下脱离。

②提升气隙材料耐磨性,选择耐磨性强的绝缘高分子材料,适度增大气隙、减小电感值,整体降低铁心损耗。

③优化紧固工艺、连接方式,提升铁心钢扎带整体强度,确保长期运行中不发生松动、断裂。

④提升聚氨酯等填充材料耐热性,阀电抗器正常温升下,长期运行不发生开裂、失效^[36]。

⑤建议改进阀电抗器生产工艺,重点从增加铁心气隙粘合力、优化铁心对数、调整钢扎带连接方式等方面进行改进。

2) 日常运行阶段

①加强运行期间封闭式阀电抗器专业化巡视,重点对温度、外观、振动、声音进行检查,分析是否存在异常。

②重点关注温度异常阀电抗器,运行期间对于相较同一阀层内其它阀电抗器温差大于 10℃,且表面温度不高于 100℃的阀电抗器,增加红外精确测温频次,重点跟踪监视,结合停电进行全面检查诊断。

③做好温度超限阀电抗器状态研判,运行期间对表面温度高于 100℃的阀电抗器,应全面分析、综合研判,及时停电更换。

3) 检修维护阶段

①科学合理制定检修更换策略,结合本次阀电抗器发热故障,对电感值较出厂值偏差超过 15%,且运行温度超过 75℃的阀电抗器及时更换。

②做好阀电抗器状态评估,建议运行 15 年及以上的阀电抗器,每年开展 1 次全检,做好电感值、位移值和振动加速度值等参数检测,运用大数据技术分析和历史数据比对,及时发现异常和隐患。

③做好异常阀电抗器解体分析,对可能存在铁心异常的阀电抗器,建议解体检查,结合运行中的监测数据,全面评估在运阀电抗器健康状态。

6 结语

本文基于典型案例,通过参数测量、振动测试、损耗测试等技术手段,分析了铁心气隙对阀电抗器发热性能的影响,得出以下结论:

1) 长期运行中,受电磁、热稳定、动稳定、噪声及环境条件等因素影响,磁致伸缩会造成阀电抗器剧烈振动,导致铁心上下间气隙绝缘片松脱。

2) 气隙脱离后,剧烈振动加速绝缘片磨损,气隙进一步变小直至消失,引起铁心损耗增大,阀电抗器内部温度升高。

3) 阀电抗器壳体内的聚氨酯弹性体填充材料在长期高温运行环境下,会出现硬化、皴裂、破裂等现象,弹性降低,固定和缓冲性能下降,造成铁心振动进一步加剧。若叠加换相失败电力冲击效应,将会造成铁心钢扎带疲劳、断裂,进一步加剧阀电抗器发热。如此周期重复,直至阀电抗器故障保护动作从系统切除。

参考文献

- [1] 高压直流输电换流阀用饱和电抗器:NB/T 11075—2023[S]. 2023.
Saturable reactor for high voltage direct current (HVDC) converter valve:NB/T 11075—2023[S]. 2023.
- [2] 张宏伟. 振荡过电压对双极中性线滤波器电抗器绝缘性能影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(5): 74-84.
ZHANG Hongwei. Analysis of influence of oscillatory over-voltage on insulation performance of bipolar neutral line filter reactors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(5): 74-84.
- [3] 刘云鹏, 来庭煜, 刘嘉硕, 等. 特高压直流换流阀饱和电抗器振动声纹特性与松动程度声纹检测方法[J]. 电工技

术学报, 2023, 38(5): 1375-1389.

- LIU Yunpeng, LAI Tingyu, LIU Jiashuo, et al. Vibration voiceprint characteristics and looseness detection method of UHVDC converter valve saturable reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1375-1389.
- [4] 刘泽洪, 郭贤珊. 高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术与工程应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3604-3613.
LIU Zehong, GUO Xianshan. High-voltage large-capacity VSC valve reliability enhancement[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3604-3613.
- [5] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [6] YANG Wei, CHEN WeiJiang, ZHOU Yuan, et al. Heat dissipation characteristics of anode saturable reactors with high thermal conductivity epoxy resin used for ultra-high-voltage direct current converter valves[J]. High Voltage, 2020(5). 598-604.
- [7] CAO J, DAVIDSON C, MOULSON S. Dynamic modelling of saturable reactor for HVDC applications[J]. IET Science Measurement & Technology, 2007, 1(3): 138-144.
- [8] 左宇翔. 高压直流输电换流阀用饱和电抗器铁芯损耗计算与温度分布优化方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [9] LI Xiangyu, ZHA Junwei, WANG Sijiao, et al. Effect of high-thermal conductivity epoxy resin on heat dissipation performance of saturated reactor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3898-3905.
- [10] 刘堃, 李凯, 范彩云, 等. 换流阀饱和电抗器发热机理与燃烧仿真分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 18-25.
LIU Kun, LI Kai, FAN Caiyun, et al. Heating mechanism and combustion simulation analysis of saturated reactor in converter valve[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 18-25.
- [11] MICHAEL FARADAY. Experimental researches in electricity[M]. Journal of the Franklin Institute, 1852.
- [12] WANG Yaqi, GAO Chong, LI Lin, et al. Study for influence of harmonic magnetic fields on vibration properties of core of anode saturable reactor in HVDC converter valve system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 24050-24059.
- [13] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[J]. Nature, 1873, 7(182): 478-480.
- [14] YUAN Jiaxin, ZHANG Zhewei, ZHOU Hang, et al. Optimized design method of permanent magnets saturated core fault current limiters for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 721-730.
- [15] 毛颖科, 张天枫, 朱正一, 等. ± 500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(1):

- 128-135.
- MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):128-135.
- [16] CAO Junzheng, FENG Ji, JIE Liu, et al. Valve saturable reactor Iron losses of ultrahigh-voltage direct current converter[J]. IET Science Measurement & Technology, 2016, 10(2):77-83.
- [17] STEINMETZ C P. On the law of hysteresis[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(2):197-221.
- [18] 钱锋, 张蔚, 蒲云豪, 等. 纳米晶铁心变压器空载损耗的研究[J]. 变压器, 2024, 61(1):9-13.
- QIAN Feng, ZHANG Wei, PU Yunhao, et al. Research on no-load loss of nanocrystalline iron core transformer [J]. Transformer, 2024, 61(1):9-13.
- [19] 张娟娟, 盛财旺, 巩少岩, 等. 巴西美丽山 II 期直流工程用饱和电抗器铁心损耗优化与特性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(8):3179-3185.
- ZHANG Juanjuan, SHENG Caiwang, GONG Shaoyan, et al. Core loss optimization and characteristics analysis of saturable reactors in Brazil Belo mountain UHVDC phase II transmission project[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3179-3185.
- [20] 张耀月, 张宏伟, 宋燕. 基于电测法的大型绕组类设备 L/R 同步测试研究[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(6):182-186.
- ZHANG Yaoyue, ZHANG Hongwei, SONG Yan. L/R synchronous test technology for large windings based on electrometric methods[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(6):182-186.
- [21] 袁佳歆, 莫作权, 李旭哲, 等. 换流阀用阳极饱和电抗器研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(12):4829-4841.
- YUAN Jiaxin, MO Zuoquan, LI Xuzhe, et al. Review of anode saturable reactor for converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12):4829-4841.
- [22] 刘杰, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 特高压直流输电换流阀冲击暂态均压措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):1828-1835.
- LIU Jie, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Research of the voltage balancing scheme of UHVDC converter valve in impulse transient[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1828-1835.
- [23] 刘磊, 汪得利, 黄华, 等. ± 1100 kV/5 455 A 特高压直流换流阀饱和电抗器散热设计与研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7):23-28.
- LIU Lei, WANG Deli, HUANG Hua, et al. Design and research on heat dissipation of saturable reactor in ± 1100 kV/5 455 A UHVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7):23-28.
- [24] ZHANG Pengning, LIN Li. Vibration of saturable reactor core used in HVDC converter valve system[J]. Journal of Engineering, 2017(14):2584-2590.
- [25] WANG Jiajun, ZHANG Changgeng, LI Yongjian, et al. Modeling of air gap magnetic characteristics of anode saturable reactors under impulse current excitation[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). [S.l.]:IEEE, 2019:1-5.
- [26] ANDERSON P I, MOSES A J, STANBURY H J. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented Silicon steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(8):3467-3476.
- [27] 袁发庭, 姬睿氢, 吕凯, 等. 考虑硅钢片磁致伸缩特性的干式铁芯电抗器铁芯振动分析及优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(4):1486-1494.
- YUAN Fating, JI Ruiqing, LYU Kai, et al. Vibration analysis and optimization of dry-type core reactor with Silicon steel sheet magnetostrictive model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4):1486-1494.
- [28] 张鹏宁, 李琳, 纪锋, 等. HVDC 阳极饱和电抗器阻尼弹性体降振降噪试验研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12):3839-3845.
- ZHANG Pengning, LI Lin, JI Feng, et al. Test study on reduction of vibration and noise to damping elastomer in HVDC anode saturable reactor[J]. Power System Technology, 2017, 41(12):3839-3845.
- [29] KITAGAWA W, ISHIHARA Y, TODAKA T, et al. Analysis of structural deformation and vibration of a transformer core by using magnetic property of magnetostriction[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 172(1):19-26.
- [30] MAXWELL J C. A dynamical theory of the electromagnetic field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865(155):459-512.
- [31] LORENTZ H A. La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants[J]. Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles, 1892(25):363-552.
- [32] ROSSI M, LE BESNERAIS J. Vibration reduction of inductors under magnetostrictive and maxwell forces excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(12):1-6.
- [33] 王振, 张艳丽, 龚园, 等. 机械应力下无取向电工钢片磁致伸缩特性研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21):5682-5690.
- WANG Zhen, ZHANG Yanli, GONG Yuan, et al. Study on magnetostrictive properties of non-oriented electrical steel sheet under mechanical stress[J]. Transactions of China

作者简介:

杨伟涛(1984—),男,工程师,通信作者,主要研究方向为柔性直流输电方面的控制保护策略及工程实施运维。E-mail: 13683806301@163.com。

张尧(1984—),男,正高级工程师,主要研究方向为柔性直流输配电。E-mail: yao-zhang@sac-china.com。

郭晓(1982—),男,高级工程师,主要研究方向为柔性直流输配电。E-mail: xiao-guo@sac-china.com。

(上接第89页)

- Electrotechnical Society, 2023, 38(21):5682-5690.
- [34]李旭哲. 阳极饱和电抗器的振动噪声特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [35]王家俊. 特高压换流阀阳极饱和电抗器铁心损耗研究[D]. 天津:河北工业大学,2021.
- [36]张长庚,王家俊,李永建,等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁芯损耗模拟[J]. 高电压技术,2021, 47(6): 2158-2168.

ZHANG Changgeng, WANG Jiajun, LI Yongjian, et al. Dynamic core loss simulation of the anode saturable reactor of UHVDC converter valves[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6):2158-2168.

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。