

直流支撑电容器交直流叠加试验回路搭建及参数选取探讨

邓光昭, 黄葵, 王文宝

(嘉善赛晶电容器有限公司, 浙江 嘉善 314100)

摘要: 对于柔直、轨道交通等领域用的直流支撑电容器而言, 交直流叠加的试验验证更符合实际工况所需。电容制造厂家如何利用现有试验设备, 搭建交直流叠加试验所需的试验平台, 重点在于对交、直流电源的隔离保护。本文在介绍交流、直流独立试验回路及交直流叠加试验回路原理的基础上, 明确了隔直电容和隔交电感、放电电阻的参数选择原则, 为各电容厂家利用厂内现有设备, 尽最大可能降低设备成本的前提下, 提供一种直流支撑电容交直流叠加试验平台搭建的思路和方法。
关键词: 直流支撑电容; 隔直电容; 隔交电感; 放电电阻; 耐久试验; 破坏试验

Discussion on Construction and Parameter Selection of AC/DC Superimposed Test Circuit for DC-link Capacitor

DENG Guangzhao, HUANG Kui, WANG Wenbao

(Jiashan Sunking Power Electronic Capacitor Co., Ltd., Zehjiang Jiashan 314100, China)

Abstract: For DC-link capacitor used in such fields as flexible and rail transit, the test verification of AC/DC superposition is more in line with the need of actual condition. The focus of how the capacitor manufacturers can utilize existing testing equipment to set up a testing platform for AC/DC superimposed testing is in the isolation protection of AC and DC power sources. On the basis of introducing the principles of AC and DC independent test circuits and AC/DC superimposed test circuits, the parameter selection principles of DC isolation capacitors, AC isolation inductors and discharge resistors are clearly defined. It provides a train of thought and method for setting up a DC-link capacitor AC/DC superimposed test platform for capacitor manufacturers to utilize existing equipment in the factory and minimize equipment costs.

Keywords: DC-link capacitor; blocking capacitor; isolate alternating inductance; discharge resistance; endurance test between terminals; destruction test

0 引言

近几年, 随着我国柔性直流输电系统、轨道交通等能源系统的发展, 直流支撑电容器(以下简称“电容器”)在我国的应用愈来愈广泛^[1-8], 该类电容器的使用工况中, 往往伴随着大量的谐波电流, 即电容器处在交直流叠加的运行工况下^[9-12]。

电容器使用的金属化膜在交流和直流下具有完全不同的绝缘强度, 为探究电容器实际运行时, 介质薄膜的绝缘强度, 就必须对电容器开展交直流

叠加试验验证^[13-17]。目前该类干式直流电容采用的标准为 IEC 61071 和 GB/T 17702, 标准中对于耐久、破坏^[18-19]等关键试验的考核要求均为纯直流下进行或者交、直流分步进行。但相对而言, 交直流叠加同时进行试验更符合实际工况要求^[20], 更能考验电容器的实际运行耐受水平。

以柔直用干式直流支撑电容器为例, 目前其常规电压等级为 2.8 kV, 容量达到 9 mF 甚至更高。若采用电力电子技术, 以 IGBT 整流、逆变并配合高压绝缘等级的变压器的形成交直流电源, 整套电源设

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

备的售价超过 300 万元,成本太高,对于电容器制造厂家而言经济压力过大,很难实现。本文利用常用的试验设备,对交直流叠加试验回路的搭建及设备参数选取提供一些思路,在增加少量设备成本的前提下,满足上述直流支撑电容交直流叠加试验的输出要求,实现成本可控、试验稳定可靠的目的。

1 独立的交流、直流试验回路搭建原则

1.1 交流试验回路

干式直流电容器的电容量较大(一般为 mF 级),试验中往往使用工频试验电源,电压低而电流大,因此交流回路中需配备电抗器用以保证整体电路的功率因数,降低变压器侧的有功电流,避免变压器容量过大。试验回路见图 1。

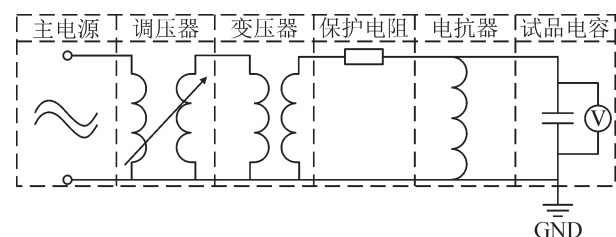


图1 交流试验回路
Fig. 1 AC test circuit

干式直流电容器的交流试验回路主要由主电源、调压器、变压器、保护电阻、电抗器、试品电容器及测量设备组成。

1.2 直流试验回路

直流试验回路搭建过程中,需考虑保护电阻阻值的选取,依据 RC 电路的电容充电计算公式(式 1),过大的电阻会降低电容器的升压速度,但保护电阻过小将无法有效限值短路电流。试验回路见图 2。

$$U_i = U_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

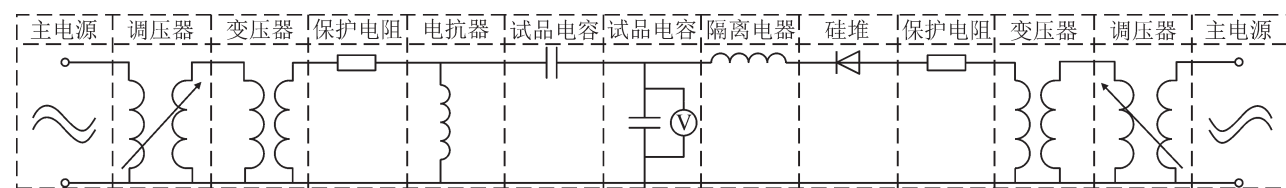


图2 直流试验回路
Fig. 2 DC test circuit

2.2 隔直电容的选取

隔直电容器的加入可以阻隔直流电压进入交流回路,但同时也会降低试品电容器两端的交流电压,交流回路中的电压往往由各部分的阻抗所决定。容抗可以根据式(2)进行计算,由此可以推算,隔直电容器两边的电压见式(3)

$$X_c = 1/(\omega C) \quad (2)$$

式中: U_i 为电容电压, V; U_0 为电源电压, V; R_z 为保护电阻, Ω ; C 为试品电容, F。

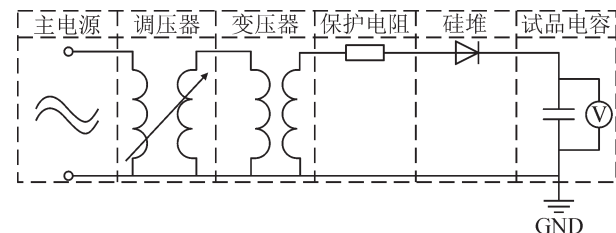


图2 直流试验回路
Fig. 2 DC test circuit

直流试验回路主要由主电源、调压器、变压器、保护电阻、硅堆、试品电容器及测量设备组成。

2 交直流叠加试验回路

2.1 回路搭建

交直流试验回路是在交流试验回路和直流试验回路的基础上,进行组合和优化。

由于在干式直流电容器进行试验时,交流分量仅占总电压的 10% 左右,直流端设备电压接近交流分段的 10 倍^[21-22],以直流端视角来看,交流回路中的电抗器、交流变压器副边电阻极小,电容与 2 个等效的低值电阻并联,极易造成直流设备短路乃至烧毁,需在交流端输出尾端增加隔直电容用以阻隔直流电压直接施加于交流设备上。

以交流端视角来看,试品电容器经硅堆与直流变压器副边并联,此时直流变压器副边两端有两部分电压,一部分为源于直流变压器原边的感应电压,一部分为交流端输出电压的负半波;为阻碍交流端负半波进入直流回路,需在直流端输出尾端增加隔交电感。交直流叠加试验回路见图 3。

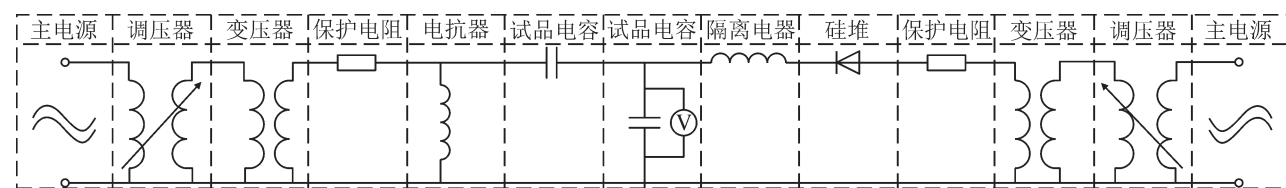


图3 交直流试验回路
Fig. 3 AC/DC test circuit

$$U_i = U_0 \left(\frac{\frac{1}{\omega C_i}}{\frac{1}{\omega C_i} + \frac{1}{\omega C_g}} \right) = \frac{C_g}{C_i + C_g} U_0 \quad (3)$$

式中: C_i 为试品电容, F; C_g 为隔直电容, F; ω 为角频率 ($2\pi f$)。

由式(3)可知,隔直电容越大,试品两端的电压越大,即隔直电容器分压越少。除此之外,应注意

电抗器的匹配,在增加隔直电容器后,总电容为试品电容与隔直电容的串联,公式为

$$C_z = \frac{C_g C_t}{C_t + C_g} \quad (4)$$

应根据总电容选择电抗器的电感值,避免出现失谐的情况。

2.3 隔交电感的选取

隔交电感的主要作用是增加直流端的阻抗,从而降低交流负半波在直流回路中产生的电流,因此电感的选择取决于直流变压器副边的电感以及直流侧的可耐受电流。直流端中由交流回路产生的电流为

$$I = \frac{U_0}{\omega L_G + \omega L_{x1} + R_x} \quad (5)$$

式中: L_G 为隔交电感, H; L_{x1} 为直流变压器副边电感, H; R_x 为直流保护电阻, Ω 。

由式 5 可知,在变压器副边电感足够大时,可以不使用隔交电感器。

3 放电回路

电容的直流试验均需考虑试验完成后的放电回路,干式直流电容器的电容往往为 mF 级,储存的能量达几十甚至几百千焦,不匹配的放电电路将影响试验人员及设备的安全。

相比于直流耐压试验,交直流叠加试验中增加了隔直电容器,隔直电容器在试验过程中具有与试品电容器相同的电压,且为了确保试品电容器的交流电压值,隔直电容器往往使用相比试品电容器更大的电容,储存的能量也就更多。

为防止电容放电过程的涌流流入电源侧,在图 3 的基础上,增加 S_1 、 S_4 两个回路开关,在执行放电操作前,分断电源侧。由于隔直电容与试品电容的电压相等,高压端与低压端均为等电位,因此增加开关 S_2 ,将隔直电容器与试品电容器调节为并联状态,使用开关 S_3 经电阻对电容器执行放电,回路见图 4。

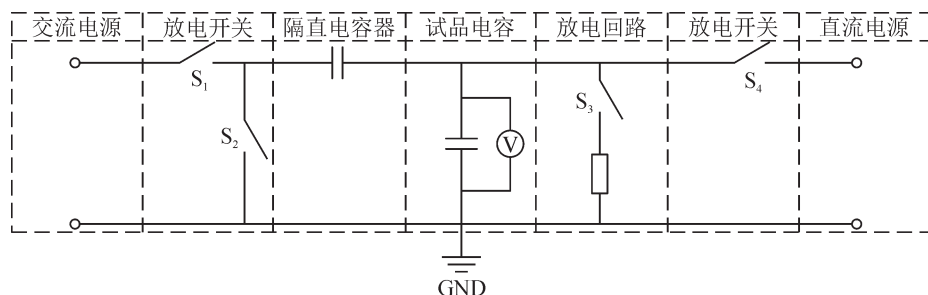


图 4 放电回路
Fig. 4 Discharge circuit

放电电阻应选用高功率电阻,避免电容放电过程中的瞬时电流造成电阻损坏。

4 试验验证

为有效验证上述回路搭建方法与参数选取的有效性,在此以规格为 2.8 kV/8 mF 的直流支撑电容作为试品,搭建交直流叠加试验回路。

4.1 隔直电容设计

根据 2.2 章节所述,隔直电容的容值应尽可能大,并且还需要考虑电抗器的匹配能力。在本次试验回路搭建中,选取 4 台型号规格为 2.8 kV/9 mF 的直流支撑电容作为隔直电容使用,4 台电容的电气联接为 2 串 2 并,由此可得隔直电容的总电容值仍为 9 mF。从图 3 可知,在直流回路中,隔直电容与试品电容为并联关系,所以每台 2.8 kV/9 mF 的电容在进行交直流叠加试验时,其极间承担的直流电压仅为试品电容的一半。而在交流回路中,隔直

电容与试品为串联关系,但隔直电容本身为 2 并联,所以每台隔直电容通过的电流也仅为试品电容的一半。如此就可以确保在试验过程中,每台隔直电容的运行条件仅为试品电容的一半,可保证其安全、稳定可靠运行。

4.2 隔交电感

利用厂内现有库存,选择一只额定电压为 $11/\sqrt{3}$ kV,单相配套容量为 4 Mvar 的干式放电线圈作为隔交电感。根据式(5)可知,当试品要求的交流电压 U_0 为 280 V 时,通过直流回路中的交流电流值大约为 35 μ A 左右,远小于直流侧的可耐受电流 1.1 A。

4.3 小结

本次试验回路利用 2 串 2 并共计 4 台 2.8 kV/9 mF 产品作为隔直电容,以额定电压为 $11/\sqrt{3}$ kV,单相配套容量为 4 Mvar 的干式放电线圈作为隔交电感,搭建交直流试验平台回路。回路搭配 4 只 2 k Ω 的

放电电阻对隔直电容、试品电容同时放电。

该回路针对 2.8 kV/8 mF 等产品进行交直流叠加试验时长初略估计超过 3 000 h, 试验回路运行正常、安全可靠, 隔直电容为出现电容损失, 隔交电感亦无异常。并且该回路使用的隔直电容、隔交电感来自于厂内库存, 有效降低了柔直用直流支撑电容研发试验的设备成本^[23]。

由此可见, 该试验回路的搭建是安全、可靠且低成本的, 并且是可以有效持续、长期运行的。

5 结语

通过对直流支撑电容器交直流试验回路的研究, 得出以下结论:

- 1) 工频交流侧必须配备电抗器;
- 2) 交流侧需配备隔直电容;
- 3) 直流侧需配备隔交电感;
- 4) 放电回路中需配备对应的回路开关, 在放电之前将交、直流电源隔离。

参考文献

- [1] 李宇鹏, 付亚旭, 郭海涛, 等. 特高压直流隔离开关载流技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 1-8.
LI Yupeng, FU Yaxu, GUO Haitao, et al. Research on current carrying technology of UHV DC disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 1-8.
- [2] 郑眉, 陈骞, 宋远见, 等. 多电压等级直流电网的仿真技术与协调控制策略研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 7-13.
ZHENG Mei, CHEN Qian, SONG Yuanjian, et al. Research on simulation technology and coordinated control strategy of multi-voltage DC grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 7-13.
- [3] 刘云波, 胡书举, 李丰林, 等. 海上风电直流汇集 DC-DC 变换器拓扑与控制策略分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 77-81.
LIU Yunbo, HU Shuju, LI Fenglin, et al. Topology and control strategy analysis of DC/DC converters for offshore wind power DC collection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 77-81.
- [4] 孙志鹏, 魏建, 孙志龙, 等. 直流接地极对附近埋地金属管道的电腐蚀研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 57-61.
SUN Zhipeng, WEI Jian, SUN Zhilong, et al. Research on corrosion of buried metal pipeline caused by DC grounding electrode[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 57-61.
- [5] 刘海金, 靳鹤志, 王金浩, 等. 含高比例分布式电源的直流配电系统故障恢复过电压机理及其抑制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 45-52.
LIU Haijin, JIN Hezhi, WANG Jinhao, et al. Fault recovery overvoltage mechanism and its suppression in DC distribution system with high-proportion DG penetration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 45-52.
- [6] 李颖, 鲍一鸣, 田雨, 等. 基于 VSG 的低压柔性直流系统连接串联补偿电网的稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 51-59.
LI Ying, BAO Yiming, TIAN Yu, et al. Stability analysis of VSG-based low voltage flexible DC system connected to series compensation grid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 51-59.
- [7] 龚梓威, 王海风, 陈珏, 等. 直流电压时间尺度下光伏并网控制系统稳定性分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 2-13.
GONG Ziwei, WANG Haifeng, CHEN Jue, et al. Stability analysis of grid-connected photovoltaic generation control system under DC voltage timescale[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 2-13.
- [8] 张旭乐, 杨向阳, 张浩哲, 等. 基于站用电供能的直流电压互感器冗余供电及抗干扰技术研究[J]. 变压器, 2023, 60(6): 29-34.
ZHANG Xule, YANG Xiangyang, ZHANG Haozhe, et al. Research on edundant power supply and anti-interference technology of DC voltage transformer based on station power supply[J]. Transformer, 2023, 60(6): 29-34.
- [9] 王佳昕, 李化, 王哲豪, 等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 29-36.
WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 29-36.
- [10] 方田, 李化, 黄想, 等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 142-148.
FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under ac superimposed harmonic voltage [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.
- [11] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [12] 柴斌, 史磊, 韦鹏, 等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 211-216.
CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 211-216.

- [13] 国江, 马跃, 林浩, 等. 特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 42-49.
GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 42-49.
- [14] 李宇鹏, 付亚旭, 郭海涛, 等. 特高压直流隔离开关载流技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 1-8.
LI Yupeng, FU Yaxu, GUO Haitao, et al. Research on current carrying technology of UHVDC disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 1-8.
- [15] 郑眉, 陈骞, 宋远见, 等. 多电压等级直流电网的仿真技术与协调控制策略研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 7-13.
ZHENG Mei, CHEN Qian, SONG Yuanjian, et al. Research on simulation technology and coordinated control strategy of multi-voltage DC grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 7-13.
- [16] 刘云波, 胡书举, 李丰林, 等. 海上风电直流汇集DC-DC变换器拓扑与控制策略分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 77-81.
LIU Yunbo, HU Shuju, LI Fenglin, et al. Topology and control strategy analysis of DC/DC converters for offshore wind power DC collection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 77-81.
- [17] 孙志鹏, 魏建, 孙志龙, 等. 直流接地极对附近埋地金属管道的电腐蚀研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 57-61.
SUN Zhipeng, WEI Jian, SUN Zhilong, et al. Research on corrosion of buried metal pipeline caused by DC grounding electrode[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 57-61.
- [18] 刘海金, 靳鹤志, 王金浩, 等. 含高比例分布式电源的直流配电系统故障恢复过电压机理及其抑制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 45-52.
LIU Haijin, JIN Hezhi, WANG Jinhao, et al. Fault recovery overvoltage mechanism and its suppression in DC distribution system with high-proportion DG penetration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 45-52.
- [19] 李颖, 鲍一鸣, 田雨, 等. 基于VSG的低压柔性直流系统连接串联补偿电网的稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 51-59.
LI Ying, BAO Yiming, TIAN Yu, et al. Stability analysis of VSG-based low voltage flexible DC system connected to series compensation grid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 51-59.
- [20] 龚梓威, 王海风, 陈珏, 等. 直流电压时间尺度下光伏并网控制系统稳定性分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 2-13.
GONG Ziwei, WANG Haifeng, CHEN Jue, et al. Stability analysis of grid-connected photovoltaic generation control system under DC voltage timescale[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 2-13.
- [21] 张旭乐, 杨向阳, 张浩哲, 等. 基于站用电供电的直流电压互感器冗余供电及抗干扰技术研究[J]. 变压器, 2023, 60(6): 29-34.
ZHANG Xule, YANG Xiangyang, ZHANG Haozhe, et al. Research on edundant power supply and anti-interference technology of DC voltage transformer based on station power supply[J]. Transformer, 2023, 60(6): 29-34.
- [22] 王佳昕, 李化, 王哲豪, 等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 29-36.
WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 29-36.
- [23] 方田, 李化, 黄想, 等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 142-148.
FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.
- [24] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [25] 柴斌, 史磊, 韦鹏, 等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 211-216.
CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 211-216.
- [26] 国江, 马跃, 林浩, 等. 特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 42-49.
GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 42-49.

作者简介:

邓光昭(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器、电力电子电容器的研发及制造工作。

黄葵(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事电力电容器、电力电子电容器的研发及制造工作。

王文宝(1994—), 男, 助理工程师, 主要从事电力电子电容器的研发及制造工作。