

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.06.021

## 多电缆出线精细化建模及复杂工况接地电流计算

李吉生<sup>1</sup>, 顾小龙<sup>2</sup>, 余银辉<sup>3</sup>, 梁霄<sup>1</sup>, 郑智慧<sup>2</sup>, 邓冶强<sup>2</sup>, 王羽<sup>2</sup>

(1. 大亚湾核电运营管理有限公司, 广东 深圳 518124; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072;

3. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 核电站中压厂用电系统包含各种型式电缆, 数量高达数百根, 涉及范围广, 运行环境复杂, 系统发生单相接地故障概率高, 大量电缆的投入会使得系统电容电流超过标准, 引起厂用电系统绝缘故障甚至是弧光接地。核电厂中压厂用电系统运行工况高达数百种, 实际中并不能针对所有工况进行接地电流试验测试。首先, 文中根据国内某核电站厂用电系统接线图, 搭建电缆数量超过600条的多电缆出线的精细化接地电流仿真计算模型, 电缆电容仿真计算值与实测值的误差最大为5.5%, 基于此模型计算中压厂用电系统数百种工况下的接地电流以及系统过电压, 得到接地电流超过标准的运行工况, 可用于指导实际核电站运行工作。其次, 对接地电流超标的运行工况进行真型试验测量, 并和仿真计算结果进行对比验证, 其中金属性接地最大误差不超过4%, 高阻接地最大误差不超过12%。最后, 对接地电流超标的运行工况提出抑制措施, 为核电站厂用电系统的电缆维护与安全运行提供参考。

**关键词:** 核电站; 厂用电系统; 接地电流; 电缆绝缘故障; 真型试验

## Fine Modeling of Multi-cable Outgoing Lines and Calculation of Grounding Current Under Complex Working Conditions

LI Jisheng<sup>1</sup>, GU Xiaolong<sup>2</sup>, YU Yinwei<sup>3</sup>, LIANG Xiao<sup>1</sup>, ZHENG Zhihui<sup>2</sup>,  
DENG Yeqiang<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>

(1. Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518124, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** The medium voltage power supply system of nuclear power plant contains various types of cables, with a number of up to hundreds of pieces. It involves a wide range and complex operating environment as well as high single earthing fault probability of the system. The excessive application of a large number of cables will make the capacitive current of the system exceed the standard, causing insulation fault or even arc grounding of the plant power system. There are hundreds of operating conditions of medium voltage auxiliary power system in nuclear power plant. It is in fact impossible to perform grounding current test for all operating conditions. According to the wiring diagram of auxiliary power system in a nuclear power plant in China, a refined grounding current simulation calculation model for multi-cable outgoing with more than 600 pieces of cables is set up. The maximum error between the simulated and measured values of capacitance of cable is 5.5%. Based on this model, the grounding current and system overvoltage under hundreds of operating conditions of medium voltage auxiliary power system are calculated, and the operating conditions of grounding current exceeding the standard are obtained, which can be used to guide the actual operation of nuclear power plant. Then, the real test measurement is performed on the operating conditions of the grounding current exceeding the standard, compared and verified with the simulation results. The maximum error of metal grounding is not more than 4%, and the maximum error of high resistance grounding is not more than 12%. Finally,

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-02-27

基金项目: 湖北省自然科学基金项目任务书(联合基金项目)(2024AFD220)。

Project Supported by Hubei Provincial Natural Science Foundation Project(Joint Fund Project)(2024AFD220).

the suppression measures for the operation conditions of the grounding current exceeding the standard is proposed, which provides a reference for the maintenance and safe operation of cable of the plant power system in the nuclear power plant.

**Key words:** nuclear power plant; plant power system; grounding current; cable insulation failure; real measurement test

## 0 引言

随着现代经济和科技的迅猛发展,能源需求逐渐增加,同时面临的能源危机也日益凸显。为实现“碳达峰”、“碳中和”战略目标,核电站作为一种重要的能源供应方式,其作用愈发明显,核电站的安全运行至关重要<sup>[1-6]</sup>。核电站厂用电系统为核电站的自身设备、系统和机器供电,确保核电站安全可靠和连续运行,因此核电站厂用电系统的安全问题更是不可忽视<sup>[7-8]</sup>。

核电站厂用电系统电气结构复杂,设备种类繁多,敷设了各类电力、动力和仪控电缆,涉及范围广,运行环境复杂<sup>[9-11]</sup>。同时,由于大量中压电缆的存在,机组运行过程中6.6 kV中性点不接地系统电容电流偏高,若系统发生单相接地故障,会因接地故障电流过大不能可靠熄灭而造成系统过电压,威胁设备的绝缘安全,并可能进一步发展为相间或多相接地故障,扩大事故范围<sup>[12-18]</sup>。文[19]针对配电网单相稳定接地及弧光接地故障进行数值计算,研究了不同故障类型和消弧措施下的故障特性。文[20-21]基于汤逊原理的电弧模型模拟了系统弧光接地故障,但文章缺乏试验验证且不能确定不同故障介质与模型参数的对应关系。文[22]虽然针对配电网线路进行了弧光高阻故障试验,但是其试验方案不能真实模拟电缆绝缘损坏而引发的弧光接地故障。

核电厂中压厂用电系统运行工况高达数百种,实际中并不能针对所有工况进行接地电流试验测试。为真实准确地研究核电站中压厂用电系统单相接地故障(包括因电缆绝缘损坏引起的接地故障),文中根据国内某核电站厂用电系统接线图,搭建电缆数量超过600条的多电缆出线的精细化接地电流仿真计算模型,计算数百种工况下的接地电流以及系统过电压,得到接地电流超过标准的运行工况。同时,建立6.6 kV系统真型试验平台,通过试验平台灵活快速地模拟核电站厂用电系统各种单相接地故障,对接地电流超标的运行工况进行真型试验测量,并和仿真计算结果进行对比验证,验证消弧线圈接地方式的有效性。此外,文中通过绝缘剥皮形成孔洞来模拟中压电缆绝缘损坏后的

单相接地故障,使试验结论具有更大的工程参考价值。

## 1 核电站厂用电系统单相接地故障分析

### 1.1 核电站厂用电系统介绍

核电站厂用电系统是核电厂运行、反应堆关停和事故工况下所需的电源系统。为对全厂中压系统电容电流情况进行全面分析,需要考虑机组在不同运行工况下发生单相接地故障时电容电流的大小。文中以国内某核电站厂用电系统为研究对象,根据实际结构和运行工况搭建了仿真模型和模拟试验平台。

该核电站厂用电系统电压等级为6.6 kV,其中性点采用不接地方式,每台机组设置两台高压厂用变压器,1台辅助变压器,并带载3LGA、3LGB、3LGC、3LGD、3LHA、3LHB、8LGA、8LGB多条母线,每条母线均装设大量不同型号的电缆,数量高达六百根。同时,核电站对厂用电电源要求很高,通常需要有三路外接电源,因此厂用电系统运行工况分为厂变供电、辅变供电和柴油机供电,系统运行工况高达上百种。其中厂用变供电方式下系统部分电缆出线图见图1。厂用电系统整体接线示意图见图2。

1)厂变供电:有两台24 kV发电机组,每台发电机组经两台厂用变压器向6.6 kV中压系统供电,同时经主变向500 kV电网送电。

2)辅变供电:当两台发电机组其中一台临近大修时,该机组负荷将切至由辅助变压器供电,辅助变压器由220 kV电网向本机组中压系统LGB-LGC供电。

3)应急柴油机供电:当核电站厂变供电方式及辅变供电方式发生故障时,需投用柴油发电机带载应急母线LHA、LHB,每台柴油发电机带载一条母线。

### 1.2 单相接地故障电容电流计算方法

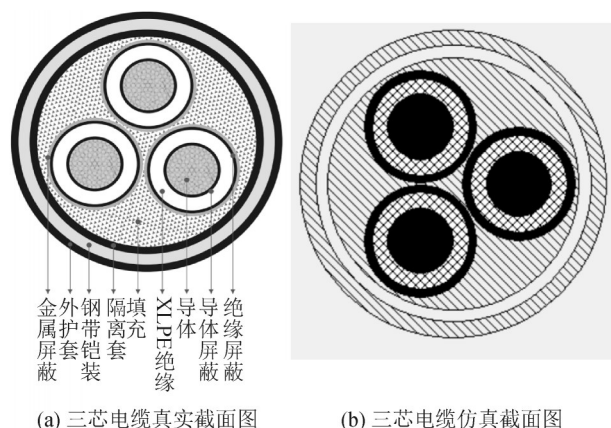
在《电力工程设计手册》和《厂用电继电保护整定计算导则》中,给出了以下两种计算方法。

方法一:中压电缆单相接地故障电容电流计算方法为

$$I_E = \sqrt{3} \omega C_E U_n \quad (1)$$

式(1)中: $I_E$ 为系统单相接地故障电流; $C_E$ 为系统整体对地单相电容; $U_n$ 为系统额定线电压。





(a) 三芯电缆真实截面图

(b) 三芯电缆仿真截面图

图4 三芯电缆仿真与实际模型比较

Fig. 4 Comparison between simulation and actual model of three-core cable

在仿真软件中根据系统中所用真实电缆结构和参数进行建模,并得到各型号电缆仿真模型电容计算值。建立的电缆仿真模型与实际电缆厂家测量得到的电缆电容值比较见表1。

表1 电缆电容值比较

Table 1 Comparison of cable capacitance values

| 电缆型号      | 实测值/(nF·km <sup>-1</sup> ) | 仿真值/(nF·km <sup>-1</sup> ) | 误差/% |
|-----------|----------------------------|----------------------------|------|
| 三芯 35 mm  | 172.5                      | 180.1                      | 4.4  |
| 三芯 50 mm  | 191.7                      | 201.5                      | 5.1  |
| 三芯 120 mm | 260.0                      | 265.2                      | 2.0  |
| 单芯 50 mm  | 191.7                      | 202.3                      | 5.5  |
| 单芯 400 mm | 421.3                      | 435.2                      | 3.3  |
| 单芯 500 mm | 461.3                      | 470.2                      | 1.9  |
| 单芯 630 mm | 509.9                      | 517.6                      | 1.5  |

由表1比较结果可知,仿真模型计算值略高于现场实测值,考虑到随着使用时间的增加和运行环境作用,电缆绝缘材料老化<sup>[23-29]</sup>,电缆电容值实测值与理论值的误差最大为5.5%,在计算误差范围内。因此文中构建的仿真模型能够很好地模拟出中压电缆的实际情况。

## 2.2 中压厂用电系统电磁暂态模型搭建

文中根据核电站厂用电系统实际结构和运行工况搭建了仿真模型,本节以厂变供电方式为例,进行仿真建模。

根据1.1节介绍,厂变供电方式下,主要由24 kV的发电机组经厂用变压器向6.6 kV系统供电,变压器与母线、母线与负载之间均是通过电缆连接。其中采用三相交流24 kV电源串联阻抗来模拟厂用电系统中发电机。厂用变压器和辅助变压器均采用BCTAN模型,参数均按照工程中变压器铭牌参数设置。母线上负载通过系统阻抗进行模拟。母线PT由三相非线性电感模拟,其中磁链—电流数据由实际PT空载电压电流值转化而来见图5(a)。当系统加入消弧线圈时,由于变压器二次侧为三角形接线,需通过Z形绕组的接地变压器引出中性点,接

入消弧线圈见图5(b)。其中,中压厂用电系统3号机组部分仿真模型见图5(c),其仿真模型同样适用于4号机组。

## 2.3 仿真计算结果

系统设置在0.2 s时刻发生单相接地故障,单相接地故障的过渡电阻分别为0.5、100、1 000 Ω时<sup>[30-31]</sup>(对应单相金属接地、中阻接地和高阻接地故障),仿真计算的系统电压和接地电流见图6、7。

由图6可知,当过渡电阻很小时,接地相(A相)电压为0,B相和C相上升为线电压。当过渡电阻为100 Ω时,A相电压为1 374 V,但仍旧小于B相5 598 V,C相电压最大,有效值为6 941 V。当过渡电压为1 000 Ω时,A相电压已经大于B相电压,此时C相电压4 738 V仍为最大。

由图7可知,当系统单相故障时过渡电阻分别为0.5、500、1 000 Ω时,接地电流依次减小。当过渡电阻为0.5 Ω时,仿真计算电流有效值为14.735 A,根据式(1)对该工况下的电容电流进行计算,得出理论值14.724 A,系统接地电流近似等于电容电流。并且此时0.5 Ω和100 Ω接地电流均大于10 A。

对厂用电系统不同工况下的单相接地故障进行仿真,得到接地电流超过标准的运行工况见表2。

其中,以LGD+LGC+LHB+8LGIA和LGD+LGC+LHB+8LGIA+8LGIB两种运行方式进行式(1)理论计算,电容电流值分别为10.97 A和13.52 A,结果表明仿真模型可以有效计算实际系统中的电容电流。

由于系统运行工况复杂,且电缆对地电容值越大时故障越严重,因此本节选取了极端工况(厂用变供电方式带载母线最多的情况14.67 A)下的仿真结果分析并进行验证。

根据运行经验表明,核电站厂用电系统电容电流超过10 A时接地电弧便难以熄灭。为减小接地故障下系统电容电流,采用过补偿且过补偿度10%的消弧线圈接地方式。设消弧线圈电感值为L,则过补偿时消弧线圈电感值为

$$L = \frac{1}{1.1 \times 3\omega^2 C_E} = \frac{\sqrt{3}U_n}{1.1 \times 3\omega I_E} \quad (3)$$

现使系统发生间歇性电弧接地,模拟核电站中压电缆绝缘受损时的接地故障,系统弧光接地过电压见图8。

未加装消弧线圈时,每次电弧重燃都会使电压在原有基础上叠加一个高次分量,使弧光接地过电压远大于消弧线圈接地时的电压,直至绝缘彻底击穿发展至金属接地故障阶段。当加装消弧线圈后,电弧电流通过消弧线圈,其高频分量会受到消弧线圈的电感和电阻的阻碍,从而降低电弧电流的斜

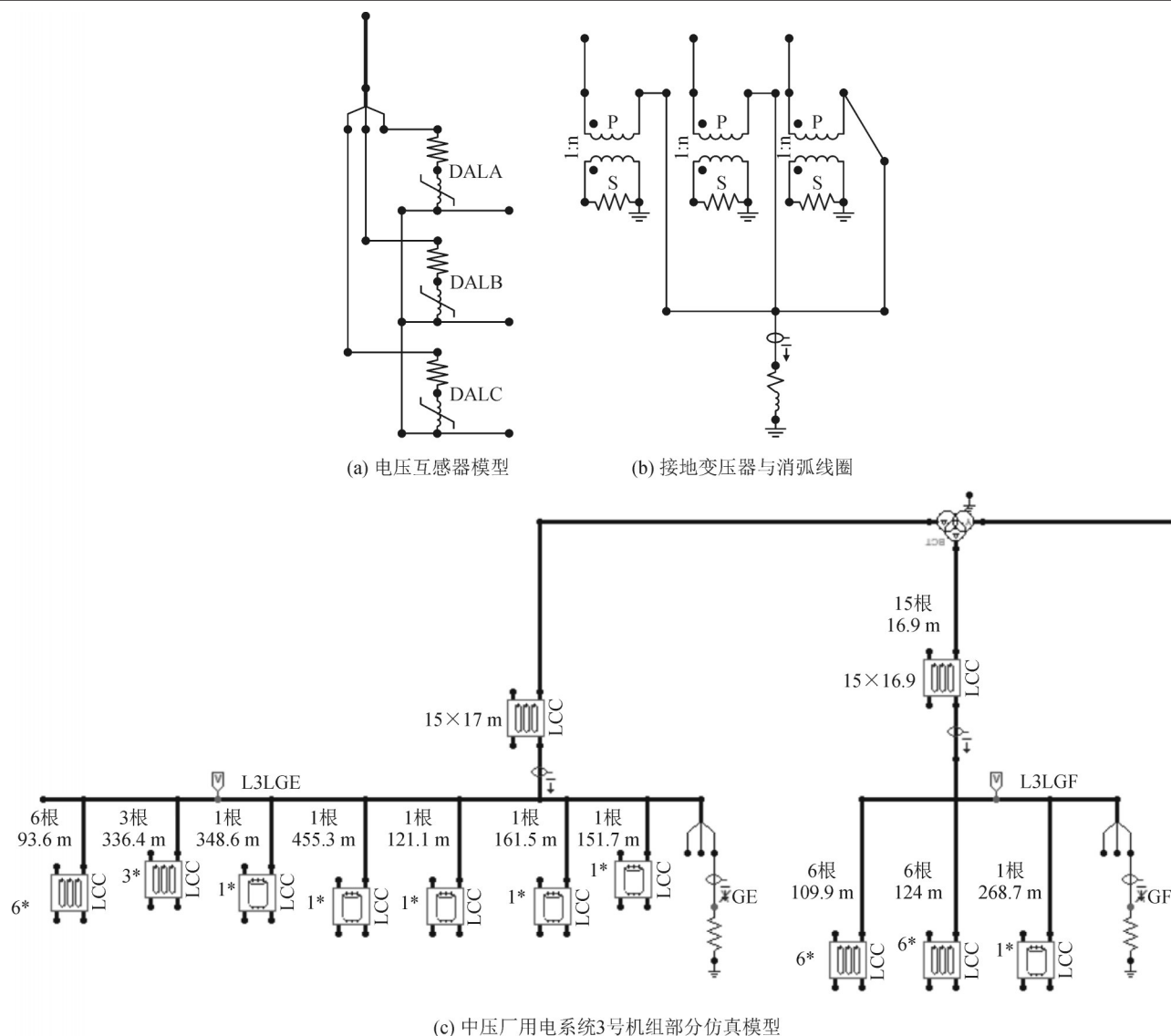


图5 中压厂用电系统仿真模型

Fig. 5 Simulation modeling diagram of medium voltage plant power system

率,使得电弧能够更快地熄灭,并减少高频分量的产生,进一步减小了电力系统中的过电压<sup>[32]</sup>。消弧线圈接地单相故障电流见图9。

当加装消弧线圈时,系统接地电流稳态有效值明显减小,均降至10 A以下,核电站中压厂用电系统可以带故障运行。

### 3 中压厂用电系统接地电流检测试验

#### 3.1 试验平台搭建

搭建6.6 kV中压厂用电系统单相接地故障试验平台,接线示意图见图10,现场试验见图11。由式(6)计算出中压系统电缆的总电容,正常状态下电缆用相同数值的集中电容等效(本试验系统电容值为3  $\mu\text{F}$ 和4.1  $\mu\text{F}$ ),接地故障则用同型号的电

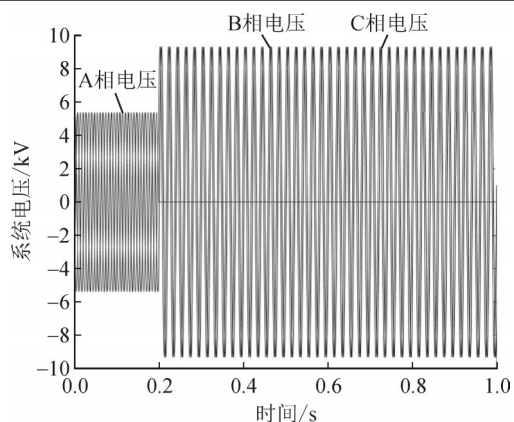
调整接地电阻的大小模拟不同过渡电阻下的接地故障,采用图12模块模拟电缆绝缘损坏的接地故障,该模块由一个金属接地极和削弱了绝缘层的电缆组成,将电缆一端连接系统高压侧,高电位的缆芯经过薄弱的绝缘层向金属接地极放电来模拟弧光接地现象。

为了保证稳定触发接地故障,电缆绝缘削弱程度应该足够大;为了模拟实际工况下电缆绝缘的劣化随机性,不规则削弱电缆绝缘,且不打穿绝缘层使电缆金属部分裸露。加工完成后,将金属接地极连接至加工后电缆的绝缘薄弱处。系统正常运行,设置电缆0 s时刻绝缘击穿。

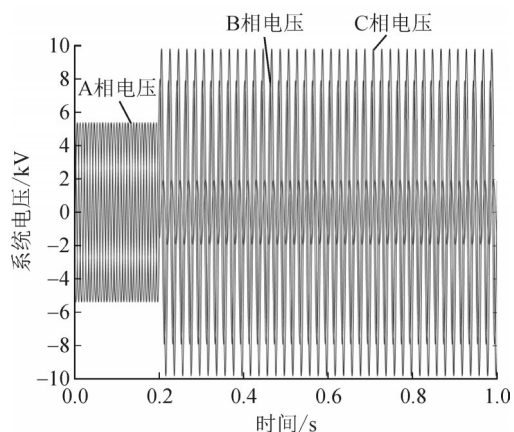
#### 3.2 试验结果分析

电缆绝缘故障模拟试验结果见图13。

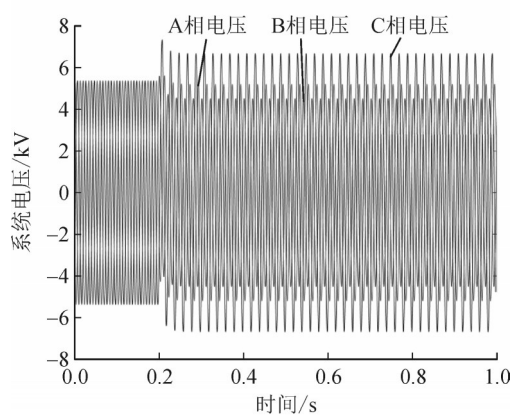
对于中性点不接地系统,绝缘击穿瞬间电压高于系统电压,电容值为4.1  $\mu\text{F}$ 和3  $\mu\text{F}$ 时,瞬态过



(a) 过渡电阻为0.5 Ω时系统电压



(b) 过渡电阻为100 Ω时系统电压



(c) 过渡电阻为1 000 Ω时系统电压

图6 不同过渡电阻下系统三相电压

Fig. 6 System three-phase voltage with different transition resistances

电压达到15.2 kV和14.4 kV,之后的几个周期内电压均稳定在12 kV左右。系统接地电流呈现出规则的多脉冲形式,电弧电流有明显的熄弧与重燃现象。根据高频熄弧理论可知<sup>[33]</sup>,相间电容与对地电容上原有的电荷产生了激烈的振荡,在高频电弧第一次过零时,非故障相电压上升到自由振荡的初始电压,电弧重燃后,电荷将通过电弧接地而被泄放一部分,不会无限制地积累和上升。

对于消弧线圈接地系统,系统电压和电流变化

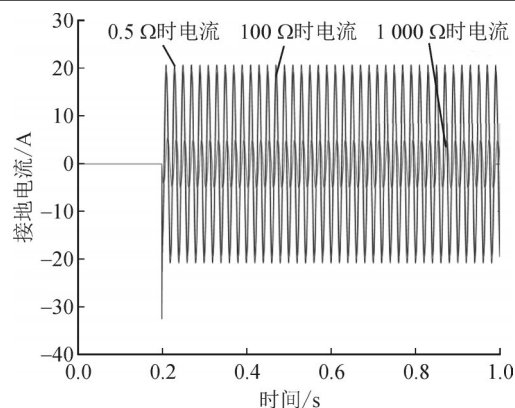


图7 中性点不接地单相故障接地电流

Fig. 7 Single-phase fault current when neutral point is not grounded

表2 接地电流超过标准运行工况

Table 2 The operating condition of ground current exceeds the standard

| 接线方式                          | 电容电流/A |
|-------------------------------|--------|
| LGD+LGC+LHB+8LGIA             | 10.96  |
| LGD+LGC+LHB+8LGIA+8LGIB       | 13.06  |
| 3LGC+3LHB+8LGIA               | 10.45  |
| (4LGB+4LHA)+(3LGC+3LHB+8LGIA) | 14.67  |
| (3LGB+3LHA)+(4LGC+4LHB+8LGIB) | 11.64  |

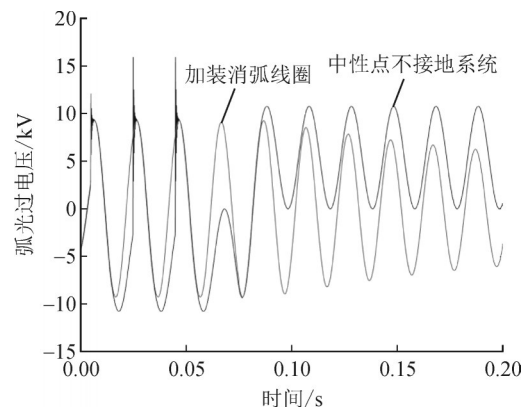


图8 系统间歇性电弧接地过电压

Fig. 8 Intermittent arcing grounding overvoltage of system

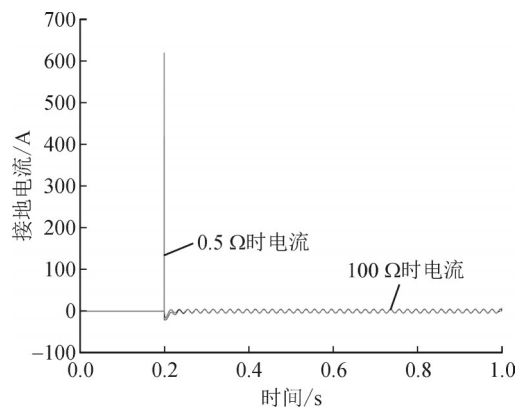


图9 消弧线圈接地单相故障电流

Fig. 9 Single-phase fault current in case of arcing coil grounding

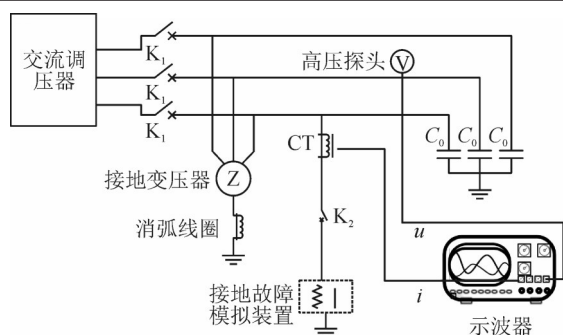


图 10 单相接地故障试验接线示意图

Fig. 10 Experimental wiring diagram for single-phase ground fault

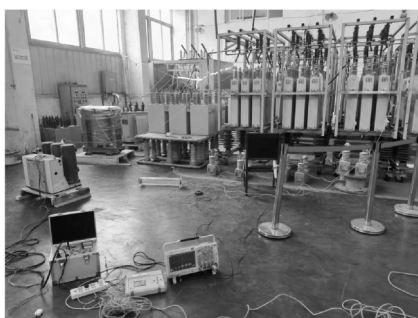
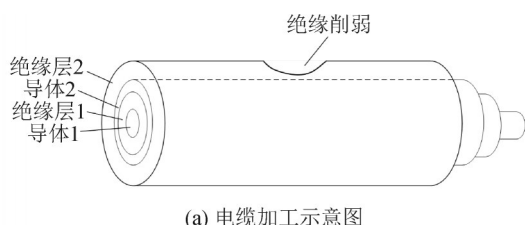


图 11 模拟故障试验平台

Fig. 11 Simulated fault experiment platform



(a) 电缆加工示意图



(b) 削弱绝缘层的电缆



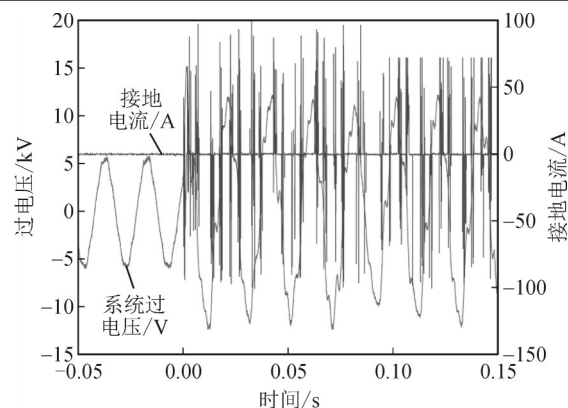
(c) 接地故障模拟

图 12 电缆绝缘故障模拟

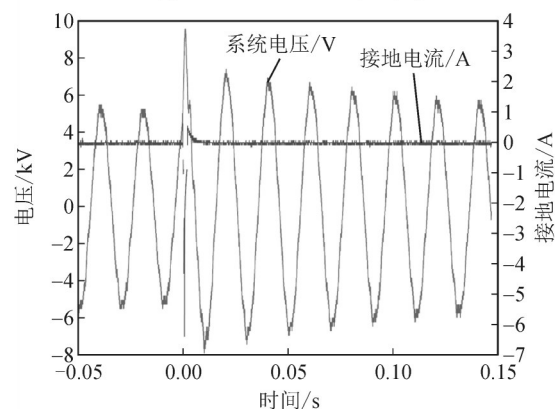
Fig. 12 Insulation fault simulation of cable

规律与前者相同,但是数值上均变小。系统健全相电压在故障瞬间上升至 9.6 kV 和 9.36 kV,近似等于线电压,之后电弧放电阶段电压稳定在 6.5 kV 左右。系统接地电流仅在故障瞬间达到 6 A,但之后迅速稳定在 0.2 A 以内的水平。由此可见加装消弧线圈能够有效减小电缆绝缘故障下的过电压与接地电流水平。

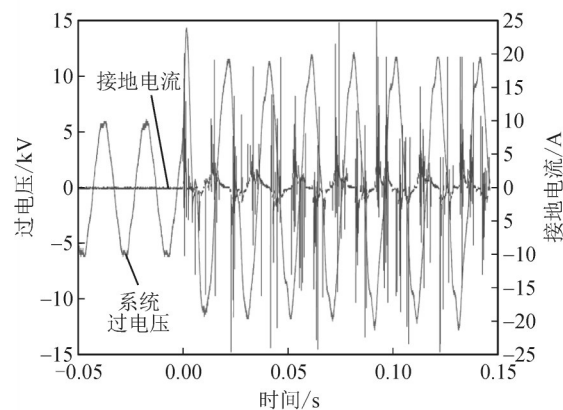
中压厂用电系统发生金属接地故障时试验结果见图 14。



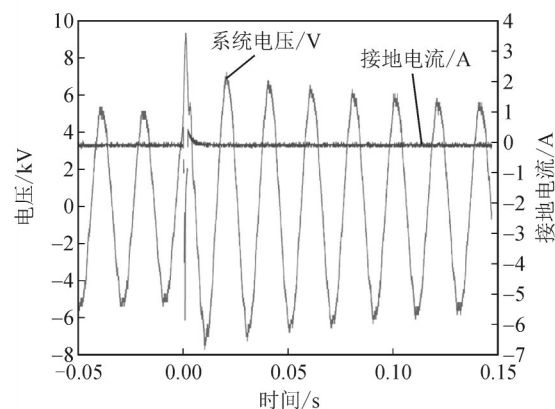
(a) 中性点不接地系统(4.1 μF)



(b) 消弧线圈接地系统(4.1 μF)



(c) 中性点不接地系统(3 μF)



(d) 中性点不接地系统(3 μF)

图 13 电缆绝缘故障试验结果

Fig. 13 Insulation fault experimental results of cable

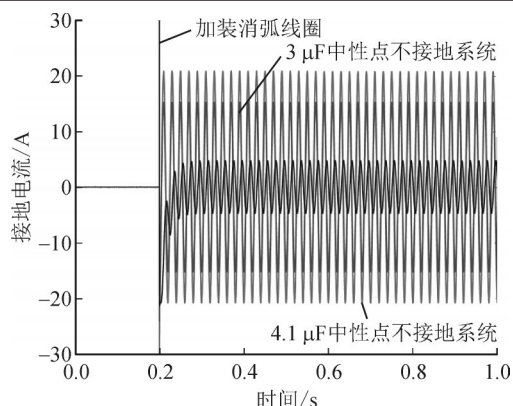


图14 单相金属接地故障试验结果

Fig. 14 Single-phase metal-ground fault test results

系统电缆电容值为4.1、3  $\mu\text{F}$ 时接地电流有效值分别为14.75、10.84 A,系统采用消弧线圈接地后接地电流则降至3.46 A。试验结果与仿真计算接近,验证了仿真模型中电缆建模的准确性。

### 3.3 仿真与试验结果对比

除了系统电容值为4.1、3  $\mu\text{F}$ 的工况,对辅变供电方式和柴油机供电的一些工况进行了模拟试验,并和仿真计算结果进行对比,金属性接地最大误差不超过4%,高阻接地不超过12%,见表3、4。

表3 厂变供电方式下接地电流测试结果

Table 3 Test results of grounding current under plant transformer power supply mode

| $C_0/\mu\text{F}$ | 金属性接地  |        |               | 高阻接地   |        |
|-------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
|                   | 仿真电流/A | 试验电流/A | 消弧线圈接地时接地电流/A | 仿真电流/A | 试验电流/A |
| 0.55              | 1.975  | 1.93   | —             | 1.754  | 1.70   |
| 1.10              | 3.947  | 3.82   | —             | 2.743  | 2.94   |
| 3.00              | 10.707 | 10.40  | 1.43          | 3.593  | 3.57   |
| 3.55              | 12.638 | 12.20  | 1.38          | 3.651  | 3.97   |
| 4.10              | 14.554 | 14.10  | 1.34          | 3.689  | 4.18   |

当系统电容值为0.55  $\mu\text{F}$ 和1.1  $\mu\text{F}$ 时,单相接地电流较小,故障引发的过电压也处于安全范围,因此并未采取消弧线圈来抑制。根据表3结果可知,当系统电容值大于3  $\mu\text{F}$ 时,系统接地电流大于10 A,此时接地电弧不易熄灭,容易引起间歇性弧光接地,并对整个中压系统产生较大危害,加装消弧线圈后能够明显抑制接地电流和弧光接地过电压。

## 4 结论

文中根据国内某核电站厂用电系统接线图,搭建电缆数量超过600条的多电缆出线的精细化接地电流仿真计算模型,分析了数百种工况下各种单相接地故障以及电缆绝缘故障时系统的接地电流与电压特性,并搭建了真型模拟试验平台,采用绝缘

表4 厂变供电方式下弧光接地过电压测试结果

Table 4 Test results of arc grounding overvoltage under plant transformer power supply mode

| $C_0/\mu\text{F}$ | 不加消弧线圈       |              | 加消弧线圈        |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
|                   | 仿真过电压倍数/p.u. | 试验过电压倍数/p.u. | 试验过电压倍数/p.u. |
| 3.00              | 2.77         | 2.46         | 1.90         |
| 3.55              | 2.77         | 2.67         | 1.96         |
| 4.10              | 2.77         | 2.71         | 1.92         |

剥皮形成孔洞方式模拟电缆绝缘故障,验证了仿真计算的准确性,主要得出以下结论:

1)核电厂中压厂用电系统电缆出线数量高达600根,对其进行精细化建模,模型中电容仿真计算值与实测值的误差在5.5%以下,计算模型能够很好地模拟出中压厂用电系统的实际情况。

2)核电厂中压厂用电系统运行工况高达数百种,实际中并不能针对所有工况进行接地电流试验测试。基于厂用电多电缆出线精细化仿真模型,对其进行一一计算,得到系统发生单相金属接地故障时,厂变供电方式下的电容电流超标的运行工况,为核电厂中压厂用电系统运行提供指导意见。

3)核电厂中压厂用电系统中电缆出现绝缘故障后发生单相接地故障时,系统会产生较高的弧光接地过电压,达到2.71 p.u.。由于目前核电站厂用电系统均采用中性点不接地方式,但随着电缆出线数量增多,运行环境复杂化,其中性点可采用消弧线圈接地,系统接地电流明显减小,且此时由于消弧线圈产生于系统相反的电势,系统过电压也得到了抑制。

4)对更多的工况进行模拟试验和仿真计算,二者结果接近并符合理论计算,其中金属性接地最大误差不超过4%,高阻接地最大误差不超过12%,证明了文中对核电站厂用电系统单相接地故障风险分析的有效性,为该核电站厂用电系统的电缆维护与安全运行提供参考。

## 参考文献:

- [1] 彭述明,夏佳文,王毅初,等.我国核安全技术发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(3):113-119.  
PENG Shuming, XIA Jiawen, WANG Yiren, et al. Development strategy of nuclear safety technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3):113-119.
- [2] 邢继,高力,霍小东,等.“碳达峰、碳中和”背景下核能利用浅析[J].核科学与工程,2022,42(1):10-17.  
XING Ji, GAO Li, HUO Xiaodong, et al. Analysis of nuclear energy utilization under the background of “Carbon peaking and Carbon neutrality”[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(1):10-17.

- [3] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.  
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double Carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036 - 3046.
- [4] 周远翔, 陈健宁, 张 灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.  
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, Carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [5] 张朝文, 王卫东. 核电厂备用变压器分闸异响问题研究[J]. 变压器, 2023, 60(6): 35-39.  
ZHANG Chaowen, WANG Weidong. Research on abnormal noise of backup transformer in nuclear power plant[J]. Transformer, 2023, 60(6): 35-39.
- [6] 张德亮, 段琰璞, 倪 爽. 核电厂辅助变压器分闸异响分析与对策[J]. 变压器, 2023, 60(5): 48-52.  
ZHANG Deliang, DUAN Yanpu, NI Shuang. Analysis and countermeasure of abnormal noise of auxiliary transformer opening in nuclear power plant[J]. Transformer, 2023, 60(5): 48-52.
- [7] 冯小华. 核电站厂用电系统 PT 谐振及应对措施浅谈[J]. 变压器, 2012, 49(1): 28-32.  
FENG Xiaohua. Analysis of preventive measures of PT ferromagnetic resonance in auxiliary power system of nuclear power station [J]. Transformer, 2012, 49(1): 28-32.
- [8] 翟晓满, 路进军. 某核电站厂用电系统设置优化方案[J]. 低碳世界, 2021, 11(5): 65-66.  
ZHAI Xiaoman, LU Jinjun. Optimization scheme of power system setup for a nuclear power plant[J]. Low Carbon World, 2021, 11(5): 65-66.
- [9] 乌晓燕, 钟志民. 核安全级电缆耐 LOCA 工况能力的试验研究 [J]. 核科学与工程, 2016, 36(5): 679-682.  
WU Xiaoyan, ZHONG Zhimin. Research on survival of LOCA of class 1 E cables[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, 36(5): 679-682.
- [10] 高 宇, 刘柏欣, 杜伯学, 等. 核电站电缆绝缘的研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 449-460.  
GAO Yu, LIU Baixin, DU Boxue, et al. Research progress and prospect of cable insulation in nuclear power plants[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 449-460.
- [11] KURIHARA T, TAKAHASHI T, HOMMA H, et al. Oxidation of cross-linked polyethylene due to radiation-thermal deterioration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 878-887.
- [12] 杨 杉, 刘 力, 黄晓景. 核电厂中压厂用电中性点不接地系统对地电容电流的研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(6): 135-138.  
YANG Sha, LIU Li, HUANG Xiaojing. Research of grounding capacitive current of neutral non - grounding auxiliary system in nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(6): 135-138.
- [13] 刘 健, 张薛鸿, 张小庆, 等. 预防电缆沟起火的小电流接地系统单相接地故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 21-29.  
LIU Jian, ZHANG Xuehong, ZHANG Xiaoqing, et al. Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 21-29.
- [14] 杨 帆, 李 广, 沈 煜, 等. 中压配电网单相接地故障熄弧后的电气特征分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 134-141.  
YANG Fan, LI Guang, SHEN Yu, et al. Electrical characteristics of medium - voltage distribution network with single - phase - to - ground fault after arc extinction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 134-141.
- [15] 刘 健, 刘 海, 杨晓西, 等. 零序电流互感器配大电阻的配电网单相接地故障检测[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 92-95.  
LIU Jian, LIU Hai, YANG Xiaoxi, et al. Single-phase grounding fault detection based on zero-sequence current transformer with large resistance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 92-95.
- [16] 陶维青, 李雪婷, 华玉婷, 等. 基于曼哈顿平均距离和余弦相似度的配电网单相接地故障定位[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 130-138.  
TAO Weiqing, LI Xueting, HUA Yuting, et al. Fault location of single-phase grounding fault based on Manhattan average distance and cosine similarity in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 130-138.
- [17] 陈池瑶, 苗世洪, 殷浩然, 等. 基于注意力机制—卷积神经网络的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 82-93.  
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YIN Haoran, et al. Single-phase grounding - fault line selection method based on attention mechanism-convolution neural network for distribution network[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 82-93.
- [18] 黄 博, 李文亮, 徐学帅, 等. 35 kV 中压配电网单相接地故障行波定位方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 58-63.  
HUANG Bo, LI Wenliang, XU Xueshuai, et al. A study on the traveling wave location method of single-phase grounding fault in 35 kV medium voltage distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 58-63.
- [19] 李景丽, 刘 鹏, 赵子敬, 等. 中低压配电网单相接地故障熄弧处理方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 125-132.  
LI Jingli, LIU Peng, ZHAO Zijong, et al. Treatment methods of single-phase grounding fault arc extinction in medium and low voltage distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 125-132.
- [20] 孙月琴, 倪 江, 王 宾, 等. 应用于输电线路单端测距的高阻抗接地故障电弧模型分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 86-92.  
SUN Yueqin, NI Jiang, WANG Bin, et al. Transmission line high-impedance fault modeling analysis for single-end fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 86-92.
- [21] 刘科研, 盛万兴, 董伟杰. 配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 12-22.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, DONG Weijie. Overview of

- modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 12-22.
- [22] 邱进, 崔鑫, 田野, 等. 小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 115-121.
- QIU Jin, CUI Xin, TIAN Ye, et al. Analysis of fault voltage characteristics of low current grounding distribution lines with high resistance to arc grounding[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 115-121.
- [23] 雷成, 高帆, 杨磊, 等. 核电厂低压电缆老化状态监测指标分析与研究[J]. 电工技术, 2023(1): 132-134.
- LEI Cheng, GAO Fan, YANG Lei, et al. Analysis and research on monitoring index of aging status of low-voltage cable in the nuclear power plant[J]. Electric Engineering, 2023(1): 132-134.
- [24] 张成, 李洪飞, 杨延滨, 等. 交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 1-11.
- ZHANG Cheng, LI Hongfei, YANG Yanbin, et al. Research progress in ageing, evaluation, and rejuvenation of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2020, 53(7): 1-11.
- [25] 张伟, 胡修翠, 高超, 等. 长期服役XLPE电缆绝缘的空间电荷与热性能[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3533-3541.
- ZHANG Wei, HU Xiucui, GAO Chao, et al. Space charge and thermal characteristics of long-service crosslinked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3533-3541.
- [26] 李岩, 刘一帆, 齐磊杰, 等. 高压电缆皱纹护套损耗系数改进计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 49-57.
- LI Yan, LIU Yifan, QI Leijie, et al. An improved calculation method for high voltage cable corrugated sheath loss coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 49-57.
- [27] 张凯, 原军, 药炜, 等. 电力电缆运行温度场变化及在线监测技术研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 103-108.
- ZHANG Kai, YUAN Jun, YAO Wei, et al. Research on temperature field change and on-line monitoring technology of power cable operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 103-108.
- [28] 张安, 潘贵翔, 李广建, 等. 热老化对车载高压电缆终端应力控制管/EPDM复合层界面放电特性的影响研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 48-54.
- ZHANG An, PAN Guixiang, LI Guangjian, et al. Study on the influence of thermal aging on the discharge characteristics of the composite interlayer interface between the SCT and EPDM of the vehicle high voltage cable terminal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 48-54.
- [29] 刘泳斌, 高景晖, 钟力生, 等.  $\pm 320$  kV 直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 72-80.
- LIU Yongbin, GAO Jinghui, ZHONG Lisheng, et al. Breakdown property of  $\pm 320$  kV HVDC cable system XLPE/EPDM accessories[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 72-80.
- [30] 李雅靓. 小电流接地系统单相接地故障仿真及其特征分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- LI Yaliang. Simulation and characteristic analysis of single-phase grounding fault in small current grounding system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [31] 钟逸涵, 邓丰, 史鸿飞, 等. 基于动态电阻串联的高阻接地故障精确建模[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2046-2059.
- ZHONG Yihan, DENG Feng, SHI Hongfei, et al. Accurate modeling of high impedance fault based on dynamic impedance series connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2046-2059.
- [32] 陈永顺. 关于消弧线圈消除弧光接地过电压的探讨[J]. 电气时代, 2018(7): 102-103.
- CHEN Yongshun. Discussion on eliminating overvoltage of arc grounding with arc suppression coil[J]. Electric Age, 2018(7): 102-103.
- [33] 颜建国, 平绍勋. 弧光接地过电压的分析方法探讨[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 62-64.
- YAN Jianguo, PING Shaoxun. Investigation of the analysis methods for arc grounding over voltage[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 62-64.

李吉生(1975—),男,本科,教授级高级工程师,主要从事核电厂电气系统设备技术改进与创新研究(E-mail: 18902311583@189.cn)。

郑智慧(1993—),女,硕士,工程师,主要从事高电压与绝缘技术专业科研工作(通信作者)(E-mail: zhizhiheng@whu.edu.cn)。