

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250560

基于真型试验和磁流体仿真的电缆单相接地故障 电弧场路耦合模型研究

吴祺嵘¹, 徐靖涵¹, 张国钢¹, 王昊晴², 张雪洋¹

(1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 配电网电缆单相接地故障具有高发高隐蔽性, 其故障暂态过程的研究常采用电弧模型, 但现有的电弧模型研究局限于电路特性描述, 难以准确反映电缆单相接地故障的暂态特征。因此基于真型试验和磁流体(magnetohydrodynamics, MHD)仿真系统研究了电弧物理演变过程, 建立了配电网电缆单相接地故障电弧场路耦合模型。首先, 基于真型试验进行电缆单相接地故障电弧 MHD 仿真, 建立电弧物理场模型。随后, 通过物理场仿真获得电弧耗散功率、时间常数与电导等电弧路模型关键参数, 将电弧耗散功率与时间常数重构为关于电导和故障电流等级的函数, 结合电路模型以实现电弧场路耦合关系的构建。最后, 对比分析了各电弧模型的仿真结果与真型试验波形暂态特征的相对误差, 并讨论了不同故障电流等级下电弧场路耦合模型的适用性与暂态特征的变化。结果表明, 模型的仿真波形与真型试验的暂态特征相对误差均小于 5%, 验证了模型的准确性。

关键词: 电缆单相接地故障; 真型试验; 磁流体仿真; 电弧场路耦合模型; 暂态特征

Arc field-circuit coupling modelling of cable single-phase-to-ground faults based on full-scale tests and magnetohydrodynamic simulations

WU Qirong¹, XU Jinghan¹, ZHANG Guogang¹, WANG Haoqing², ZHANG Xueyang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Single-phase-to-ground faults in distribution network cables occur frequently and are difficult to detect. Researches on the transient process of these faults commonly rely on arc models. However, existing arc models primarily focus on circuit characteristics and cannot accurately reflect the transient behavior of cable single-phase-to-ground faults. Based on full-scale tests and magnetohydrodynamics (MHD) simulations, this paper investigates the physical evolution of arcs and establishes a field-circuit coupled arc model for single-phase-to-ground faults. First, based on full-scale experiments, MHD simulations of arcs under cable single-phase-to-ground fault conditions are conducted to develop an arc physical field model. Subsequently, key parameters of the arc circuit model—such as arc dissipation power, time constant, and conductance—are obtained from the physical field simulations. The arc dissipation power and time constant are then reconstructed as functions of arc conductance and fault current level, and combined with the circuit model to establish the arc field-circuit coupling relationship. Finally, the relative errors between the simulation results of various arc models and the transient characteristics obtained from full-scale tests are compared and analyzed. Meanwhile, the applicability of the proposed arc field-circuit coupled model and the variations in transient characteristics under different fault current levels are discussed. The results show that the relative errors between the simulation waveforms and the full-scale experimental transient characteristics are all less than 5%, verifying the accuracy of the proposed model.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2408202).

Key words: cable single-phase-to-ground fault; full-scale test; magnetohydrodynamic simulation; arc field-circuit coupling model; transient characteristics

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFB2408202); 国家电网总部科技项目资助(5400-202322560A-3-2-ZN)

0 引言

作为新型电力系统建设主战场，配电网电缆化进程持续加速，许多大中型城市核心区电缆化率已超过 80%^[1-3]。在城市配电网各故障类型中，单相接地故障发生概率居于首位，难以自熄的接地故障电弧易使非故障相电压升高，引发两相甚至三相短路，严重威胁设备的稳定和人身安全^[4-5]。在实际运行中，受复杂环境、网架结构和系统参数波动等多重因素影响，配电电缆单相接地故障电弧通常呈现断续性燃烧、信号强度低且暂态特征不显著的特点，致使电缆单相接地故障信号的准确感知与快速处置技术的提升面临重大挑战，对电力系统的安全稳定运行构成潜在威胁。因此，亟需构建适用于配电电缆单相接地故障的电弧模型，以获取更为准确的单相接地故障暂态特征，为单相接地故障信号的准确辨识与灵敏感知提供理论支撑。

现有的配网单相接地故障的研究主要集中于故障感知与检测^[6-9]、故障选线和定位^[10-15]、故障消弧方法与应用^[16-18]等领域，所涉及接地电弧的模型通常采用 Cassie 和 Mayr 等传统电弧黑盒模型，前者主要适用于稳态燃弧阶段，后者主要适用于熄弧阶段。二者均难以全面反映配网故障中接地故障电弧的动态特性变化全过程，因此不完全适用于配电电缆单相接地故障的研究。针对这一问题，已有学者基于 Mayr 电弧模型提出的 Schwarz 和控制论的电弧黑盒模型，并结合与弧长特性，应用于中压小电流接地系统^[19-21]。然而，单一的传统电弧模型难以实现电弧燃烧全过程的合理描述，为此，部分学者提出 Cassie-Mayr 电弧组合模型^[22]，并陆续通过改变电流阈值^[23]、权重分配函数^[24]与时间占比控制函数^[25]调整 Cassie 模型和 Mayr 模型的主导关系，并应用于配电网电缆间歇性单相接地故障研究。此外，近些年也有学者不拘泥于传统电弧黑盒模型框架，提出诸如对数电弧模型^[26]、Emanuel 电弧模型^[27]、RLC 改进电弧电路模型^[28]、分段线性等效电弧电路模型^[29]与复奇频电压源串联电弧电路模型^[30]等新型模型，为配网单相接地故障的模型研究开辟了新的路线。尽管如此，上述模型仅局限于故障电弧电路特性描述，未能充分体现电弧物理场的综合作用。此外，电弧耗散功率、时间常数等关键参数均需根据经验设置，难以准确计算电缆单相接地故障电弧演变过程的暂态特征，故需进一步结合物理场特性改进电弧路模型。

电弧物理场仿真的研究往往基于磁流体动力学方法^[31](magnetohydrodynamics, MHD)，但其建模复

杂、涉及物理化学参量众多且计算效率低，难以直接应用于实际工程。因此，仅有少数学者在 GIS 隔离开关电弧^[32]、中低压短间隙电弧^[33-34]等研究采用以磁流体模型为代表的更高精度物理场模型修正以传统电弧黑盒模型为代表的电弧路模型关键参数，但缺乏分析不同故障工况适应性，相关方法也未应用于单相接地故障研究。

综上所述，现有的配网电缆单相接地故障的电弧模型大多只在“路模型”进行维度的改进与组合，缺乏与能够描述物理空间中每点属性的更高维度的“场模型”结合，难以准确反映配电电缆单相接地故障电弧物理演变的暂态特性。此外，电弧路模型关键参数过度依赖经验确定且难以适应不同工况下的暂态特征变化。为此，本文搭建配电电缆单相接地故障的真型试验平台，通过磁流体仿真建立电缆单相接地故障电弧物理场模型，并计算电缆缺陷通道烧蚀、离地间距、故障电流等级等故障工况的结果。然后，提取电弧物理场模型的电弧耗散功率与时间常数关于电导的函数关系，分析故障工况对电弧耗散功率与时间常数的变化系数与饱和系数的影响，建立配电电缆单相接地故障电弧场路耦合模型。最后，通过将电弧场路耦合模型代入配电网线路仿真，计算了电缆单相接地故障电弧的电流与电压波形，将所得电弧波形与真型试验结果对比分析，并讨论了不同故障电流等级下电弧场路耦合模型的适用性与暂态特征的变化，验证了本文电弧场路耦合模型的准确性与合理性。

1 配电电缆单相接地故障电弧演变过程

配电电缆在长期运行过程中，绝缘层会因老化磨损或受外力破坏等原因产生缺陷，形成电弧通道并发生接地故障。本文以 10 kV 配网的电缆单相接地的故障场景为主要研究对象，搭建配电电缆单相接地故障电弧真型试验并构建相应的电弧物理场仿真，为电缆单相接地故障电弧物理模型的建立奠定基础，同时为电弧场路耦合模型验证提供条件。

1.1 配电电缆单相接地真型试验

本文的试验借助中国电力科学研究院有限公司的 10 kV 配电电缆真型试验网架平台，该平台采用中性点不接地无负载系统，配有含 DTU 的智能终端等设备自动化主站系统，可利用分布式高频录波仪对故障全过程录波，同时对所监测物理量进行存储与分析。部分网架结构如图 1 所示。相比普通物理实验，真型试验能更贴近实际场景，具有较高可靠性。本试验搭建以断线接地故障形式为代表的单相接地故障场景，通过从真型试验网络 B 相引出断

线电缆作为故障接地部分, 搭建电缆单相接地故障侧的试验平台如图 2 所示。通过截取三芯电缆断面并剥离填充层与铜带屏蔽带, 从而获取电缆样品。在电缆样品断线侧线芯导体与接地侧中间的绝缘层部分人为制造一个沿径向贯通、直径为 3 mm 的故障缺陷通道, 如图 3(a)所示, 以模拟电缆在长期运行过程中, 绝缘层因局部放电老化破损或受外力侵害等原因而造成的缺陷^[25,35]。

将试验电缆样品与真型试验网络 B 相的断线相连, 通过绑扎带将电缆样品的绝缘缺陷通道紧贴于钢板, 并将接地极板与真型试验网络的地线相连, 以此模拟电缆单相接地故障工况。将高速相机对准电缆缺陷通道, 在电弧产生时拍摄电弧形态的变化。采用移动电源供电, 通过高压探头与电流传感器连于示波器以记录单相接地故障电弧产生时的电压电流数据, 同时辅以开关柜内的 DTU 读取单相接地

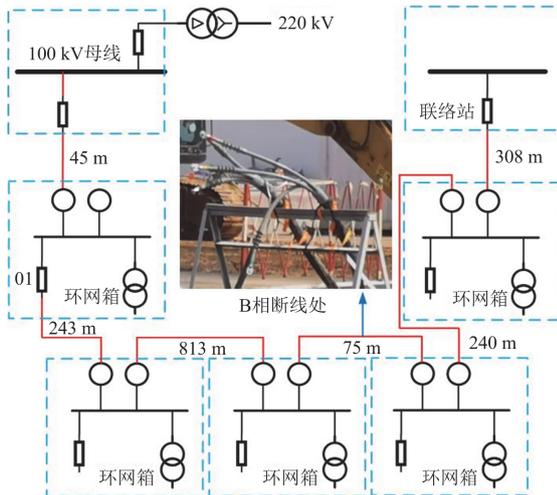


图 1 电缆真型试验平台的部分网架结构

Fig. 1 Part of the grid of the cable true type test platform

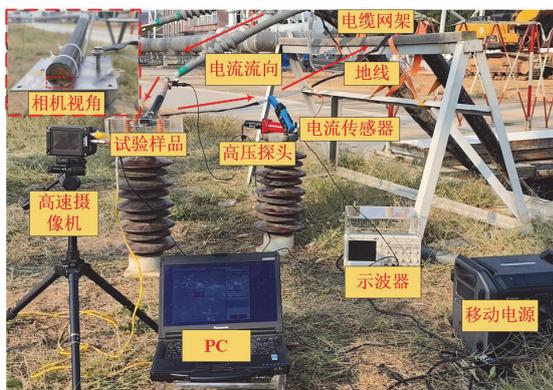
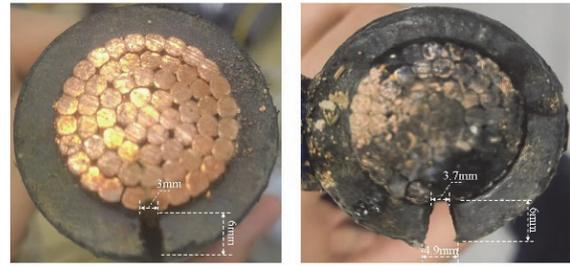


图 2 配电网单相接地的真型试验故障端现场图

Fig. 2 Field diagram of fault end of true type test of distribution cable single-phase grounding



(a) 试验前的电缆样品 (b) 试验后的电缆样品

图 3 单相接地故障试验前后电缆样品的横截面变化

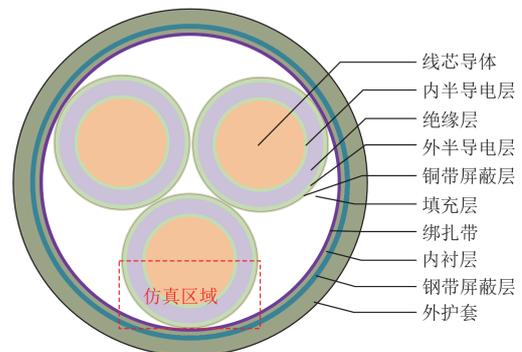
Fig. 3 Change of cross section of cable sample before and after single-phase grounding fault test

故障数据。通过主控电源开关来控制回路的导通与断开, 以此来模拟 10 kV 电压下电缆单相接地故障。试验采用光信号触发, 当回路通电, 电缆线芯导体对地击穿产生电弧时, 示波器和高速相机同步采集数据, 试验总时长为 3 s。

试验结束后, 电缆样品烧蚀情况如图 3(b)所示, 电缆缺陷通道受电弧烧蚀而扩大为梯形, 因此在后续研究中需讨论燃弧过程中电缆缺陷通道变化对电弧特性的影响。此外, 考虑到在实际故障发生过程中接地电流等级的不同以及电缆绝缘老化导致铜带屏蔽层的平整度和缠绕的紧密度的差异, 本试验设置了电缆缺陷通道有间隙接地和无间隙接地的情况, 切实模拟故障电缆运行的复杂性。

1.2 电缆单相接地故障电弧物理场仿真

结合真型试验, 磁流体仿真选取的三芯电缆的结构和材料分布如图 4(a)与表 1 所示。由于三芯电缆的金属屏蔽层通常通过接地线与大地相接, 电缆本体的单相接地故障主要发生于线芯导体与铜带屏蔽层中间的绝缘破损处。因此, 基于真型试验的电缆样品, 根据图 3 的电缆故障缺陷通道的尺寸在绝缘层相应进行设置, 同时铜带屏蔽层设为平板接地电极。此外, 忽略单相接地故障中不会涉及到的三芯电缆中的其他部分, 最终建立的电缆单相接地故障电弧磁流体仿真的几何模型如图 4(b)所示。



(a) 三芯电缆模型结构

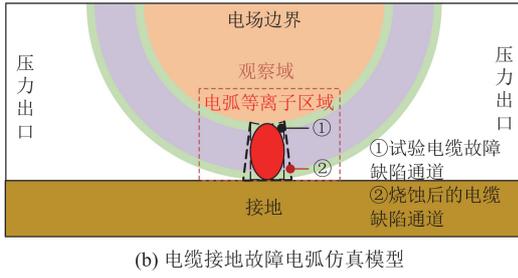


图 4 电缆结构与接地电弧仿真模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cable structure and grounding arc simulation model

表 1 三芯电缆几何模型结构参数

Table 1 Structure parameters of three-core cable model

| 结构 | 直径/mm | 材料 |
|--------|-------|-------------|
| 线芯导体 | 23.8 | 铜 |
| 内半导电层 | 25.4 | 半导体高分子 |
| 绝缘层 | 34.4 | 交联聚乙烯(XLPE) |
| 外半导电层 | 36 | 半导体高分子 |
| 铜带屏蔽层 | 36.2 | 铜 |
| 填充层 | 78.4 | 聚乙烯 |
| 无纺布绑扎带 | 78.8 | 聚丙烯 |
| 内衬层 | 82.4 | 聚氯乙烯 |
| 钢带屏蔽层 | 84 | 钢 |
| 外护套 | 92 | 聚氯乙烯 |

需要说明的是，根据试验前后的电缆绝缘缺陷通道受电弧烧蚀变化，磁流体仿真将缺陷通道的形状与尺寸分别设置为试验前与试验后两种类型，以便在后续研究中分析绝缘缺陷通道的烧蚀所造成的影响。在其余边界条件的设置中，线芯导体设置为电场边界，模型边界设置为压力出口。磁流体仿真初始输入为峰值电流，计算时长为半个周波。

尽管电缆单相接地故障电弧涉及物理场的演变，但具体研究时也仅需考虑宏观层面，无需考虑电弧微观特性，由此可采用如下假设^[36-37]。

1) 电弧等离子体是不可压缩的。

2) 电弧等离子处于局部热力学平衡状态，其中微观粒子运动状态与宏观电弧一致。

3) 忽略电弧等离子鞘层的影响以及电弧和电极之间的相互作用。

4) 忽略电弧起弧过程，将电弧区域的初始温度设为 20 000 K，并在输入磁流体源项后将其去除。

将描述流体能量、质量和动量守恒的 Navier-Stoke 方程和描述电磁过程的麦克斯韦方程组结合，实现气流场和电磁场的耦合，相关方程如式(1)~式(5)所示。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为密度； \mathbf{v} 为速度； t 为时间。

动量守恒方程为

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \left\{ -p\mathbf{I} + \eta \left[\frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right] \right\} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$\mathbf{J} \times \mathbf{B}$

式中： p 为压力； I 为故障电流等级； η 为动力粘度； \mathbf{J} 为电流密度； \mathbf{B} 为磁通密度。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla H \right) + \sigma \mathbf{E}^2 - q_r + q_n \quad (3)$$

式中： H 为单位质量的焓； λ 为热导率； c_p 为定压比热容； σ 为电导率； \mathbf{E} 为电场强度； q_r 为总体积辐射能； q_n 为耗散能。

麦克斯韦方程组为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_c \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

式中： \mathbf{D} 为电位移矢量； ρ_c 为空间电荷密度； \mathbf{H} 为磁场强度。

由于敷设介质多为空气，本文只考虑电缆的敷设环境介质为空气。物理仿真所涉及的空气物性参数源于西安交通大学气体放电等离子体数据库^[38]。此外，电离通常被认为满足热完全气体状态方程，如式(5)所示。

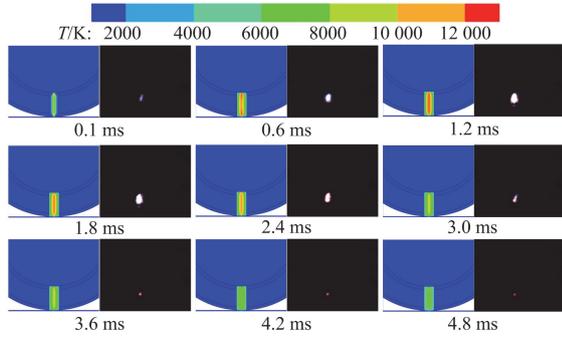
$$p = R\rho T \quad (5)$$

式中： R 为气体常数； T 为气体温度。

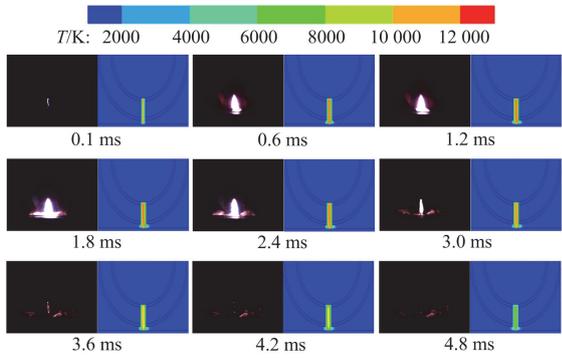
1.3 电弧物理场仿真与试验对比

图 5 展示了电弧磁流体暂态仿真和电缆单相接地故障真型试验的对比结果。在 0.1 ms，电弧呈现为细长圆柱状，弧柱最高温度可达到 14 000 K。随着电流的迅速注入，电弧剧烈扩张，在 1 ms 时，电弧整体区域直径扩展至电缆缺陷通道 80% 以上空间，弧柱区域(电弧 8000 K 以上区域)从初始圆柱形演化为中间宽两头细的类橄榄状柱体。随后注入电流水平下降，输入功率降低，电弧呈现动态收缩。但受限于绝缘层材料极低的热导率，热量耗散滞后于能量输入，导致弧柱内的最高温度在 1~2 ms 时仍

维持在 12 000 K 左右。至 3~4 ms 时, 电流幅值持续降低, 弧柱区域的收缩和电弧温度的下降趋势继续加强。最终在 5 ms 时, 电流跌落至接近零的值, 弧柱区域最大温度降至 8000 K 左右, 电缆缺陷通道大部分区域温度降低至 6000 K 以下, 电弧趋于熄灭。



(a) 电缆缺陷无离地间距接地(电流等级 10 A)



(b) 电缆缺陷有离地间距接地(电流等级 20 A)

图 5 电缆单相接地故障电弧仿真与试验对比

Fig. 5 Comparison of simulation and experiment of single phase grounding fault arc of cable

真型试验中电弧形态也呈现先扩张后收缩, 过零趋于熄灭, 与仿真结果一致。在电缆缺陷通道无离地间距接地的工况下, 其光强随着电流大小呈现正相关变化。弧柱靠近导体的形状较尖, 这是由于气固界面粘性大于气体粘性所致。虽然电缆对地击穿普遍认为是个沿面放电的过程, 但从试验结果来看, 在燃弧阶段的特征近似于气体电弧放电过程, 验证了仿真模型将弧柱设在电缆缺陷通道中心的合理性。在电缆缺陷有离地间距接地的工况下, 电弧放电时会沿着绝缘层外皮向两边扩张, 并且由于输入电流等级的增加, 弧柱直径明显增大, 因此声光现象也更加显著。

2 电缆单相接地故障电弧场路耦合模型

根据前文的电弧形态结果, 选取传统 Mayr 电弧模型作为基础, 结合物理场模型所计算的电弧电

导、耗散功率和时间常数, 重构电弧耗散功率与时间常数为电弧电导的函数, 并结合绝缘缺陷通道烧蚀、电缆离地间距、故障电流等级变化, 分析绝缘缺陷通道烧蚀、电缆离地间距、故障电流等级对电弧模型的影响, 将电弧耗散功率 P_{loss} 与电弧时间常数 τ 转化为关于电弧电导 g 与 I 的显式函数, 以此实现电弧场路耦合关系的构建, 具体流程如图 6 所示。其中: A 、 B 、 C 、 D 为模型系数, A 、 C 称为变化系数, B 、 D 称为饱和系数。

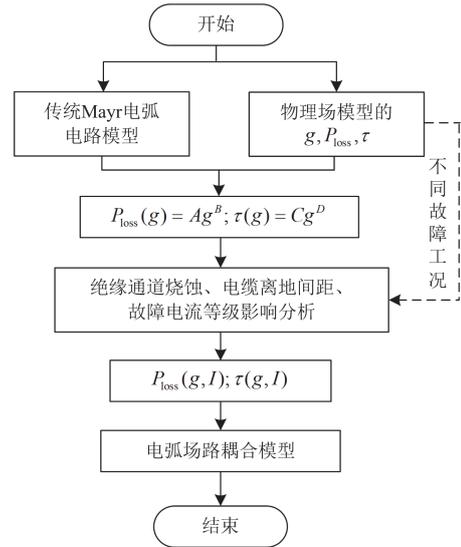


图 6 电弧场路耦合模型构建流程

Fig. 6 Construction process of arc field-circuit coupling model

2.1 电弧耗散功率与时间常数重构

依据真型试验与物理场仿真结果, 电缆单相接地故障电弧弧柱区域形态为类橄榄状的圆柱体, 且体积变化较小, 符合传统 Mayr 电弧模型, 如式(6)所示。

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u \cdot i}{P_{\text{loss}}} - 1 \right) \quad (6)$$

式中: g_m 为 Mayr 电弧模型的电导; τ 为电弧时间常数; P_{loss} 为电弧耗散功率。然而, 传统 Mayr 电弧模型本质上是“路模型”, 其准确性取决于时间常数、耗散功率、电弧电压等参数选取的合理性, 往往需要通过相应的试验场景进行大量的实验归纳获得, 但是, 真型试验的成本较高, 难以获得大量数据, 而且, 相应归纳参数都为常数, 难以体现电缆单相接地故障电弧在不同故障工况的演变规律以及对相应参数的影响。上述问题可通过更高维的“场模型”依据不同故障工况定制化处理, 相应参数再通过均值处理实现降维, 由此可利用前文的电弧物理场模型, 结合电弧能量特性, 获取电弧耗散功率与时间

常数, 重构传统 Mayr 电弧电路模型为

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{ui}{P_{\text{loss}}(g)} - 1 \right) \quad (7)$$

式中: $P_{\text{loss}}(g)$ 和 $\tau(g)$ 分别为电弧耗散功率与时间常数重构的关于电弧电导函数。其中, 路模型的电导由场模型对时间步与网格解均值处理, 表示为单位电弧电导, 如式(8)所示。

$$g = \sum_{i=1}^n [J_i(t)/E_i(t)]/\Delta t \quad (8)$$

式中: E_i 为第 i 个网格内的电子能量; Δt 为电弧的持续时间。基于电弧物理场模型结果, 通过能量方程的数值求解每个有限元网格能量值, 计算得电弧时间常数和耗散功率与电弧电导的数值关系为

$$P_{\text{loss}}(g) = u(t)i(t) - \left[\sum_{i=1}^n (E_i(t)) - \sum_{i=1}^n (E_i(t - \Delta t)) \right] / \Delta t \quad (9)$$

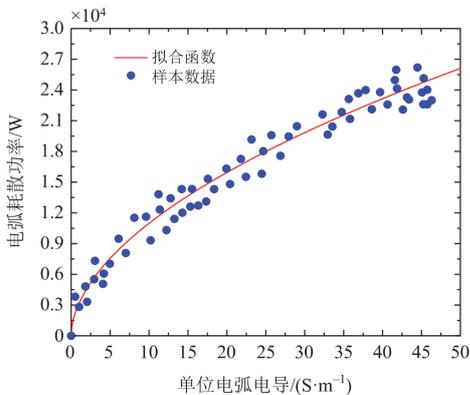
$$\tau(g) = \frac{1}{g(P_{\text{loss}}(g))} \cdot \frac{dQ}{dg} = \frac{g \left[\sum_{i=1}^n (E_i(t)) - \sum_{i=1}^n (E_i(t - \Delta t)) \right]}{P_{\text{loss}} [u(t)i(t) - u(t - \Delta t)i(t - \Delta t)]} \quad (10)$$

将数值求解结果拟合, 可得电流等级 10 A、离地间距 0 mm、电缆缺陷通道无烧蚀的电弧耗散功率与时间常数关于电导函数, 如图 7 所示。可以看出, 电弧耗散功率与时间常数关于电弧电导符合幂指数函数规律, 其通用形式为

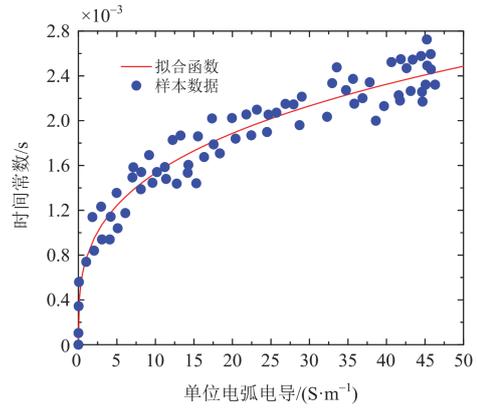
$$\begin{cases} P_{\text{loss}}(g) = Ag^B \\ \tau(g) = Cg^D \end{cases} \quad (11)$$

计算的模型系数结果为: $A = 3153$, $B = 0.538$, $C = 7.66 \times 10^{-4}$, $D = 0.301$ 。

从物理角度分析, 变化系数 A 量化了电弧耗散功率对电导率变化的响应特性, 当系数 A 越大时, 单位电导下的电弧功率耗散也越多; 饱和系数 B 则描述了耗散功率的渐进饱和行为, 即在电导率持续



(a) 电弧耗散功率与电导



(b) 电弧时间常数与电导

图 7 电弧耗散功率、时间常数与电弧电导的关系

Fig. 7 Functions of arc dissipation power and time constant with respect to arc conductance

增加时耗散功率趋近稳定极限的物理过程, 故系数 B 越大, 达到稳定耗散功率值所需的电导率也越高。同理, 系数 C 与 D 也共同表征时间常数与电导相应的关联特性, 时间常数反映了电弧的动态响应时长与热惯性效应: 系数 C 决定了单位电导下的能量衰减率, 其值越大表明电弧热量维持时间越长, 能量变化越缓慢; 系数 D 则表征系统达到稳态所需的电导率阈值, 其值越大意味着建立稳定时间常数需要更高的电导率。显然, 单一的模型系数并不能直接应用于任意故障工况的电缆单相接地故障, 需针对不同故障工况的影响开展分析。

2.2 不同故障工况的影响分析

本节通过仿真不同电缆缺陷通道、电缆离地间距、故障电流等级等故障工况下的接地故障电弧, 分析不同故障工况对电弧耗散功率和时间常数的变化系数与饱和系数的影响。

由图 3 可知, 电缆缺陷通道会因电弧高温的烧蚀作用而扩大为梯形。故将图 4(b)的几何模型按试验后缺陷通道代入 10 A 电流等级进行物理场计算, 之后, 调整电缆离地间距再次计算, 获取电缆缺陷通道烧蚀与不同离地间距下的结果, 如图 8(a)所示。前者的电弧整体区域底部呈现梯形结构, 弧柱区域的形态呈现为上头尖、中下头宽的类橄榄状柱体, 相比未烧蚀前略微缩短。后者的电弧区域呈半开放状, 对流效应使得电弧整体区域在离地间距处有明显的扩张, 然而, 主要体现电弧形态的弧柱区域并未呈现明显的变化。图 8(b)展示了不同电流等级的电缆单相接地电弧, 故障电流等级的提升意味着电弧能量的升高, 其使得弧柱区域直径得以扩大。尤其在故障电流等级为 30~50 A 中的 1~3 ms 内, 弧柱

区域几乎扩散至整个电缆缺陷通道。尽管在随后 2 ms 内电流下降, 但受热惯性与能量集聚的作用, 零休时电缆故障缺陷通道仍维持较高残余温度且保有较多自由离子, 使得电流过零后更易重燃。

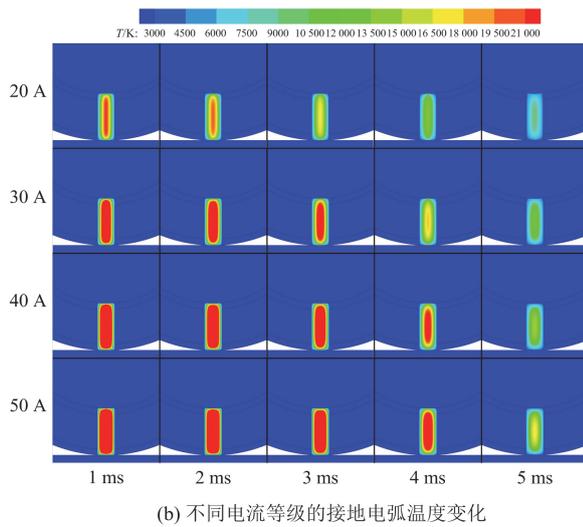
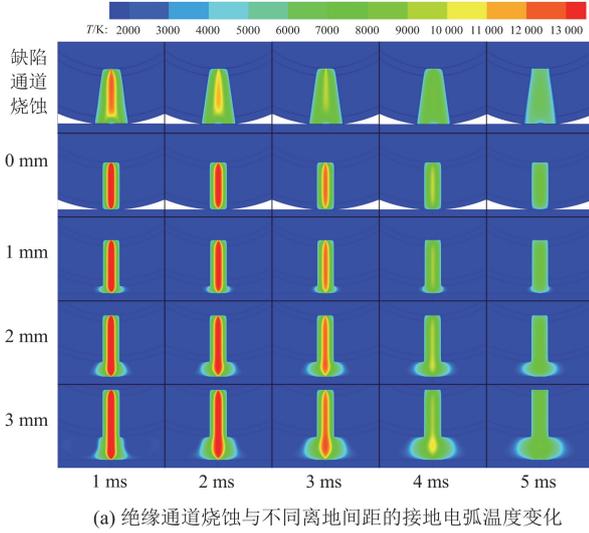


图 8 不同故障工况的电缆单相接地电弧温度变化

Fig. 8 Temperature variation of single-phase grounding arc in cables under different fault conditions

为定量分析故障工况的影响, 提取电弧物理场模型的弧柱区域的平均直径变化, 如图 9 所示。可以看出, 故障电流等级提升使得电弧弧柱区域的扩张速度与范围加剧, 燃弧持续时间较长且收缩速率与收缩程度减小, 甚至在零休时刻的缺陷通道仍保有高温区域, 故障电流等级为 10~50 A 时, 对应弧柱区域最大平均直径的范围为 1.42~2.12 mm, 相比之下, 电缆缺陷通道的烧蚀影响与不同电缆离地间距的弧柱区域直径动态变化曲线几乎重合, 仅在弧

柱扩张与收缩阶段略有差异, 故可初步认为单相接地电弧只受故障电流影响。

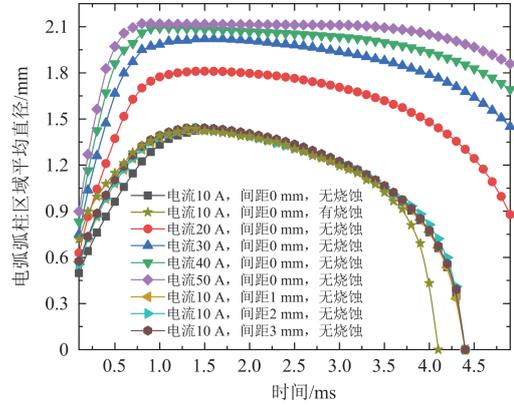


图 9 电缆单相接地故障电弧弧柱区域的动态变化

Fig. 9 Dynamic change of arc center area of single-phase grounding fault in cable

为进一步分析电弧形态演变与电弧能量的相关性, 需分析电弧形态对能量输入和耗散的影响。引入电弧能量平衡方程, 如式(12)所示。

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{cd}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{fs}} \quad (12)$$

式中: P_{cd} 为传导散热功率; P_{dl} 为对流散热功率; P_{fs} 为辐射散热功率。

传导散热功率可表示为

$$P_{\text{cd}} = \frac{2\pi\lambda l(T_h - T_0)}{\ln(r_h/r_0)} \quad (13)$$

式中: λ 为气体导热系数; l 为电弧长度; r_h 为电弧半径; T_h 为弧柱表面温度; T_0 为环境温度; r_0 为 T_0 处的半径。

对流散热功率可表示为

$$P_{\text{dl}} = h\pi dl(T_h - T_0) \quad (14)$$

式中: h 为对流换热系数; πdl 为弧柱侧面积。

辐射散热功率可表示为

$$P_{\text{fs}} \approx 71.6r_h^2 l \varepsilon_{\text{fs}} \left[\left(\frac{T_h}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] \quad (15)$$

式中: $71.6r_h^2 l$ 为乘以经验系数的电弧体积项; ε_{fs} 为弧柱发射率。

通过分析式(13)~式(15), 可以发现, 由于电弧长度 l 取决于电缆离地间距, 并不随故障电弧变化而变化, 因此不会影响电弧耗散功率变化。依据前文分析, 弧柱边界表面温度恒定。因此, 电弧耗散功率 P_{loss} 的变化只与电弧半径 r_h 相关且正相关。结合上述 3 类工况对弧柱区域的影响分析可得, 故障电流等级对电弧耗散功率 P_{loss} 的影响占据主导性作用, 相应的 P_{loss} 提升也会引发电弧动态响应时间的

缩短,因此时间常数 τ 也取决于故障电流等级的变化。因此可将模型系数替换为关于故障电流等级的有关函数,实现电弧耗散功率和时间常数的变化系数与饱和系数的函数化重构。

2.3 电弧场路耦合关系构建

本节通过提取不同故障工况的模型系数,进一步论证故障电流等级对模型系数的主导性影响作用,并将电弧耗散功率和时间常数的模型系数函数化为故障电流等级的显式关系,以此实现电缆单相接地故障电弧场路耦合关系的构建。

表2展示了不同故障工况的模型系数,可以看出,电缆缺陷通道烧蚀与电缆离地间距由0 mm增大至3 mm时,电弧耗散功率与时间常数的变化系数与饱和系数仅有微小变化。相比之下,当故障电流等级从10 A升至50 A时,电弧耗散功率系数的变化幅度达100%,时间常数的相对变化幅度约为14%。通过对比可得,电弧耗散功率和时间常数的变化系数与饱和系数主要受故障电流等级影响,因此可将变化系数与饱和系数共同转化为关于故障电流等级的函数,从而表征故障电流对电弧耗散功率和时间常数的调控机制。

表2 不同故障工况的模型系数

Table 2 Parameters of arc improvement models with different fault conditions

| 故障工况 | A | B | C | D |
|---------------|------|-------|-----------------------|-------|
| 5 A/0 mm/无烧蚀 | 2013 | 0.578 | 8.26×10^{-4} | 0.291 |
| 10 A/0 mm/无烧蚀 | 3153 | 0.538 | 7.66×10^{-4} | 0.301 |
| 20 A/0 mm/无烧蚀 | 4691 | 0.488 | 7.16×10^{-4} | 0.320 |
| 30 A/0 mm/无烧蚀 | 5426 | 0.440 | 6.91×10^{-4} | 0.329 |
| 40 A/0 mm/无烧蚀 | 5994 | 0.403 | 6.76×10^{-4} | 0.334 |
| 50 A/0 mm/无烧蚀 | 6552 | 0.368 | 6.61×10^{-4} | 0.338 |
| 60 A/0 mm/无烧蚀 | 7005 | 0.343 | 6.49×10^{-4} | 0.341 |
| 70 A/0 mm/无烧蚀 | 7230 | 0.326 | 6.44×10^{-4} | 0.347 |
| 80 A/0 mm/无烧蚀 | 7340 | 0.317 | 6.41×10^{-4} | 0.351 |
| 10 A/1 mm/无烧蚀 | 3223 | 0.537 | 7.65×10^{-4} | 0.302 |
| 10 A/2 mm/无烧蚀 | 3253 | 0.536 | 7.63×10^{-4} | 0.303 |
| 10 A/3 mm/无烧蚀 | 3272 | 0.536 | 7.62×10^{-4} | 0.304 |
| 10 A/0 mm/有烧蚀 | 3215 | 0.538 | 7.65×10^{-4} | 0.299 |

图10展示了电弧耗散功率的系数(A、B)与时间常数系数(C、D)随电流的变化规律。可以看出,系数A与系数D呈现非线性上升的规律,并且随着电流等级的提高,增长幅度持续降低至趋于平缓;系数B与系数C呈现非线性下降,且下降幅度也持续降低至趋于平缓。通过函数逼近与回归分析,将上述系数转化为关于电流的函数,如式(16)所示。

$$\begin{cases} A = 1254.9 \cdot I^{0.426} \\ B = 9.146 \times 10^{-3} \cdot I^{-0.2218} \\ C = 1.019 \times 10^{-3} \cdot I^{-0.1191} \\ D = 0.2493 + 0.0230 \cdot \ln(I) \end{cases} \quad (16)$$

式中: I 为故障电流等级,可通过多个周波的幅值确定。将式(16)代入式(11),通过将离散的系数处理为有关电流的通用表达形式,可将电弧耗散功率与时间常数重构为关于电弧电导与故障电流的函数,如式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{loss}}(g, I) = (1254.9 \cdot I^{0.426}) g^{0.9146 \cdot I^{-0.2218}} \\ \tau(g, I) = (1.019 \times 10^{-3} \cdot I^{-0.1191}) g^{0.2493 + 0.0230 \cdot \ln(I)} \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(7)即可完成电弧场路耦合模型路侧的构建。

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g, I)} \left(\frac{ui}{P_{\text{loss}}(g, I)} - 1 \right) \quad (18)$$

路模型的故障电流等级 I 源于动态电流 i 在固定周期内的平均值。当配网系统发生单相接地故障,电容电流受系统能量波动的影响,导致整体 I 发生变化,从而影响物理场侧的输入电流,使得 g 发生变化,最终反作用于电路模型的 P_{loss} 与 τ 。据此,电缆单相接地故障电弧场路耦合模型构建完成,其中 P_{loss} 与 τ 是关于 g 与 I 的显式表达。通过该模型,可实现不同故障电流等级的配电电缆单相接地故障电弧波形与暂态特征的准确复现。

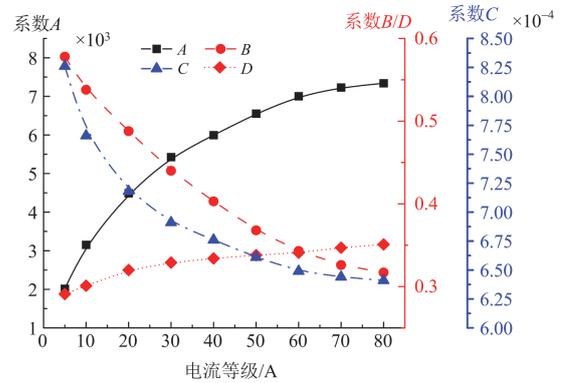


图10 电弧耗散功率与时间常数的系数随故障电流变化
Fig. 10 Variation of the coefficients of arc dissipated power and time constant with fault current

3 电弧场路耦合模型的验证与讨论

3.1 模型的准确性验证

为验证本文电弧场路耦合模型的合理性,需构建10 kV配电电缆单相接地故障的线路仿真模型,对比仿真波形结果与试验结果暂态特征的相对误差,分析电弧场路耦合模型的准确性。

根据图1的真型试验网架,采用ATP-EMTP仿真软件构建10 kV配电电缆单相接地故障线路仿真模型,如图11所示。线路元件等效模型参数分别为:交流电源220 kV,频率50 Hz,变压器变比22:1,

其两侧电感 0.1348 mH, 两侧电阻 6.675 mΩ; 电缆线路 1 的 3 段电缆长度分别为 45 m、243 m 和 813 m; 电缆线路 2 长度为 75 m, 电缆线路 3 长度 548 m、电缆的分布电阻 0.045 Ω/km, 分布电感 0.15 mH/km、分布电容 0.2 μF/km。其中断线处与电缆线路 2 同段, 于 50 m 处断开, 并采用等效电缆模块替代。电弧模块采用本文模型, 仿真步长为 50 μs。

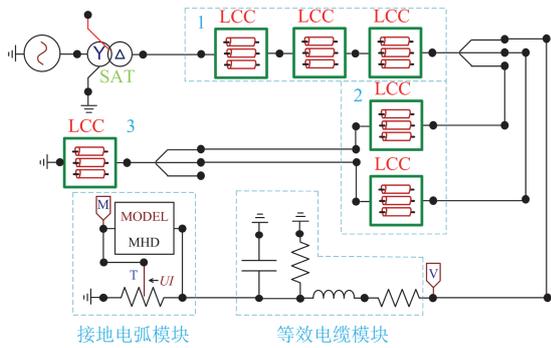
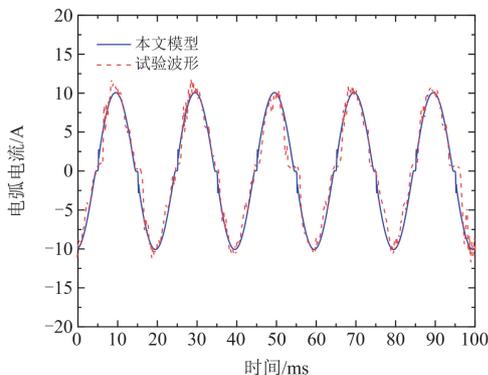


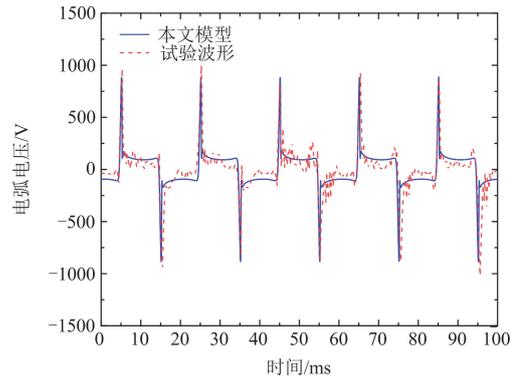
图 11 配电电缆单相接地故障线路仿真模型

Fig. 11 Simulation model of single-phase grounding fault line for distribution cables

图 12 展示了电弧持续期间某段 100 ms 时间窗内电流电压的线路仿真与试验结果。配电电缆单相接地故障具有交流电弧的暂态特性, 电弧在半波周期内呈现“击穿-燃弧-熄灭再击穿”的动态循环过程。在此过程中, 击穿阶段对应电流零休状态, 此时电流上升速率显著降低, 电压则持续攀升至临界击穿阈值; 进入燃弧阶段后, 电压迅速跌落至低稳态值区间, 电弧电流恢复准正弦特性直至熄灭, 随即启动下一半波周期的击穿过程。该暂态过程可通过以下特征参数量化表征: 零休时长(电流零休状态的持续时间), 击穿电压(击穿瞬间的电压峰值), 燃弧电压(燃弧阶段电压均值), 电流幅值(半波周期内电流最大值)。因此, 可提取上述暂态特征的仿真值与试验值相对误差, 作为模型准确度评判指标。



(a) 电流对比



(b) 电压对比

图 12 电缆单相接地故障电弧电流与电压仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of arc current and voltage of single-phase grounding fault in cable

为不失一般性并进一步论证本文模型的准确性, 选取传统 Mayr 模型、控制论模型与 Cassie-Mayr 组合模型的配电线路仿真暂态特征结果与本文模型进行比较分析, 如表 3 所示。可以看出, 采用本文模型的线路仿真结果与真型试验结果最为接近, 其电流幅值、零休时长、击穿电压和燃弧电压等单相接地故障电弧波形暂态特征的相对误差均为几种电弧模型中的最小值。验证了本文的电弧场路耦合模型下的配电电缆单相接地故障线路仿真结果具有较高的准确性与可靠性。

表 3 不同电弧模型的仿真特征结果对比

Table 3 Comparison of simulation of different arc models

| | 试验 | 本文模型 | 传统 Mayr 模型 | 控制论模型 | Cassie-Mayr 组合模型 |
|----------|-------|-------|------------|-------|------------------|
| 电流幅值/A | 10.28 | 10.11 | 10.03 | 10.66 | 10.07 |
| 电流幅值误差/% | — | 1.65 | 2.43 | 3.70 | 2.04 |
| 零休时长/ms | 0.63 | 0.65 | 0.74 | 0.70 | 0.75 |
| 零休时长误差/% | — | 3.17 | 17.46 | 11.11 | 19.05 |
| 击穿电压/V | 894.1 | 923.2 | 1028 | 820 | 988.3 |
| 击穿电压误差/% | — | 3.24 | 14.98 | 8.29 | 10.53 |
| 燃弧电压/V | 88.6 | 92.8 | 104.2 | 97.5 | 96.9 |
| 燃弧电压误差/% | — | 4.74 | 17.61 | 10.05 | 9.37 |

3.2 模型适用性分析

本节对不同电流等级的电缆单相接地故障电弧仿真与试验波形进行对比, 结合暂态特征的变化分析电弧场路耦合模型对不同故障电流等级的适用性。

通过观察电流等级为 20 A 与 5 A 的电缆单相接地故障线路的电弧电流和电压波形, 并与真型试验波形进行对比, 结果如图 13 所示。可以看出, 仿真与试验波形的吻合度依然较高。将 20 A 电流等级的电弧波形暂态特征与 10 A 电流等级下的电弧波形暂态特征进行对比, 其零休时长与击穿电压有所降

低，燃弧电压也略微减小。此外，将 5 A 电流等级的电弧视为本文电弧场路耦合模型在小电流等级下的验证。可以看出，小电流等级下的实际接地电弧虽杂波较多，但整体波形还是与电弧模型的线路仿真相符。将暂态特征对比 10 A 电流等级下的电弧波形，其零休时长与击穿电压有所提高，燃弧电压也略微增大。

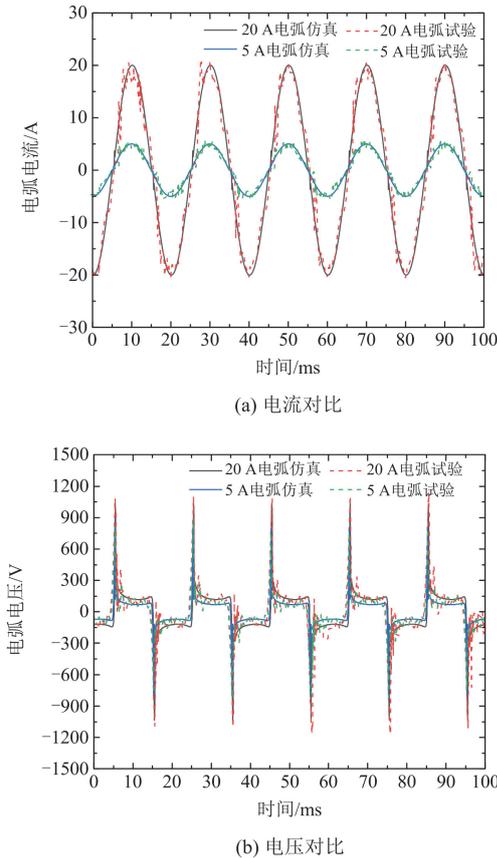


图 13 不同电流等级电缆单相接地故障电弧波形
Fig. 13 Waveforms of single-phase grounding fault arcs of cables with different current levels

根据上述分析，本文电弧场路耦合模型在不同电流等级下的仿真与试验波形吻合度较高，适应度较好，验证了其在不同电流等级故障下的可行性。

3.3 暂态特征变化分析

电缆单相接地故障电弧的暂态特征受故障电流等级的影响，不同故障电流等级下暂态特征变化如图 14 所示。结合物理分析，故障电流等级的提升意味着电弧能量的增大，同时也伴随着更多的电弧功率耗散，然而，电弧耗散功率远小于输入的电弧能量，使得电弧等离子体温度更高，介质恢复速率降低，电弧更易重燃，最终体现在零休时长的缩短。同时，介质恢复较慢意味着电弧再次击穿所需的电压水平

下降，最终体现为击穿电压的减小。此外，等离子体温度高意味着电弧更容易维持导电状态，但受限于介质完全电离后电导率随温度的增长率较小，因此燃弧电压仅是略微降低。从时间常数的角度分析同理，此处不重复叙述。结合 2.3 节的分析可得，单位电弧电导下，电弧耗散功率与零休时长、击穿电压、燃弧电压等暂态特征呈反比，时间常数与零休时长、击穿电压、燃弧电压等暂态特征呈正比。

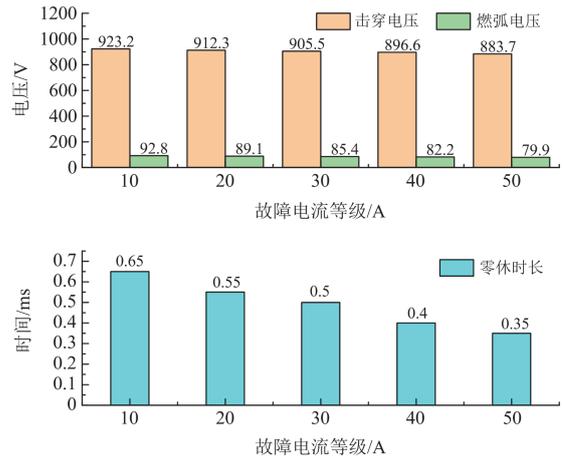


图 14 不同故障电流等级下暂态特征变化
Fig. 14 Transient characteristics changes under different fault current levels

4 结论

本文基于真型试验与磁流体仿真，提出了电缆单相接地故障电弧的场路耦合模型，通过重构电弧耗散功率与时间常数等关键参数并根据故障电流等级修正模型系数，实现了电弧物理场与电路模型的有效耦合。最终，通过线路仿真将所计算电弧波形暂态特征与真型试验对比，验证了模型的有效性与不同电流等级下的适用性，所得结论如下。

1) 电弧场路耦合模型在保留电弧电路特性的基础上充分融合了电弧物理场的综合作用机制。该建模方法不仅准确描述配电网单相接地故障电弧物理演变过程，还突破了传统模型依赖经验与大量实验数据的局限，有效提升了电弧模型精度与工程适用性。

2) 电弧耗散功率与时间常数的变化系数及饱和系数表现出与故障电流等级的非线性关系。经函数化处理，重构了电弧耗散功率与时间常数为电弧电导与故障电流等级的显式函数，实现模型在不同电流等级下对电弧波形与暂态特征的准确复现。

3) 通过与真型试验对比，电弧场路耦合模型在

电流幅值、零休时长、击穿电压、燃弧电压等波形暂态特征的相对误差分别为 1.65%、3.17%、3.24%、4.74%。较传统模型有显著提高, 为增强电缆单相接地故障的灵敏感知与准确识别奠定基础。

参考文献

- [1] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 中国电力企业联合会. 2020 年全国电力可靠性年度报告[R]. 北京: 国家能源局, 2021.
China Electricity Council. National electric power reliability annual report 2020[R]. Beijing: National Energy Administration, 2021.
- [4] WANG G, WANG Y. Simulation analysis of intermittent arcing ground faults in urban distribution networks[C] // 2023 IEEE 4th China International Youth Conference on Electrical Engineering, December 8-10, 2023, Chengdu, China: 1-4.
- [5] 刘素蓉, 胡钰骁, 郑建康, 等. 10 kV 电缆单相电弧接地故障引燃隧道的火灾动态仿真[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4341-4348.
LIU Surong, HU Yuxiao, ZHENG Jiankang, et al. Dynamics simulation of 10 kV cable tunnel fire for single-phase arc grounding fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4341-4348.
- [6] 齐郑, 赵昕一, 陈艳波. 暂态与稳态相不对称信号相结合的配电网单相接地故障感知技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1264-1276.
QI Zheng, ZHAO Xinyi, CHEN Yanbo. Single-phase grounding fault sensing technology in distribution network based on transient and steady state phase asymmetrical signals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1264-1276.
- [7] ZENG H, YANG P, CHENG H, et al. Research on single-phase to ground fault simulation base on a new type neutral point flexible grounding mode[J]. IEEE Access, 2019, 7: 82563-82570.
- [8] 刘丰, 曾祥君, 谢李为, 等. 基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 155-165.
LIU Feng, ZENG Xiangjun, XIE Liwei, et al. Single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 155-165.
- [9] 李林, 高厚磊, 袁通, 等. 基于零序突变量的配电网单相接地故障检测与定位方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(15): 157-167.
LI Lin, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. Detection and location method of single-phase-to-ground fault in distribution network based on zero-sequence transient fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(15): 157-167.
- [10] 邓祥力, 赵磊鑫, 熊小伏, 等. 基于多元暂态特征故障度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 69-80.
DENG Xiangli, ZHAO Leixin, XIONG Xiaofu, et al. A single-phase grounding line selection method for a distribution network based on multivariate transient characteristic fault degree[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 69-80.
- [11] WANG X, DU H, GAO J, et al. Grounding fault location method of overhead line based on dual-axis magnetic field trajectory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-14.
- [12] 陶政臣, 高湛军, 见文号. 基于前后逐段逼近的含多分支配电网单相接地故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 110-119.
TAO Zhengchen, GAO Zhanjun, JIAN Wenhao. A single-phase ground fault ranging method based on back-and-forth segment-by-segment approximation for distribution networks with multiple branches[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 110-119.
- [13] 许守东, 欧阳金鑫, 陈宇捷, 等. 基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 51-60.
XU Shoudong, OUYANG Jinxin, CHEN Yujie, et al. A fault location method for a single-phase fault for a distribution network with DGs based on model recognition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 51-60.
- [14] 张晓鹏, 白洁, 孙乃君, 等. 基于特征融合的 GA-SVM 配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(1): 140-148.
ZHANG Xiaopeng, BAI Jie, SUN Naijun, et al. GA-SVM method for single-phase grounding fault line selection in

- distribution network based on feature fusion[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(1): 140-148.
- [15] 王晓卫, 岳阳, 郭亮, 等. 注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法[J]. *中国电力*, 2024, 57(10): 78-89.
WANG Xiaowei, YUE Yang, GUO Liang, et al. Injection current distribution characteristics identification based distribution-level fault line selection[J]. *Electric Power*, 2024, 57(10): 78-89.
- [16] 郭谋发, 游建章, 郑泽胤. 配电网单相接地故障柔性消弧技术综述[J]. *高电压技术*, 2022, 42(8): 2806-2819.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHENG Zeyin. Survey of flexible arc suppression technology for single-phase-to-ground fault in distribution networks[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [17] RONG F, HUANG C, LIU H, et al. A novel hybrid arc suppression device for single line-to-ground faults[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2023, 153.
- [18] 赵福平, 范松海, 尚豪, 等. 配电网单相接地故障无源柔性消弧策略[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(8): 93-99.
ZHAO Fuping, FAN Songhai, SHANG Hao, et al. Passive flexible arc suppression strategy for single phase grounding fault in distribution network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(8): 93-99.
- [19] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(7): 57-64.
- [20] 藺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 31-39.
LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 31-39.
- [21] 李建南, 张慧媛, 王鲜花, 等. 中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 105-109.
LI Jiannan, ZHANG Huiyuan, WANG Xianhua, et al. Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 105-109.
- [22] 王飞. 小电流接地系统弧光接地模型及仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
WANG Fei. Arc grounding model and simulation in non-effectively grounded system[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [23] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 1-7.
- [24] 张彪, 周申培, 吴细秀, 等. 配电网间歇性重燃电弧模型的建立与断续弧光接地故障特征分析研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(5): 2207-2217.
ZHANG Biao, ZHOU Shenpei, WU Xixiu, et al. Establishment of intermittent reignition arc model and analysis of intermittent arcing ground faults in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(5): 2207-2217.
- [25] 李露露, 李永培, 周新月, 等. 10 kV 交联聚乙烯电缆内部多形态间歇性电弧故障建模[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 6104-6115.
LI Lulu, LI Yongpei, ZHOU Xinyue, et al. Modeling of internal multiform intermittent arc fault for 10 kV XLPE cable[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23): 6104-6115.
- [26] 梁晨光, 王宾, 李凤婷, 等. 高压线路单相弧光接地对数仿真模型数据修正算法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 126-131.
LIANG Chenguang, WANG Bin, LI Fengting, et al. Data correction algorithm of logarithmic simulation model for single phase arc grounding fault on high-voltage transmission line[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 126-131.
- [27] 张帆, 王晓卫, 王新茜, 等. 基于幅值比与相位差的灵活接地系统单相高阻故障检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(11): 41-50.
ZHANG Fan, WANG Xiaowei, WANG Xinqian, et al. Single-phase high-impedance fault detection method for flexible grounding system based on amplitude ratio and phase difference[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(11): 41-50.
- [28] JIANG Run, WANG Yilong, GAO Xiaoqing, et al. AC series arc fault detection based on RLC arc model and convolutional neural network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13): 14618-14627.
- [29] 王宾, 崔鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(11): 3864-3873.
WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution

- network with neutral grounding via arc suppression coil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864-3873.
- [30] 任伟, 薛永端, 杨帆, 等. 中性点不接地配电网电弧接地故障建模与分析[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 705-712. REN Wei, XUE Yongduan, YANG Fan, et al. Modeling and analysis of arc grounding faults in isolated neutral distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 705-712.
- [31] 丛子涵, 刘亚东, 严英杰, 等. 基于磁流体动力学的配电路树-线早期故障仿真分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 562-568. CONG Zihan, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Simulation analysis of tree contact incipient fault in the distribution network based on magnetohydrodynamic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 562-568.
- [32] 崔建, 孙帅, 张国钢, 等. 基于双温度磁流体电弧仿真改进 Mayr 电弧模型的特快速暂态过电压仿真方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5149-5161. CUI Jian, SUN Shuai, ZHANG Guogang, et al. The very fast transient overvoltage simulation method based on two-temperature MHD arc simulation to improve Mayr arc model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5149-5161.
- [33] VERSTUNIN A Y, VEDESHENKOV N A. Using an electric arc model based on MHD plasma theory to determine the parameters of the model Cassie-Mayr[C] // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, February 29-March 2, 2024, Moscow, Russian Federation: 1-4.
- [34] ZHANG Z, NIE Y, LEE W. Approach of voltage characteristics modeling for medium-low-voltage arc fault in short gaps[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2281-2289.
- [35] 刘云鹏, 尹子澳, 刘贺晨, 等. 低频电压下 XLPE 电树枝生长及局部放电特性[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 66-71. LIU Yunpeng, YIN Ziao, LIU Hechen, et al. Propagation and partial discharge characteristics of electrical tree in XLPE cable insulation under low-frequency AC voltage[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 66-71.
- [36] 宋冬冬, 程林, 林志法, 等. 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 932-943. SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 932-943.
- [37] WU Q, YANG K, ZHANG R, et al. Numerical study on instantaneous heat transfer characteristics of AC arc-fault[J]. AIP Advances, 2021, 11(9).
- [38] 荣命哲. 气体放电等离子体基础数据库[D]. 西安: 西安交通大学, 2022. RONG Mingzhe. Basic data base of gas discharge plasma[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2022.

收稿日期: 2025-05-25; 修回日期: 2025-08-21

作者简介:

吴祺嵘(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为电弧等离子体仿真与建模、电缆单相接地故障机理与暂态特征分析; E-mail: wuqirong@stu.xjtu.edu.cn

徐婧涵(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电弧等离子体理论; E-mail: xu_jinghan110@163.com

张国钢(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电器理论与工程、储能与新能源电力系统、电弧等离子体与电接触。E-mail: ggzhang@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 石晋美)