

基于击穿间隙与可变电阻的配电网 弧光接地故障建模分析

李世龙, 张华, 龙呈, 高艺文, 苏学能

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610041)

摘要:配电网弧光接地故障易引发森林火灾及人身触电等事故,弧光接地属时变、非线性故障,准确刻画弧光接地故障特征有利于提升配电网接地故障研究与模拟能力。针对传统的故障模型未考虑故障发展全过程,提出了基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障模型,考虑不同接地介质下弧光电压与电阻的发展过程,建立了击穿间隙与可变电阻解析方程。PSCAD/EMTDC 仿真环境下验证表明,该弧光故障模型电流零休特征明显,电压具有显著的非线性畸变特点,反映了故障的发展特性。在 10 kV 配电网真型试验场进行弧光接地故障现场试验,并将现场试验数据与仿真数据进行对比分析,发现试验数据与模型数据拟合程度高,能真实刻画弧光接地故障特征,为配电网故障消弧、定位、选线奠定了基础,具有较强的实用价值。

关键词:接地故障;建模;电弧;击穿间隙;电阻

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)02-0038-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220208

Modeling and Analysis of Arc Grounding Fault in Distribution Network Based on Breakdown Gap and Variable Resistance

LI Shilong, ZHANG Hua, LONG Cheng, GAO Yiwu, SU Xueneng

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Arc grounding faults in distribution network are very harmful, which may cause equipment explosions, fires and other accidents, and arc grounding is a time-varying and non-linear fault. Accurately characterizing arc grounding faults is beneficial to improve the research and simulation capabilities of grounding faults in distribution network. Aiming at the traditional fault model that does not consider the whole process of fault development, an arc grounding fault model of distribution network based on breakdown gap and variable resistance is proposed. Considering the dynamic development process of arc voltage and resistance under different grounding media, the breakdown gap and variable resistance equation is established. The verification under the PSCAD/EMTDC simulation environment shows that the arc fault model has obvious zero-off characteristics. At the same time, the field test data and the simulation data are compared and analyzed, and it is found that the model can truly describe the arc ground fault characteristics. It lays the foundation for the arc suppression, location, and line selection of distribution network, which has a strong practical value.

Key words: grounding fault; modeling; arc; breakdown gap; resistance

0 引言

配电网故障类型多样,其中单相接地故障发生概率大。接地故障发生时接地点将流过短路电流,电流越大空气介质的损伤越厉害,一旦空气被击穿,

将在故障点产生电弧,又由于故障电流包含多频段正弦波,因此电弧将不断熄灭并重燃,在此过程中积累的能量若得不到有效释放,将导致电弧不断燃烧。电缆线路发生弧光接地故障时,非故障相过电压最高可至正常相电压的几十倍,最终损坏线路绝缘,引起森林火灾、电站爆炸等危险事故^[1-2]。因此有必要展开对配电网接地故障模型的研究,进一步掌握接地故障特征,有利于配电网线路的选线、消弧,减

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52037001);国网四川省电力公司科技项目(52199720002T)

少人身触电、森林火灾等事故发生概率,增强配电网供电可靠性^[3-4]。

文献[5-6]在高压绝缘领域分别提出了基于热平衡的 Cassie 和 Mayr 电弧模型,但是这两种模型均难以全面体现电弧的电阻特性。文献[7-8]通过建立 Cassie-Mayr 组合模型,解决了两种模型动态分配问题,具有较好的零休效应,较精确地描绘了燃弧、熄弧时刻的电弧电压、电流特征。Hochrainer 首先提出了控制论模型,将模型参数由稳态转为动态^[9],国内的学者提出了改进的控制论模型,研究了弧长、风速等因素与电弧的关系,分析了电弧稳态、暂态特性^[10-11]。为解决基于热平衡的 Cassie、Mayr 模型以及改进控制论模型不能准确表示接地故障电阻的问题,文献[12-14]提出了对数电弧模型,较准确地模拟了弧光高阻接地故障熄弧-重燃的故障特征。但是上述的故障模型一方面未考虑高阻接地无电弧情况,另一方面其电弧模型虽考虑了故障的动态过程但均未考虑故障的发展过程,而弧光接地故障在某些情况具有发展过程,因此传统的接地故障模型无法全面刻画接地故障特征^[15-16]。

为解决上述接地故障模型存在的缺点,下面分析了短间隙的电击穿理论与接地故障发展过程,提出了基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障模型,全面刻画接地故障特征,通过 PSCAD/EMT-DC 仿真软件与传统的电弧模型进行对比分析,并进行现场试验验证了模型的正确性。

1 基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障模型

配电网弧光间隙为短间隙,通常采用介质强度恢复理论进行分析,介质强度恢复理论认为交流电弧本质上是间隙在电场作用下形成的电子崩,即交流电弧是间隙被击穿导致的。同时介质强度恢复理论认为发生弧光接地时,间隙存在互不影响的电压恢复过程与介质强度恢复过程,两者之间的博弈决定了电弧是否会重燃。电弧不会重燃的条件是介质强度一直大于恢复电压;电弧发生重燃的条件是某时刻恢复电压大于介质强度,使间隙再次被击穿。在传统故障建模中,一般认为电弧与大地非有效接触产生的电阻为不变电阻^[12]。然而如果接触的是湿树枝等物体,弧光会导致其碳化,改变介质电阻

率,因此配电网线路发生弧光接地故障时,接地故障支路可看作如图 1 所示的间隙被击穿后产生的击穿间隙电弧与可变电阻的串接组合。可变电阻阻值受故障点介质密度、温度等因素的影响。

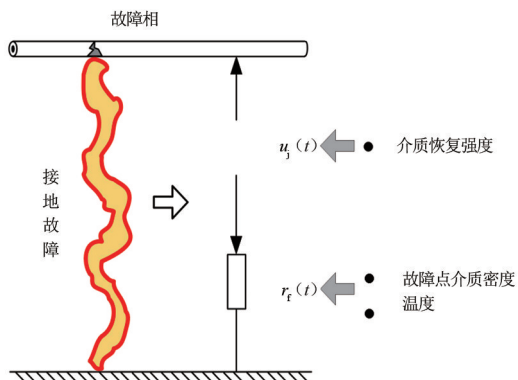


图 1 配电网燃弧模型

故障点电压公式可以用式(1)表示。

$$u_f(t) = u_j(t) + i_f \cdot r_f(t) \quad (1)$$

式中: $u_j(t)$ 为弧光电压; i_f 为接地故障支路电流; $r_f(t)$ 为可变电阻。

下面将对可变电阻模型与击穿间隙电弧模型进行分析,分别建立可变电阻与击穿间隙的故障模型解析式。

2 可变电阻模型

发生单相接地故障后,接地故障电流向接地介质周围扩散,距离接地点越远,扩散电流越小。因此在离接地点较远时,电位接近零电位。接地故障电流分布如图 2 所示。

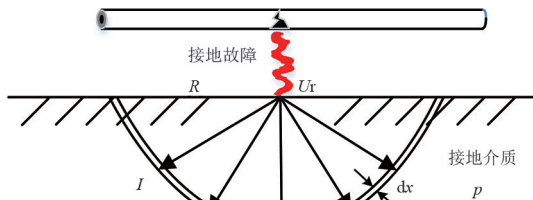


图 2 单相接地电流分布

离接地点半径为 R 时,可认为地电位为 0,则接地电阻为

$$r_f = \int_R^{\infty} \frac{\rho I}{2\pi x^2} dx = -\frac{\rho}{2\pi x} \Big|_R^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi R} \quad (2)$$

式中: ρ 为电阻率; R 为接地点到零电位距离; I 为接地点扩散电流。

经大量实验验证,各类型介质典型的电阻率范

围如表 1 所示^[18]。

表 1 常用电阻率范围

类型	条件	电阻率/($\Omega \cdot m$)
混凝土	放在水中	40~50
	其他	100~1000
黄土	较湿	100~200
	较干	250
砂	较湿	250~1000
	较干	1000~2500
水	含不同离子	1~10 000

弧光高阻接地故障通常具有一定的发展性,比如经树枝接地,弧光高温导致树枝碳化或烧断,使弧光高阻接地故障发展成经电阻接地或无故障。因此还需要考虑故障的发展过程,故障发展所需时间可通过试验测得。

根据上述分析,可以将接地电阻模型修正为可变电阻模型。

$$\begin{cases} r_t = \frac{\rho}{2\pi R} e^{-nt} = r_0 e^{-nt}, t \leq T_1 \\ r_t = \frac{\rho}{2\pi R} e^{-nT_1} = r_0 e^{-nT_1}, t > T_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_0 为初始电阻; n 为不同介质电阻衰减指数; T_1 为经不同介质接地时电阻不再发生变化时间,与介质材料、温度密切相关。

3 击穿间隙电弧模型

根据大量实验,汤森德气体放电理论在 20 世纪初被提出,该理论适用于短间隙的气体放电。初始的自由电子在运动过程中不断造成撞击电离,到达末端的电子数为 e^{ad} 个,当 ad 达到自持放电条件,也就是气体被击穿^[19]。

$$ad \geq \ln(1 + 1/\gamma) \quad (4)$$

式中: a 为碰撞电离系数; d 为气隙长度; γ 为平均自由行程。

同时,支路故障电流为

$$i_t = I_s e^{ad} \quad (5)$$

式中, I_s 为外因素引起的饱和电流。

又因为 a 和 E 在空气中呈近似正比,因此有

$$\begin{cases} a = kE \\ u_j = Ed \end{cases} \quad (6)$$

式中, E 为空气中电场强度。联立式(5)、式(6),电弧电压可以用式(7)表示^[13]。

$$u_j = \text{sgn}(i_t) (1/k) \cdot \ln\left(\frac{|i_t|}{I_s} + 1\right) \quad (7)$$

式中: sgn 为符号函数,此处即为取 i_t 参数的正负; u_j 为电弧电压; $1/k$ 与 I_s 为一常数, $1/k$ 一般选取为线路电压的 10%, I_s 依据线路参量确定。

当故障发展为无电弧后,电弧电压 $u_j = 0$,因此,击穿间隙电弧模型可表示为

$$\begin{cases} u_j = \text{sgn}(i_0) (1/k) \cdot \ln\left(\frac{|i_0|}{I_s} + 1\right), t \leq T_2 \\ u_j = 0, t > T_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_2 为不同介质从弧光接地故障发展为经电阻接地故障或无故障等无电弧情况时间。

上面针对配电网接地故障特征,提出了基于可变电阻与击穿间隙电弧的接地故障模型,与现有模型相比,考虑了接地故障的发展过程,能够适应各种接地故障类型。

4 配电网接地故障模型仿真试验分析

4.1 仿真分析

使用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建仿真模型如图 3 所示,配电路模型中包含 2 条电缆线路、1 条架空线路。线路的具体参数见表 2,消弧线圈的补偿度取 8%,L1、L2、L3 分别代表 3 条线路的负载。为了对比各电弧模型的特征,分别采用基于热平衡的 Mayr 电弧模型、Cassie 电弧模型以及基于击穿间隙与可变电阻的电弧模型模拟高阻弧光接地故障。

故障点采用 Mayr 电弧模型得到的电流波形如图 4 所示,从波形可以看出,由于接地电阻设置为 500Ω ,属于高阻接地,故障电流呈现小幅度的畸变,零休特性表现不明显。由此可知,采用基于热平衡的 Mayr 方程描述高阻接地故障时,由于电流幅值较小,能量易平衡,存在较大误差。

表 2 架空线和电缆线参数

线路类型	$R_1/(\Omega \cdot km^{-1})$	$L_1/(mH \cdot km^{-1})$	$C_1/(\mu F \cdot km^{-1})$	$R_0/(\Omega \cdot km^{-1})$	$L_0/(mH \cdot km^{-1})$	$C_0/(\mu F \cdot km^{-1})$
架空线	0.180 0	1.209 6	0.009 7	0.230 0	5.474 9	0.006 0
电缆线	0.270 0	0.255 0	0.339 0	2.700 0	1.019 0	0.280 0

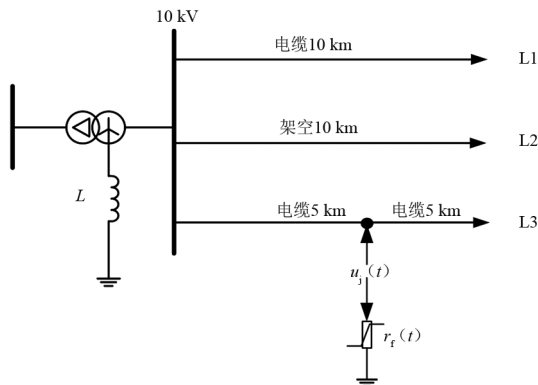


图 3 弧光高阻接地故障仿真模型

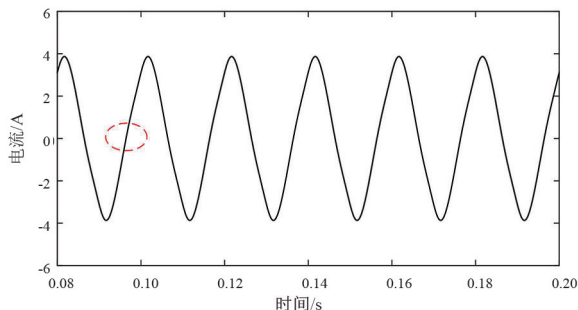


图 4 高阻接地故障电流 (Mayr 电弧模型)

故障点采用 Cassie 电弧模型得到的仿真波形如图 5 所示,从波形可以看出,相比于 Mayr 电弧模型,借助 Cassie 电弧模型得到的弧光高阻接地故障电流能够看出电弧的零休特性,但依旧忽略了接地电阻的发展过程。

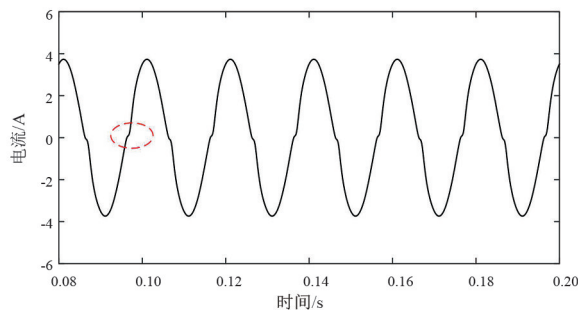


图 5 高阻接地故障电流 (Cassie 电弧模型)

故障点采用基于击穿间隙电弧与可变电阻的故障模型,分别模拟故障电阻不变的弧光接地故障和故障电阻非线性变化的弧光接地故障,得到的仿真波形如图 6—图 9 所示。

从图中可以看出,基于击穿间隙电弧与可变电阻的接地故障模型电流波形表现出非常明显的零休特性,弧光高阻接地故障具有明显的间歇性特征,电流零休时间较长,同时弧光高阻接地故障的电压、电流波形发生了明显的非线性畸变,充分反映了故障的发展过程。该仿真结果能够较好地反映高阻接地故障

的特征,证明所研究的基于击穿间隙电弧与可变电阻的配电网弧光接地故障模型比基于热平衡的故障模型更适合于精确描述配电网高阻接地故障。

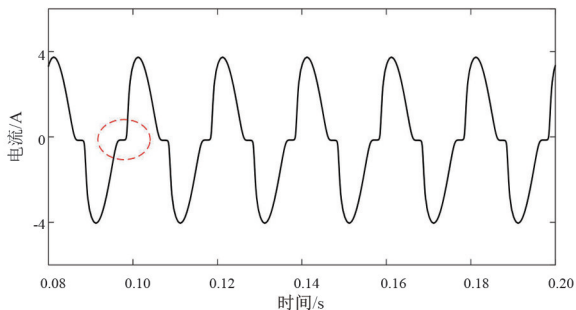


图 6 高阻接地故障电流 ($n=0, T_1=0, T_2=\infty$)

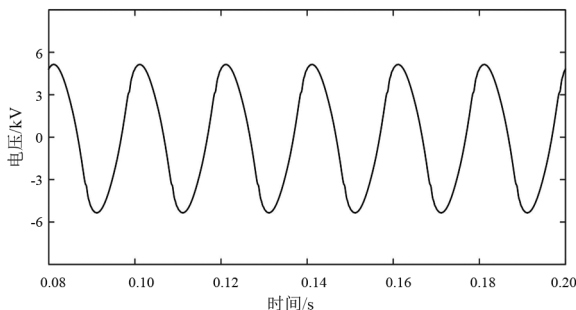


图 7 高阻接地故障电压 ($n=0, T_1=0, T_2=\infty$)

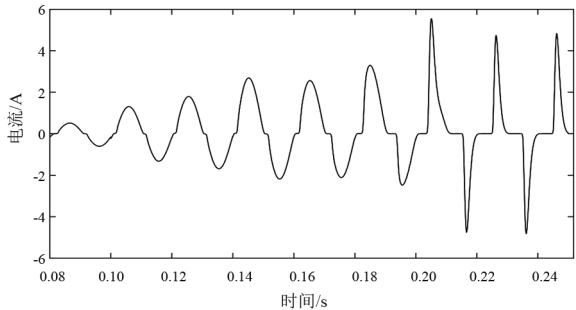


图 8 可变电阻接地故障电流 ($n=6, T_1=0.2, T_2=\infty$)

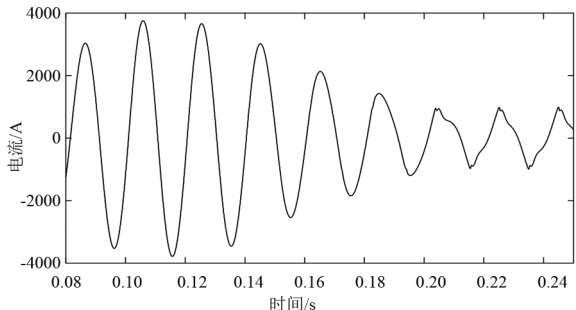


图 9 可变电阻接地故障电压 ($n=6, T_1=0.2, T_2=\infty$)

4.2 试验分析

为验证所提出模型,在配电网真型试验场模拟真实 10 kV 变电站经不同介质接地故障实验,采用真实电缆模拟短间隙放电环境。实验采用嵌入式电力故障录波分析装置,采样频率可达 20 kHz。

设置配电网接地运行方式为中性点不接地方方式,电容电流为 10 A,三相电压基本平衡,分别模拟 10 kV 母线 A 相线路经干草地、鹅卵石接地场景,现场接地故障设置情况如图 10 所示。

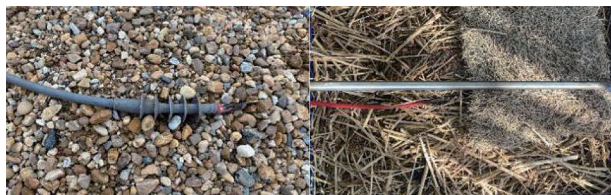


图 10 经干草地、鹅卵石接地场景

经鹅卵石接地故障电流、故障电阻如图 11、图 12 所示。

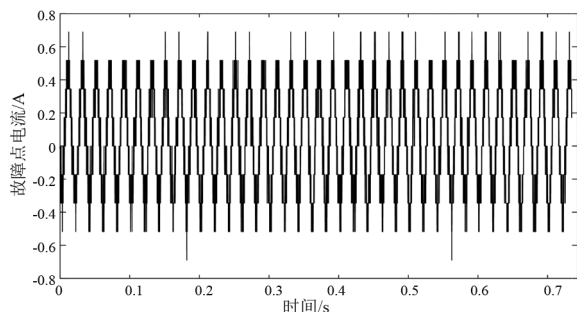


图 11 经鹅卵石接地故障电流

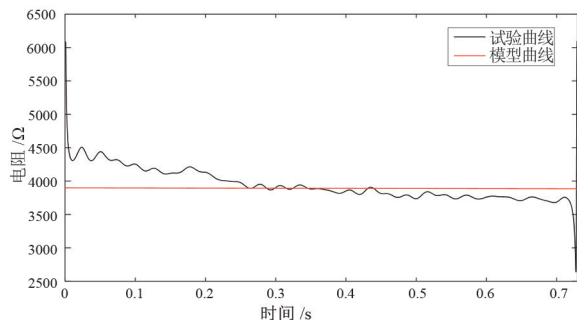


图 12 经鹅卵石接地故障电阻

从图可知,经鹅卵石接地故障电阻变化小,此时可以用 $r_0 = 3900 \Omega$ 、 $n = 0$ 、 $T_1 = \infty$ 、 $T_2 = \infty$ 表示故障电阻,实测电流与仿真电流波形较一致。

经干草地接地故障电流、故障电阻如图 13、图 14 所示。由图可知,经干草地接地故障电阻变化大,此时可用 $r_0 = 4900 \Omega$ 、 $n = 4.7$ 、 $T_1 = 0.15$ 、 $T_2 = \infty$ 模拟接地电阻,接地故障模型在 0.25 s 前符合实际接地情况,满足故障消弧、选线要求。0.25 s 之后,由于干草地试验故障电流非线性畸变大,故障模型能有效模拟这一特征。

经过仿真和试验分析,所提出的基于击穿间隙电弧与可变电阻的配电网接地故障模型能充分反映高阻接地故障特征,具有较强的实用性。

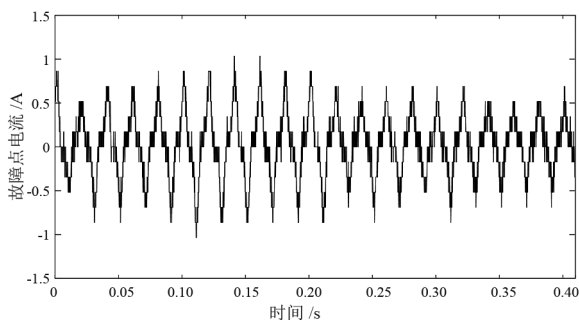


图 13 经干草地接地故障电流

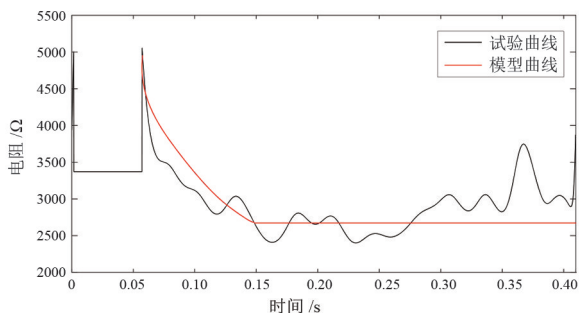


图 14 经干草地接地故障电阻

5 结论

针对以往接地故障模型不能反应故障发展全过程的问题,上面通过汤森德理论描述击穿间隙,考虑了接地介质变化而导致的故障的发展过程,提出了基于击穿间隙电弧与可变电阻的配电网电缆高阻接地故障模型。PSCAD/EMTDC 仿真表明,该模型具有明显的零休特征且能够刻画故障的发展过程,同时在配电网真型试验场进行现场试验,试验数据验证了模型的正确性,为后续电弧及其引发的森林火灾预防提供了研究理论思路。针对接地故障介质类型多样,后续将对各种介质的介质电阻衰减常数与故障发展时间进行量化分析。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王宾,崔鑫,董新洲.配电网线路弧光高阻故障检测技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):96-107.

(下转第 73 页)

由于负荷同时率特性,地区 1 通过 P2G 设备为地区 2 供应天然气会受到限制,会影响燃气轮机解决地区 2 供电缺口问题;此外由于燃气轮机受到地区 1 P2G 设备制造天然气影响,不适宜投资功率过大的 P2G 设备,在后续研究中将通过其他不受设备和负荷同时率限制的设备参与调度,解决供电缺口问题。

参考文献

- [1] 黄国栋,许丹,崔晖,等.互联电网安全约束经济调度场景构建方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):136-143.
- [2] 杨悦,陈仕军,杨博宇,等.基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究[J].四川电力技术,2021,44(2):24-27.
- [3] 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,等.大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究[J].四川电力技术,2021,44(2):19-23.
- [4] 林从城,方万煜.含风电场的水火电力系统的多目标优化调度[J].山东电力技术,2019,46(10):7-12.
- [5] 施泉生,丁建勇,晏伟,等.基于能量流含 P2G 电-热系统风电消纳优化运行[J].太阳能学报,2021,42(5):394-400.

- [6] 殷作洋,赵银波,杨景茜,等.基于场景分析的含 P2G 装置电气能源系统协同优化[J].电力建设,2021,42(3):1-9.
- [7] 卢炳文,魏震波,魏平桢,等.考虑消纳风电的区域综合能源系统电转气与储能设备优化配置[J].智慧电力,2021,49(5):7-14.
- [8] 王世萱,朱武.含冰蓄冷空调的 CCHP 微电网优化调度[J].上海电力大学学报,2021,37(1):37-43.
- [9] 魏震波,魏平桢,郭毅,等.考虑跨区能流交互计划的多区域电-气综合能源系统分散调度方法[J].电力建设,2020,41(12):66-79.
- [10] 曾方迪,李更丰,别朝红,等.考虑跨区联络线交易计划的多区域互联系统分散调度方法[J].电力系统自动化,2018,42(16):32-40.
- [11] 肖峻,秋泽楷,李航,等.基于安全边界几何观测的配电网改造规划实用方法[J].电力自动化设备,2021,41(8):1-7.

作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,主要研究方向电力系统调度及新能源消纳。

(收稿日期:2021-08-05)

(上接第 42 页)

- [4] 耿建昭,王宾,董新洲,等.中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J].电力系统自动化,2013,37(16):85-91.
- [5] Cassie A M. Arc rupture and circuit severity: A new theory[R]. Paris, France: CIGRE Report No.102, 1939:1-16.
- [6] Mayr O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens [J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1943,37(12):588-608.
- [7] 杨明波,龙毅,樊三军,等.基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J].电测与仪表,2019,56(10):8-13.
- [8] 曾晗,王利娜,林文萱,等.新型动态变弧长模型在接地弧光中的应用研究[J].计算机仿真,2021,38(6):315-320.
- [9] A Hochrainer, A Grütz. Study of arcs in breakers with the help of a cybernetic model [J]. CIGRE Report No. 13-10, Part A, 1972:1-14.
- [10] 俞小勇,秦丽文,欧阳健娜.间歇性电弧接地故障建模分析[J].南方电网技术,2019,13(12):67-73.
- [11] 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.
- [12] 王宾,耿建昭,董新洲.基于介质击穿原理的配电线路

高阻接地故障精确建模[J].电力系统自动化,2014,38(12):62-66.

- [13] 孙月琴,倪江,王宾,等.应用于输电线路单端测距的高阻接地故障电弧模型分析[J].电力系统自动化,2016,40(22):86-92.
- [14] 邵庆祝,崔鑫,谢民,等.弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J].电力系统自动化,2021,45(11):120-125.
- [15] 许颖.对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J].电网技术,2002,26(10):75-77.
- [16] 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.
- [17] 郭霖徽.配电网线路故障类型辨识方法研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [18] 祝应宏,段伟强.电力勘察中土壤电阻率测试分析研究[J].工程勘察,2011,39(12):82-85.
- [19] 沈其工,方瑜,周泽存,等.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2012.

作者简介:

李世龙(1989),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能配电网、电力系统继电保护。

(收稿日期:2021-09-08)