

穿越森林草原配电线路的一二次融合成套柱上开关优化布置研究

高艺文¹, 罗凡波², 苏学能¹, 李世龙¹, 龙呈¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司达州供电公司, 四川 达州 635000)

摘要: 目前供电公司 10 kV 配电线路的一二次融合成套柱上开关仅凭经验进行安装布置, 其安装数量和安装位置会直接影响穿越森林草原配电线路的故障处置效果。为了科学地开展一二次融合成套柱上开关安装选址, 文中提出基于改进 DBPSO 优化的穿越森林草原配电线路一二次融合成套柱上开关优化布置算法。实验结果表明, 该算法能通过较少的迭代次数实现最优一二次融合成套柱上开关位置组合的获得, 为配电网一二次融合成套柱上开关安装选址提供科学参考, 充分发挥其故障处置的实际效果。

关键词: 森林草原火灾; DBPSO; 一二次融合成套柱上开关; 火灾概率; 最优开关位置

中图分类号: TM 76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)04-0026-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220406

Research on Optimal Placement for Complete Set of Primary and Secondary Integrated Overhead Pole Mounted Switch in Distribution Lines through Forest and Grassland

GAO Yiwen¹, LUO Fanbo², SU Xueneng¹, LI Shilong¹, LONG Cheng¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Dazhou Electric Power Supply Company, Dazhou 635000, Sichuan, China)

Abstract: At present, the installation and placement of the complete set of overhead pole mounted switches for the primary and secondary integration of 10 kV distribution lines of power supply company is only based on experiences, and its installation quantity and location will directly affect the fault disposal effect of the distribution lines passing through forests and grasslands. In order to scientifically carry out switch installation and location, an optimal placement algorithm for the complete set of overhead pole mounted switches based on the improved discrete binary particle swarm optimization (DBPSO) is proposed. The test results show that the proposed algorithm can achieve the optimal switch location combination through fewer iterations, which can provide a scientific reference for the installation and location of the primary and secondary integrated overhead pole mounted switch in distribution network, and give full play to the actual effect of switch fault disposal.

Key words: forest and grassland fire; discrete binary particle swarm optimization (DBPSO); complete set of primary and secondary integrated overhead pole mounted switch; fire probability; optimal switch position

0 引言

近年来, 因配电线路断线或接地故障引发火灾的风险开始凸显^[1], 如何有效识别配电线路断线和接地故障成为电力行业关注的重点。随着配电网智能化和数字化发展, 一二次融合成套设备开始涌现,

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521997190014)

成套设备的功能大幅提升, 其中故障就地快速处理能力成为基本配置^[2]。经过国内多家检测机构试验验证和电力企业运行实践, 开始在配电线路推广安装一二次融合成套设备, 从本质上提升配电网的故障处理能力, 降低线路断线或接地故障引发火灾的概率^[3-7]。

随着一二次融合成套柱上开关的大量应用, 在设备的选址上遇到以下现实问题^[8-10]: 1) 根据相关

规程,配电网线路建议分为3~4段安装2~3个断路器或分段负荷开关,可酌情在主要分支处安装分段负荷开关;由于该规定并未考虑供电可靠性的问题,可参考意义大打折扣。2)目前配电网设备优化选址主要集中在配电智能终端上,如馈线终端(feeder terminal unit, FTU),但大多从经济性角度考虑最佳选址方案。3)国内外研究暂未考虑穿越森林草原的配电网线路风险对一二次融合成套柱上开关选址的影响。4)部分电力企业为了确保一二次融合成套柱上开关的接地故障保护功能可覆盖整条线路,在变电站出线断路器后的线路第一个杆塔处安装该设备,虽然可减少现场运行维护压力,却损失了供电可靠性。

综上,下面从配电网防山火的实际需求出发,针对穿越森林草原配电网线路存在火灾风险与供电可靠性等问题,提出一二次融合成套柱上开关(下称融合成套开关)选址的火灾风险影响指标和供电可靠性指标,建立融合成套开关选址的目标函数,利用改进离散二进制粒子群(discrete binary particle swarm optimization, DBPSO)优化智能算法进行最优融合成套开关安装位置求解,最后通过算例验证了所提方法的可行性和有效性,为穿越森林草原配电网线路的融合成套开关的选址提供科学参考。

1 断路器保护范围与供电可靠性

1.1 断路器保护范围计算

融合成套开关安装后按照目前配电网线路断路器保护整定原则^[11],其保护整定范围为该融合成套开关下游所有区域,当同条线路上安装多个断路器时,通过上下游时延进行级差配合,实现故障区段快速隔离^[12]。下面将借助图1所示配电网进行说明。

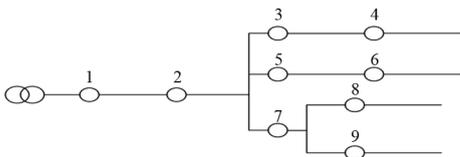


图1 配电网结构

根据上述保护范围整定规则,针对图1的简单配电网,在位置3和7安装融合成套开关后各断路器保护范围如图2所示。

考虑配电网线路不同线段穿越森林草原的实际情况,尽管森林草原中的配电网线路区段已经明确且固定,但融合成套开关的位置可以进行变化,以新装

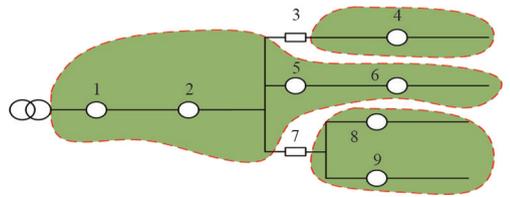


图2 保护范围

融合成套开关后尽可能多地使火灾风险线路均在保护范围内为目标,实现最大范围的风险线路保护,结合如电压时间型、电压电流时间型、自适应综合型等就地馈线自动化功能实现故障区段快速隔离恢复非故障区段供电,进而提高供电可靠性。根据变电站出线断路器以及新装融合成套开关安装位置确定的保护范围,计及火灾风险影响断路器保护范围指标如式(1)所示。

$$R = \sum_{i=1}^n r_i \cdot L_i \cdot m_i \quad (1)$$

式中: R 为计及火灾风险影响的断路器保护范围; r_i 为第 i 条线段火灾风险指数(考虑森林草原线路沿线的火灾风险等级、线路通道和设备本体健康程度等); L_i 为第 i 条线段长度; m_i 为第 i 条线段是否在保护范围内,“是”时值为1,“否”时值为0。

1.2 供电可靠性的影响计算

断路器安装后,当断路器保护范围内发生故障时,断路器会立刻跳开,保护范围内的线路会立即停电,待故障消除后该区域才会恢复供电,进而影响该区域的供电可靠性。为缩小故障停电区域,在线路不同位置安装融合成套开关后,因融合成套开关之间保护配合,当故障发生时能快速隔离故障区。停电区域和停电用户受融合成套开关安装的具体位置影响,其选址对供电可靠性的影响指标可表述为

$$T = \frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k L_k q t}{\sum_{j=1}^n L_j q} \quad (2)$$

式中: T 为用户年均故障停电时间; λ_k 为第 k 个断路器(包含出线断路器和融合成套开关)可靠保护范围线段故障概率之和; L_k 为第 k 个断路器(包含出线断路器和融合成套开关)可靠保护范围内线段长度之和; t 为单次故障停电时间(包含故障查找时间和故障修复时间); L_j 为第 j 条线段的长度; q 为每公里用户数。

2 改进 DBPSO 优化融合成套开关位置选取

受限于配电网资金投入、线路实际运行情况、现场运行维护等多方面因素影响,不可能在配电网线路的每一个断路器位置进行融合成套开关安装,故在一定融合成套开关数量下,结合各断路器的线路保护范围、各断路器保护的线路长度、各断路器保护范围内线路故障概率、各断路器保护范围内线路沿线火灾概率等因素,实现线路一定数量的融合成套开关最优位置安装,使其能实现最大程度的线路保护,降低线路引发森林草原火灾概率。为实现融合成套开关的最优位置安装,通过改进 DBPSO 算法^[13]结合所提出的目标函数,实现对融合成套开关安装位置的最优选取。

2.1 粒子群算法原理

粒子群 (particle swarm optimization, PSO)^[14] 算法广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法等领域,粒子通过模拟鸟的捕食过程实现寻优。粒子具有两个属性:速度 V 和位置 X ,速度代表粒子在参数空间移动的快慢,位置代表粒子在参数空间的移动方向。粒子在一定区间内单独进行最优解搜寻,并将获得的最优解记为当前个体极值 P_{best} ,再将其传递给其他粒子,找到最优个体极值作为当前整个粒子群体全局最优解 G_{best} ;所有粒子与全局最优解进行比较,进而调整自己的 V 和 X 。

PSO 算法的一般迭代方程为

$$V_{i,G+1} = w \times V_{i,G} + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{i,G} - X_{i,G}) + c_2 \times \text{rand}() \times (P_{g,G} - X_{i,G})$$

$$S(V_{i,G+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-V_{i,G+1})}$$

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand}() \leq S(V_{i,G+1}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: G 为 PSO 迭代的代数; $V_{i,G}$ 为第 i 个粒子前 G 代迭代中的速度; $X_{i,G}$ 为第 i 个粒子前 G 代迭代中的位置; $P_{i,G}$ 为第 i 个粒子在前 G 代迭代中寻找到的最优适应值的位置信息; $P_{g,G}$ 为在前 G 代迭代中种群找到的最优适应值的位置信息; w 为惯性权重; c_1 为局部学习因子; c_2 为全局学习因子; $S(V_{i,G+1})$ 为粒子轨迹为 1 的概率; $X_{i,G+1}$ 为位置绝对变化取值。

2.2 改进粒子速度与位置更新公式

针对所提问题,融合成套开关是否在相应的位置进行安装反映为矩阵形式是含 0-1 的矩阵,属于 DBPSO 优化问题,所以需对粒子的位置更新公式做相应的修改。以 20 节点配电网线路安装 3 个融合成套开关为例,对速度变化通过比对当前个体极值对应的融合成套开关组合与全局极值对应的融合成套开关组合的情况,判断有多少个不同的融合成套开关位置。当不同位置数小于 2,融合成套开关位置不变;当不同位置数大于 2,以一定概率进行融合成套开关位置变化更新。具体更新公式如式(4)所示。

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} x_i = 1 & \text{if } \text{rand}() > 0.5 \&\& k < 3 \parallel q > 16 \\ x_i = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_{i,G+1}$ 为融合成套开关位置的更新结果; $\text{rand}() > 0.5 \&\& k < 3 \parallel q > 16$ 是确保该条 20 节点线路上仅进行 3 个融合成套开关的安装,即组合矩阵中只能有 3 个 1;当有 3 个 1 出现即证明融合成套开关分配完毕,其余位置值均为 0。通过上述办法实现融合成套开关位置按一定概率进行更新,避免算法陷入局部最优。

2.3 目标函数

优化问题是想让算法达到设定的目标,为了实现目标,需构造一个目标函数,通过使目标函数取最大值或最小值,从而使优化算法优化方向向最优解不断靠近,最终求得最优解。所提目标函数由通过配电网线路参数计算得到的融合成套开关保护范围 R 与用户年均故障停电时间 T 两个参数相除构成。融合成套开关保护范围 R 越大,代表其保护范围越大,保护作用得到更大的体现;年均故障停电时间 T 越小,代表供电可靠性越高,用户停电时间越短。所提目标函数所表征的是既满足线路保护范围尽可能大,又满足年均故障停电时间尽可能少,这两个因素之间相互影响。但并不意味着单一参数最优,最终的融合成套开关安装位置就是最好,应取两个参数相对最优,即在考虑线路保护范围情况下也对供电可靠性进行充分考虑。故使用融合成套开关保护范围 R 与用户年均故障停电时间 T 相除,取其最大值构成目标函数,即使 R 、 T 取相对最优。具体如式(5)所示。

$$f(x) = \max \frac{\sum_{i=1}^n r_i L_i m_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k L_k q t} \sum_{j=1}^n L_j q \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 为目标函数值。

2.4 算法流程

1) 完成线路相关参数输入, 完成各融合成套开关安装位置保护范围、保护范围内故障概率、保护范围内火灾概率、保护范围内年均停电时间等参数的计算。

2) 完成 DBPSO 相关参数初始化, 输入粒子种群数、学习因子、惯性权重、种群位置、种群速度、迭代次数等相关参数的初始化赋值。

3) 通过设定的目标函数, 更新粒子位置、速度、局部最优值与全局最优值等对最优融合成套开关组合进行寻优。

4) 寻找到最优个体即最优融合成套开关位置组合, 达到设定的迭代次数, 输出最优融合成套开关位置组合, 算法结束。

算法寻优过程流程如图 3 所示。

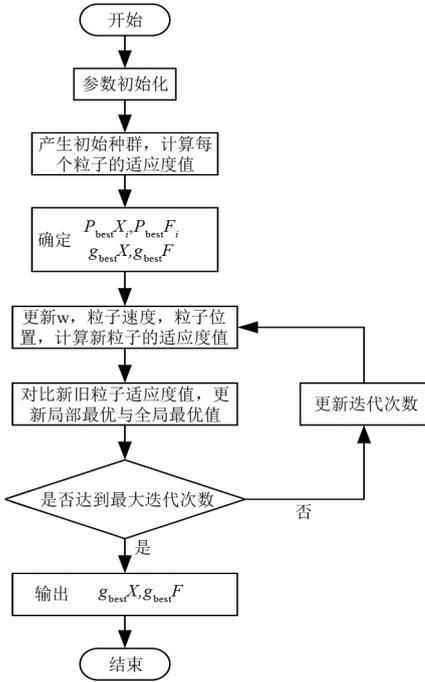


图 3 算法寻优过程流程

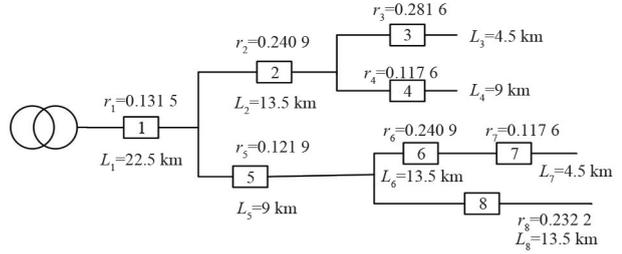
3 算例验证

实验环境: CPU 为 Intel (R) Core (TM) i5-3230M+2.60GHz+matlab2016a, 实验分别进行了 8 节点与 20 节点的配电网线路最优融合成套开关位置选择。算例中的线路区段火灾概率与线路区段故障概率等数据来源于文献[15-17]。对于模型的适用性, 在不同区域使用所提算法进行融合成套开关安装位置选取时, 需根据当地穿越森林草原配电网实际运行情况来选取当地实际的历史线路火灾

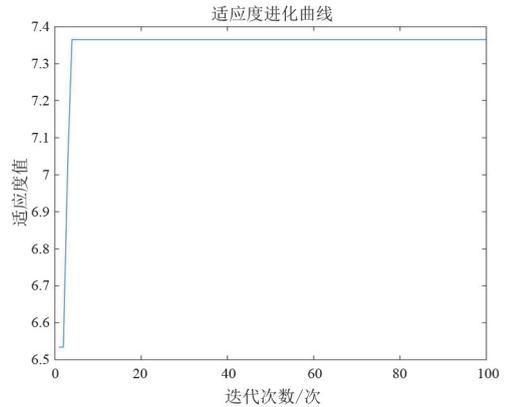
概率、线路故障概率与故障停电时间。

3.1 8 节点配电网线路最优融合成套开关位置选择

8 节点配电网线路模型融合成套开关选址实验结果如图 4 所示。



(a) 线路拓扑结构与线路相关参数



(b) 线路开关位置适应度进化曲线

图 4 8 节点配电网迭代寻优结果

图 4(a) 为 8 节点配电网线路模型。图中 1~8 为线路可安装融合成套开关位置, 融合成套开关位置安装与否用 0 或 1 表示, 1 表示在该位置安装融合成套开关, 0 表示不安装融合成套开关。对该配电网进行 3 个融合成套开关位置选取, 构成融合成套开关安装 0-1 矩阵。此外标明了线路上各位置断路器的保护线路范围与线路故障概率, 结合前面两个指标构造的目标函数, 当目标函数取得最大值时, 认为找到了最优融合成套开关组合。通过仿真结果图 4(b) 可以看出, 在种群规模设置为 10 时, 迭代 4 次即达到最优值, 得到了最优的融合成套开关位置组合 [0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0], 其断路器保护范围值为 14.182 7, 年均停电时间为 1.925 6 h。与其他 5 个依靠经验选取的融合成套开关位置组合对比结果如表 1 所示。

通过表 1 可以看出, 多因素下的断路器保护范围最大达到了 $R=16.549 7$, 年均停电时间最低为 $T=1.925 6$ h。最优融合成套开关位置并不意味着在融合成套开关组合中断路器保护值最大或年均停电时间最少, 最优融合成套开关组合是充分考虑各断路器保护线路范围长度, 以及保护范围内线路故

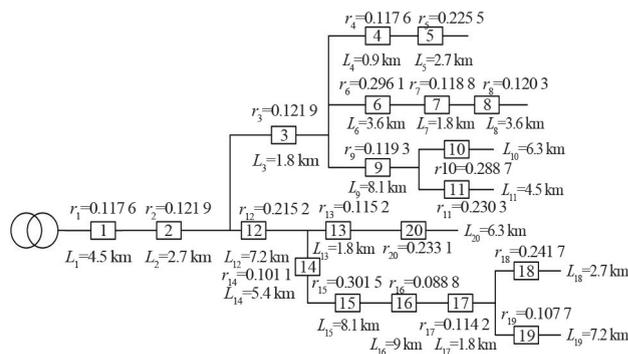
障概率和火灾概率等多个因素下的一个相对最优融合成套开关安装位置组合。反映到数据表现层面,就是在所计算得到的断路器保护范围与年均停电时间两个指标下取相对最优值,不是单一考虑某一指标最优。

表 1 8 节点不同融合成套开关位置组合的指标计算结果

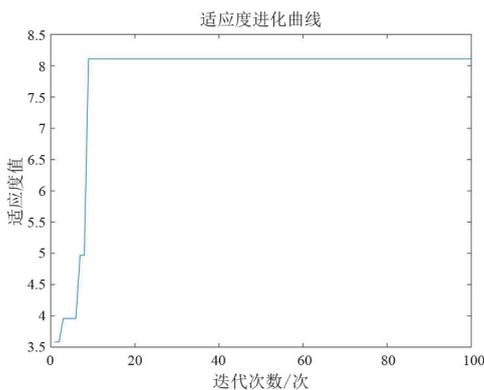
融合成套开关组合	断路器保护值 R	年均停电时间 T/h	R/T
最优值[01001100]	14.182 7	1.925 6	7.365 1
经验值[11001000]	16.549 7	2.727 9	6.066 9
经验值[10101000]	16.549 7	2.898 7	5.709 2
经验值[01001001]	14.182 7	2.019 3	7.023 6
经验值[01001010]	14.182 7	2.343 9	6.050 8
经验值[11000001]	16.549 7	2.817 0	5.874 9

3.2 20 节点配电网线路最优融合成套开关位置选择

20 节点配电网线路模型融合成套开关选址实验结果如图 5 所示。



(a) 线路拓扑结构与线路相关参数



(b) 线路开关位置适应度进化曲线

图 5 20 节点配电网图迭代寻优结果

图 5(a) 为 20 节点配电网线路模型。图中 1~20 为线路可安装一二次成套开关位置,对该配电网进行 3 个融合成套开关位置选取。通过仿真结果图 5(b) 可以看出,在种群规模设置为 200 时,迭代 9 次达到最优值,得到了最优的开关位置组合为 [0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0],

其断路器保护范围值 R 为 14.046 8,年均停电时间 T 为 4.931 3 h。与其他 5 个经验选取的融合成套开关位置组合对比结果如表 2 所示。

表 2 20 节点不同融合成套开关位置组合的指标计算结果

融合成套开关组合	断路器保护值 R	年均停电时间 T/h	R/T
最优值[0010000000010010000]	14.046 8	1.732 5	8.107 8
经验值[00100100000000000000]	15.973 0	11.164 5	1.430 7
经验值[00100000000001000010000]	15.286 4	2.276 8	6.713 9
经验值[0001000100001000000000]	11.029 8	6.885 6	1.601 9
经验值[01000000001000000000]	15.549 7	7.032 9	2.211 0
经验值[01001000010000000000]	15.548 7	11.914 2	1.305 1

通过表 2 可以看出,多因素下断路器保护值最大达到了 15.549 7,年均停电时间最低为 4.931 3 h,结合图 5(b) 可知随着配电网规模越大,融合成套开关可选位置越多求得最优解所需的迭代次数也会增加。但所提寻优算法在 20 节点的配电网规模下,通过 9 次即找到最优融合成套开关组合,表明所提算法具有较强的寻优求解能力,在复杂的配电网结构下,也能很快得到寻优结果。

4 结 论

上面通过各断路器的线路保护范围、保护的线路长度、保护范围内线路故障概率、保护范围内线路火灾概率等因素,计算在多因素下断路器保护范围 R 与年均用户停电时间 T ,进而构造目标函数,通过改进 DBPSO 进行融合成套开关位置组合寻优,得到计及穿越森林草原配电网线路火灾风险因素的融合成套开关最优安装位置选取。最后的算例验证也表明该方法的可行性与有效性,给融合成套开关的安装选址提供了新的方法,有利于穿越森林草原配电网线路火灾防范。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 宫璇,任欣欣,王秋杰,等.具有高容错稳定性的含 DG 配电网区段定位方法[J].高电压技术,2021,47(11):3992-4006.

- [3] 胡国,颜云松,吴海,等.基于主配协同的配电网紧急负荷控制策略及终端实现[J].电力系统自动化,2022,46(2):180-187.
- [4] 吕军,盛万兴,刘日亮,等.配电网物联网设计与应用[J].高电压技术,2019,45(6):1681-1688.
- [5] 郑国华,黄朵,张伟,等.基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J].电力系统保护与控制,2017,46(16):105-110.
- [6] 刘皓璐,邵建伟,王雪,等.基于数字孪生的配电自动化终端设备状态评价与故障预判[J].电网技术,2022,46(4):1605-1613.
- [7] 王东芳,黄国权,黄廷城,等.一二次融合柱上开关组合加权模糊状态评价[J].浙江电力,2020,39(2):48-52.
- [8] 周勳,么军,姚远,等.基于故障可观性指标的配电网FTU最优配置模型研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):117-124.
- [9] 闫磊,李远,赵文娜.关于配网自动化终端布点优化的研究[J].国外电子测量技术,2019,38(10):49-53.
- [10] 刘小春,伍惠斌,李映雪,等.配电自动化终端配置的双层优化模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):136-144.
- [11] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):179-184.
- [12] 刘小春,王巍璋,姚文昊,等.中压配电网故障处理模式配置研究综述[J].电测与仪表,2021,58(10):49-58.
- [13] 白宗璠,竞霞,张腾,等.MDBPSO算法优化的全波段光谱数据协同冠层SIF监测小麦条锈病[J].作物学报,2020,46(8):1248-1257.
- [14] 罗凡波,王平,徐桂菲,等.基于多尺度卷积神经网络的人群聚集异常预测[J].计算机工程与科学,2020,42(12):2223-2232.
- [15] 谢桦,亚夏尔·吐尔洪,陈昊,等.基于支持向量机算法的配电线路时变状态预测方法[J].电力系统自动化,2020,44(18):74-80.
- [16] 谢桦,陈昊,张沛.配电线路多源数据挖掘时变故障概率计算[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(9):63-67.
- [17] 刘辉,李鹏飞,林济铿,等.基于元胞自动机的山火蔓延及电力线路故障概率计算新方法[J].中国电力,2019,52(11):85-93.

作者简介:

高艺文(1989),男,高级工程师,主要研究方向为配电网自动化、继电保护。(收稿日期:2021-12-08)

(上接第15页)

参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等.基于改进SVD算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J].高电压技术,2021,47(2):705-713.
- [2] 李乃一,曹俊平,王少华,等.高压交联聚乙烯电缆附件典型缺陷局部放电特性分析[J].浙江电力,2019,38(1):58-63.
- [3] 唐炬,黄江岸,张晓星,等.局部放电在线监测中混频周期性窄带干扰的抑制[J].中国电机工程学报,2010,30(13):121-127.
- [4] 樊高辉,刘尚合,刘卫东,等.FFT谱最小熵解卷积滤波抑制放电信号中的周期性窄带干扰[J].高电压技术,2017,43(4):1378-1385.
- [5] 卢毅,韩志锷,陈瑜.基于能量比预处理的FFT窄带滤波方法[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):948-951.
- [6] 钱勇,黄成军,陈陈,等.多小波消噪算法在局部放电检测中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(6):89-95.
- [7] 刘卫东,刘尚和.基于小波分解与滑动峰态的微弱放电信号联合检测方法[J].电力自动化设备,2016,36(11):152-156.
- [8] 姚林朋,郑文栋,钱勇,等.基于集合经验模态分解的局部放电信号的窄带干扰抑制[J].电力系统保护与控制,2011,39(22):133-139.
- [9] 沈宏,张蒲,徐其惠,等.基于经验模态分解和自适应噪声对消算法的窄带干扰抑制[J].高压电器,2009,45(1):8-14.
- [10] 张宇辉,段伟润,李天云.抑制局部放电信号中周期性窄带干扰的子空间重构方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):178-183.
- [11] 徐永干,姜杰,唐昆明,等.基于Hankel矩阵和奇异值分解的局部放电窄带干扰抑制方法[J].电网技术,2020,44(7):2762-2769.
- [12] 陈正颖,王黎明,怡勇.基于短时傅里叶变换的直流电晕无线电干扰激发电流计算[J].高电压技术,2019,45(6):1866-1872.
- [13] 陶顺,郭傲,刘云博,等.基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法系[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):57-64.
- [14] 许珉,王玺,程凤鸣.基于加Hanning窗递推DFT算法的测频方法[J].电力自动化设备,2010,30(11):73-74.
- [15] 程养春,李成榕,王伟.用傅立叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):106-111.
- [16] 罗新,牛海清,胡日亮,等.一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J].中国电机工程学报,2013,33(12):167-175.

作者简介:

周涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。(收稿日期:2022-05-20)