

DOI: 10.7667/PSPC161010

基于正弦与余弦优化算法的配电网故障区间定位

郭艳艳¹, 熊国江²

(1. 武汉铁路职业技术学院机车车辆学院, 湖北 武汉 430205;

2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 快速准确地定位配电网故障区间对缩短故障停电时间和恢复电网运行具有重要的意义。提出了基于正弦与余弦优化算法(Sine Cosine Algorithm, SCA)的配电网故障区间定位方法。SCA 算法通过简单的正弦与余弦函数模型即可实现优化问题的全局快速搜索, 具有原理简单, 容易实现, 搜索能力强等特点。算例对比分析了 SCA 算法定位结果的快速性与准确性, 探讨了算法参数对定位结果的影响。仿真结果表明, SCA 算法在单点与多点故障并伴有信息丢失畸变等情况下均表现出了良好的优化性能。

关键词: 配电网; 故障定位; 正弦与余弦优化算法; 快速性; 准确性

Fault section location in distribution network by means of sine cosine algorithm

GUO Yanyan¹, XIONG Guojiang²

(1. Technology Institute of Locomotive Vehicle, Wuhan Railway Vocational College of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Guizhou Electric Power Grid Dispatching and Control Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: Locating the fault section in distribution network quickly and precisely is crucial for reducing the outage time and resuming the operation. A fault section location method based on sine cosine algorithm (SCA) is proposed. SCA has the capability of searching the optimal solution using mathematical model based on sine and cosine functions. It is with advantages of simple principle, easy implementation, and strong search ability. Simulations are designed to comparatively analyze its accuracy and rapidity, and investigate the influence of algorithm parameters. The results show that SCA performs well on single and multiple faults with distorted and/or lost information.

Key words: distribution network; fault location; sine cosine algorithm (SCA); rapidity; accuracy

0 引言

配电网故障定位指根据馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)等现场监控终端上传的实时信息快速确定故障区间的过程。快速准确地定位故障不仅能及时地排除故障恢复供电, 而且对提高系统运行的安全稳定性, 降低停电造成的社会经济损失都具有重要的意义^[1-2]。目前, 配电网故障区间定位方法主要包括矩阵定位方法^[3-5]和智能定位方法^[6-9]。矩阵定位方法也称为直接法, 其原理是将配电网拓扑结构关系映射为矩阵, 通过简单的矩阵运算得出故障判定矩阵, 进而定位出故障区间。该方法的特点是简单直观, 推理透明, 计算速度快, 但其故

障定位结果的准确性严重依赖于 FTU 采集单元上传信息的准确性, 容错能力较差。智能定位方法也称为间接法, 其原理是在对故障定位规则解析化的基础上, 将故障定位问题转化为求取极值的无约束 0-1 整数规划问题, 然后采用遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等智能优化算法进行求解。因其具有严密的数学基础和理论依据, 且推理简单, 具有一定故障容错能力, 从而具有很高的理论价值。

正弦与余弦优化算法(Sine Cosine Algorithm, SCA)^[10]是澳大利亚格里菲斯大学 Mirjalili 博士于 2016 年提出的一种全新的启发式优化算法, 具有结构简单、容易实现、兼顾全局搜索与局部搜索、收敛速度快等特点。

为了进一步完善配电网故障区间定位问题的智能定位方法, 提高模型的求解效率, 将 SCA 算法应用到配电网故障区间定位问题中。算例仿真结果

验证了 SCA 算法在配电网故障区间定位快速性与准确性方面的优越性。

1 基本 SCA 算法

No Free Lunch^[11]理论在逻辑上证明没有任何算法能有效地解决所有优化问题。受此启发, SCA 算法旨在采用如式(1)和式(2)所示简单的正弦与余弦函数搜索模式来设计简洁有效的群体优化算法。

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_d^t - X_{i,d}^t| \quad (1)$$

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_d^t - X_{i,d}^t| \quad (2)$$

式中: $X_{i,d}^t$ 为第 i 个个体第 d 维在第 t 代的位置; P_d^t 为第 t 代最优个体第 d 维的位置; r_1, r_2, r_3 均为随机数; $|\cdot|$ 表示绝对值。

式(1)与式(2)中, r_1 (0~1 之间随机分布)可以控制算法的步长; r_2 (0~ 2π 之间随机分布)可以控制算法的搜索方向; r_3 (0~2 之间随机分布)可以控制最优个体的指引度; 在算法执行过程中, 通过一个随机数 r_4 (0~1 之间随机分布)来确定采用式(1)或式(2)的更新策略。

SCA 算法的伪代码如图 1 所示。图 1 中, NP 表示种群个体数; D 为所优化问题的变量数。由图可知, 算法非常简洁, 没有复杂的更新策略和需要不断更新的参数, 这也正是 SCA 算法的设计初衷。

SCA 算法	
1)	种群初始化
2)	评价初始化种群的个体适应度
3)	while 未满足终止条件 do
4)	确定当前群体的最优个体 P
5)	for $i = 1$ to NP do
6)	for $d = 1$ to D do
7)	if $r_4 < 0.5$ then
8)	采用式(1)更新 $X_{i,d}$
9)	else
10)	采用式(2)更新 $X_{i,d}$
11)	end if
12)	end for
13)	end for
14)	评价新一代种群的个体适应度
15)	end while
16)	输出最优解

图 1 SCA 算法流程

Fig. 1 Flow chart of SCA

2 基于 SCA 算法的故障区间定位

2.1 目标函数的构造

配电网故障区间定位问题可描述为如式(3)0-1 整数规划问题。

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{S}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} s_i = 0 \text{ or } 1 \\ \mathbf{S} \in \mathbb{R}^n \\ i = 1, 2, \dots, D \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: D 为参数变量的维数, 表示候选故障区间数; s_i 为第 i 维变量的取值, 表示第 i 个候选故障区间的故障状态, 故障时为 1, 否则为 0。

配电网发生故障后, 安装于各断路器和分段开关处的 FTU 或 RTU 监测相应故障电流, 通过与预先整定值比较后将故障电流超限信号上传至故障监控中心, 通过对这些信号的分析可以确定出故障区间。故障区间定位问题的数学模型的构建原理就是利用反向推理方法找出最能解释各测控点故障电流超限信号的故障假说。其目标函数为

$$F(\mathbf{S}) = \sum_{i=1}^m |I_i - I_i^*(\mathbf{S})| + \zeta \sum_{i=1}^D |s_i| \quad (4)$$

式中: m 为测控点总数; I_i 为第 i 个测控点 M_i 的故障电流实际超限状态; $I_{i(s)}$ 为第 i 个测控点 M_i 的故障电流超限期望状态, 也称为开关函数, 是区间故障状态的函数; ζ 为 [0,1] 之间的权系数, 本文设为 0.8。式(4)中的第二项主要用于避免模型误判, 具体原因可详见文献[12]。

2.2 开关函数的确定

由式(4)可知, 目标函数的构造重点在于确定开关函数, 直接影响故障区间定位的结果。对于传统的辐射状配电网, 当某个区间发生故障后, 该区间下游(即该故障区间与馈线末端之间的区间)部分将全部停止供电, 从而没有流过故障电流; 而区间上游(即该故障区间与系统电源之间的区间)部分将流过故障超限电流。因此, 某个测控点的故障电流超限期望状态可等价于该测控点下游所含区间故障状态的连或运算, 即

$$I_i^*(\mathbf{S}) = \sum_{\oplus} s_{i,d} \quad (5)$$

式中: \sum_{\oplus} 为连或运算符, 当参加连或运算的元素至少有一个为 1 时, 连或运算结果为 1, 否则为 0; $s_{i,d}$ 为区间 I_i 下游第 d 区间的故障状态。

2.3 基于 SCA 算法的故障区间定位流程

由于基本 SCA 算法采用连续编码方式对群体进行编码, 不能直接用于求解配电网故障区间定位问题, 因此, 在应用过程中需要采用二进制编码对群体进行编码。采用 sigmoid 函数^[13]对 $X_{i,d}$ 进行二进制编码方式为

$$H(X_{i,d}) = \frac{1}{1 + e^{-X_{i,d}}} \quad (6)$$

转换规则为

$$s_{i,d} = \begin{cases} 1 & \text{if } H(X_{i,d}) < \text{rand}(0,1) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

基于二进制 SCA 算法的配电网故障区间定位的流程如图 2 所示。首先结合配电网的静态数据(网络拓扑结构和开关配置信息)和实时数据(断路器、

分段开关过流信息)根据故障信息区间确定方法^[14]确定故障候选区间;其次根据开关函数的构建原理构建故障信息区间内各个测控点的开关函数;然后根据目标函数的构造原理形成目标函数;最后通过二进制 SCA 算法优化目标函数,确定故障区间,完成整个故障区间定位过程。

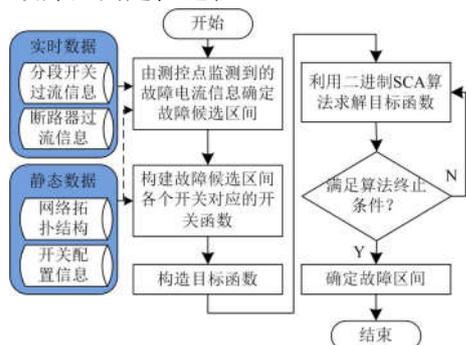


图2 基于二进制 SCA 算法的故障区间定位流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed fault section location method

3 算例分析

本文采用如图 3 所示的 IEEE33 节点配电网系统对 SCA 算法的性能进行测试。

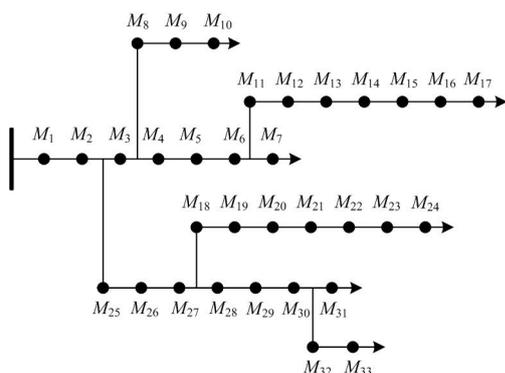


图3 IEEE33 节点配电网系统

Fig. 3 IEEE 33 bus distribution system

由于受多种原因如变电站、开关站的综合水平参差不齐,信号传输过程中信号丢失或根本未上传等^[15]的影响,测控点的监测信号存在畸变或丢失的可能,从而增加故障定位的难度。为了充分模拟这些情景,本文设计了如表 1 所示的故障测试算例,包括单点故障和多点故障并伴有测控点过流信息畸变和/或丢失的情形。

3.1 故障区间定位结果与比较

选取遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)来对比测试 SCA 算法的优化性能。为了消除随机性,对各算法均进行 100 次独立重复实验。所有实验均在硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i3-6100 CPU 3.70 GHz,

内存 8 GB,软件环境为 Matlab R2010b 的条件下进行。各算法参数设置为:种群规模 $NP=30$,最大迭代次数 $T_{\max}=1000$ 。仿真结果如表 2 所示。

表 1 故障测试算例

Table 1 Test fault cases

序号	测控点过流信息	信息畸变情况	定位结果
1	M_1, M_2, M_4, M_5	无	s_5
2	$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_{13}$	M_{13} 畸变	s_5
3	M_1, M_3, M_4, M_5	M_2 丢失	s_5
4	$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_{25}, M_{26}, M_{27}$	无	s_5, s_{27}
5	$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_{13}, M_{25}, M_{26}, M_{27}$	M_{13} 畸变	s_5, s_{27}
6	$M_1, M_3, M_4, M_5, M_{13}, M_{25}, M_{26}, M_{27}$	M_{13} 畸变、 M_2 丢失	s_5, s_{27}

表 2 故障定位结果比较

Table 2 Comparison of the fault location results

算例	定位准确率		
	GA	PSO	SCA
1	7	41	91
2	5	47	85
3	7	28	87
4	8	36	84
5	3	32	81
6	3	33	82
平均耗时/s	5.28	5.47	4.51

由表 2 可知,SCA 算法的定位准确率最高,均超过了 80%,PSO 算法次之,GA 算法最差,低于 10%,可知 SCA 算法在定位准确性方面的优势较为明显。究其原因,一方面是因为 SCA 算法采用正弦和余弦函数模型进行迭代更新,该模型既能覆盖优化变量的搜索方向(即当前取值增大或缩小),又能有效平衡全局寻优(正弦与余弦的取值较大)和局部搜索(正弦与余弦的取值较小);另一方面是因为 SCA 算法的迭代算子中利用了算法种群最优个体的位置信息和自身个体的当前位置信息,可在简化算子复杂性的同时避免信息的过多交叉,从而避免算法迂回搜索,利于持续收敛。此外,比较 3 种算法在不同算例之间的定位准确率可知,当算例复杂度增加时,定位准确率几乎呈下降趋势,这是因为随着算例复杂度的不断增加,对定位算法的优化性能提出了更高的挑战,定位准确率必然会受到一定影响。

在定位快速性方面,SCA 算法最快,分别比 GA 算法和 PSO 算法快 17.1%和 21.3%,可知 SCA 算法在定位快速性方面也表现出了明显的优势。究

其原因是因为 SCA 算法受 No Free Lunch 理论所启发, 其目的就是为了设计一种简洁而有效的优化算法, 避免算法结构过于复杂, 信息过于繁冗, 这可以充分体现在 SCA 算法的流程中。

3.2 SCA 算法参数影响分析

虽然 SCA 算法不用设置参数, 但由该算法可知, r_1 可以控制算法的步长, 而 r_3 可以控制最优个体的指引度, 本小节将分析这两个随机数对算法优化性能的影响。为了消除随机性, 对各种情形均进行 100 次独立重复实验, 仿真结果为 100 次独立重复实验的平均值。

(1) 参数 r_1 的影响分析

设置如下 5 种分布方式: a) 0~0.1 随机分布; b) 0~0.5 随机分布; c) 0~1 随机分布; d) 0~5 随机分布; e) 0~10 随机分布。在故障算例 6 上的仿真结果如图 4 所示。由图可知, 参数 r_1 的确对 SCA 算法的优化性能产生重要影响, 步长越大或越小, 优化性能均越差。这是因为步长越大, 算法搜索范围跨度越广, 增加了搜索的盲目性, 从而降低了搜索精度, 不利于算法收敛; 步长越小, 虽然可以提高算法的局部搜索精度, 但降低了全局搜索能力, 算法易发生早熟。由上述分析可知, 合理的搜索步长可以有效控制算法的搜索范围, 从而兼顾全局搜索与局部搜索, 利于算法有效收敛。

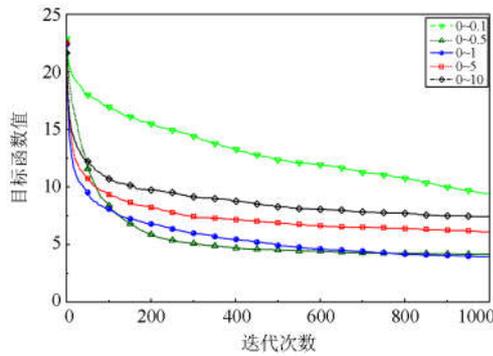


图 4 参数 r_1 影响结果

Fig. 4 Influence of r_1 on SCA

(2) 参数 r_3 的影响分析

设置如下 3 种分布方式: a) 0~2 随机分布; b) 0~1 随机分布; c) 1~2 随机分布。在故障算例 6 上的仿真结果如图 5 所示。由图可知, 参数 r_3 也对 SCA 算法的优化性能产生重要影响。参数 r_3 在 0~1 随机分布时, 种群最优个体的指引度较弱, 增加了算法搜索的盲目性, 降低了收敛速度; 参数 r_3 在 1~2 随机分布时, 种群最优个体的指引度较强, 虽然可以提高收敛速度, 但容易陷入局部最优, 不利于算

法的全局搜索; 当参数 r_3 在 0~2 随机分布时, 可以不断调整种群最优个体指引度的强度, 兼顾全局搜索与局部搜索, 从而加快算法的全局快速收敛。

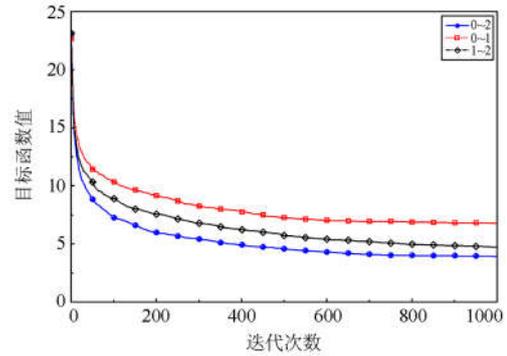


图 5 参数 r_3 影响结果

Fig. 5 Influence of r_3 on SCA

4 结论

本文提出了基于 SCA 算法的配电网故障区间定位方法。SCA 算法是一种全新的群智能优化算法, 原理简单, 容易实现, 可以有效兼顾全局搜索与局部搜索。算例仿真结果表明, SCA 算法可以有效处理单点故障与多点故障并伴有信息畸变和/或丢失的故障情形, 与遗传算法和粒子群算法相比, 在故障定位准确性和快速性方面均具有明显的优势。SCA 算法的搜索步长和最优个体指引度均对算法的优化性能产生影响, 合理的参数设置可以有效提高算法的全局搜索能力。下一步研究工作将重点围绕 SCA 算法的搜索模式展开, 以进一步提高算法的故障定位准确性。

参考文献

[1] 田书, 王亚彩, 王晓卫, 等. 基于磁场测量的配电网单相接地选线及定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 61-67.
TIAN Shu, WANG Yacai, WANG Xiaowei, et al. A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 61-67.

[2] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.

- [3] 黄佳乐, 杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [4] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68.
LUO Mei, YANG Honggeng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [5] 吴乐鹏, 黄纯, 曾照新. 分布式发电配电网故障区间定位的自适应矩阵算法[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 52-57.
WU Lepeng, HUANG Chun, ZENG Zhaoxin. A practical fault locating adaptive algorithm for distribution network with distributed generation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4): 52-57.
- [6] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [7] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, ZHENG Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [8] 王林川, 李庆鑫, 刘新全, 等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29-33.
WANG Linchuan, LI Qingxin, LIU Xinquan, et al. Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 29-33.
- [9] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [10] MIRJALILI S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 120-133.
- [11] WOLPERT D H, MACREADY W G. No free lunch theorems for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 67-82.
- [12] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [13] 熊国江, 石东源. 电网故障诊断改进解析模型及其自适应生物地理学优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 205-211.
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan. An improved analytic model for fault diagnosis of power grids and its self-adaptive biogeography-based optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 205-211.
- [14] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [15] 宋杰, 谢海宁, 杨增辉, 等. 基于多源异构数据挖掘的配电网故障信息统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 141-147.
SONG Jie, XIE Haining, YANG Zenghui, et al. Statistical analysis of the distribution fault based on multiple source and isomerism data mining technology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 141-147.

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-09-07

作者简介:

郭艳艳(1970—), 女, 副教授, 研究方向为机电一体化工程; E-mail: yyguoee@163.com

熊国江(1986—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行。E-mail: xiong_gj@163.com

(编辑 葛艳娜)