

文章编号:1671-6833(2019)05-0058-06

# 基于 IGA 的配电系统运行损耗与可靠性优化

樊一娜<sup>1</sup>, 梁伟<sup>2</sup>, 黄渝清<sup>1</sup>, 赵东初<sup>1</sup>, 陈圣博<sup>1</sup>, 李明<sup>3</sup>

(1.北京师范大学珠海分校 工程技术学院,广东 珠海 519087; 2.山东省聊城市水利勘测设计院,山东 聊城 252061; 3.复旦大学 信息科学与工程学院,上海 200433)

**摘要:**提出了一种兼顾径向功率分配系统(RDS)的可靠性和效率的优化方案,目的是在网络重构(DNR)的过程中使有功功率的损耗降低到最小.本文实质上是基于改进后遗传算法的网络分支故障分析,即在暂态过程中重点分析保护系统对故障和恢复系统的响应.具体方法是首先采用基于分支可靠性的非连续蒙特卡罗仿真方法对网络结构的可靠性进行预测,然后利用遗传算法,进行可实现的结构重构和高效搜索.此外,本文在无投资的情况下分析了RDS,将这种算法应用在一个69条线路的网络上,实验结果证明了改进遗传算法的优越性.

**关键词:**遗传算法;损失最小化;网络重构;可靠性;电力服务

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.009

## 0 引言

主动配电网重构不仅是优化辐射式供电的重要方式,也是自动化运行的研究关键.在正常运行中,配电网重构可以有效降低功率损耗,平衡负载和稳定电压.但是由于电力需求及负载用户不断增加,故障的影响比以前更加广泛,因此,对RDS和DNR改进的需要逐步加强.国外,文献[1-2]中的分析和文献[3-5]的“蒙特卡罗模拟(MCS)方法”已经应用于对RDS可靠性的评估.

网络重构(DNR)近年来得到了广泛应用.迄今为止提出的大多数RDS优化技术都是使用启发式算法、数字规划或近似技术,这样的计算结果相当接近或者直接得到了局部最优解.DNR使用的模拟热处理法<sup>[1]</sup>、粒子群优化法(PSO)<sup>[9]</sup>和遗传算法(IGA)<sup>[5,7-10]</sup>也在普遍应用.

笔者研究的主要内容是在正常运行的条件下提出一种改进的遗传算法,将可靠性优化与有效能量损失最小相结合.该算法用于DNR优化RDS,使其具有搜索全局或近似全局最优解的能力.

由于线路故障,按照传统遗传算法不容易收敛得到最优解,因此笔者提出了一种改进的非连续MCS方法,模拟实际系统分支中的故障,并估计其可靠性指标.为了提高模型的可靠性,考虑了故障后RDS保护系统的响应和故障的恢复过程.

## 1 改进的遗传算法(IGA)

在DNR里使用遗传算法的关键是使遗传进化的每一个阶段都具有辐射性,并且尽量满足径向约束条件.在这种情况下IGA使用了特殊编码和解码技术使染色体长度很小,并且在优化过程中不会产生无用的解.可以得出,在辐射网络中开环支路的数目总是等于联络开关( $N_{ls}$ )的数目.如式(1)所示,

$$N_{ls} = N_b + (N_n - N_{ss}), \quad (1)$$

式中: $N_b$ 表示分支的数目; $N_n$ 表示节点数目; $N_{ss}$ 表示RDS中的变电站数目.

### 1.1 基因操作

为了确保在优化过程开始时具有更高的遗传多样性,初始种群需要随机生成.基因操作考虑个体的数量( $N_{ind}$ )时比特为“0”或“1”.

收稿日期:2019-01-14;修订日期:2019-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61375122)

作者简介:樊一娜(1979—),女,江西南昌人,北京师范大学珠海分校讲师,硕士,主要从事智能电网研究,E-mail:fanyina@bnu.edu.cn.

通信作者:李明(1964—),男,山东青岛人,复旦大学教授,博士,主要从事电力系统自动化研究,E-mail:blang09@fudan.edu.cn.

该染色体由  $N$  个二进制 (“0” 和 “1”) 子字符串 (st) 组成, 每个子字符串表示 RDS 的一个连接开关, 在对每个字符串进行解码时, 将二进制数转换为等效的十进制数, 表示开环辐射网络的约束条件. 在遗传算法中交叉概率 ( $p_c$ ) 和变异概率 ( $p_m$ ) 是重要参数. 为了达到 IGA 的最佳性能, 采用了具有明确切割点的均匀交叉技术如图 1 所示, 这将提高遗传的多样性.

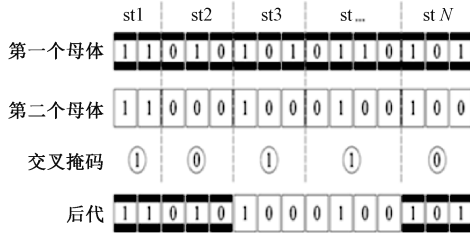


图1 均匀交叉技术实例

Fig.1 Example of the uniform crossover technique

在本文中, 突变算子应用于染色体的每一个比特, 具有一定的发生概率 ( $p_m$ ), 突变将会在所选位从 0 改为 1, 或者从 1 改为 0. 遗传操作过程如图 2 所述.

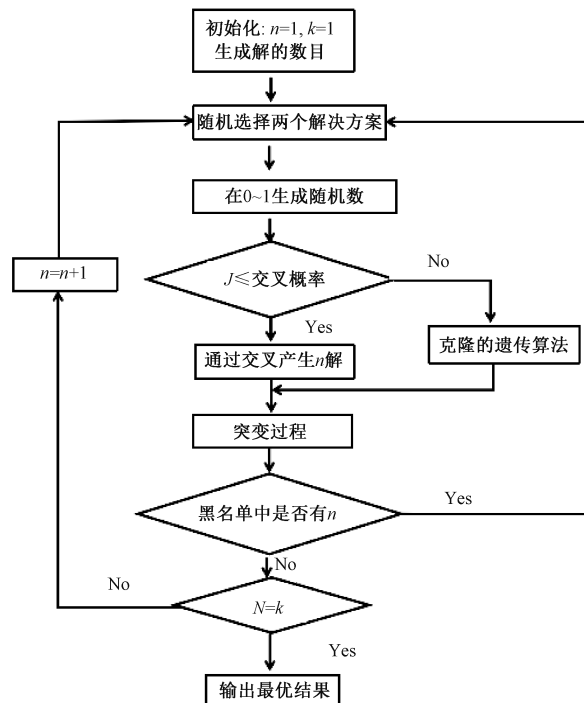


图2 遗传方法 (IGA) 操作流程

Fig.2 Flowchart of the genetic manipulation approach

## 1.2 可靠性分析

如果网络分支短路或开路, 会直接导致辐射式供电系统瘫痪. 在一个分支故障之后, 保护系统对短路的响应时间和恢复故障的过程进行切换操作, 直接影响网络功率损耗. 这些都是通过闭合保

护装置的开关来实现的.

笔者的模型假设所有分支的故障是永久性故障, 所有安装的开关为远程控制开关. 故障后如果保护系统动作正确, 距离故障点最近的保护装置将自动运行.

在保护动作之后, 开关将自动切除故障, 恢复该支路的初始值和终值. 永久性故障点 ( $I_f$ ) 仍然隔离, 初始值恢复过程如图 3 所示.

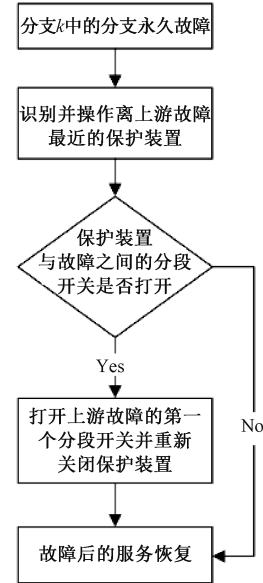


图3 初始值恢复程序流程图

Fig.3 Flowchart of the upstream restoration procedure

在优化过程中, IGA 减少了计算时间, 提高了收敛速度, 仿真效率更高.

假设一个网络分支出现永久性故障点 ( $k$ ), 负载点 ( $i$ ) 的故障时间  $\beta_{ik}$  取决于辐射式网络供电恢复的速度, 如式 (2) 所示,

$$\beta_{ik} = \begin{cases} rt_k, & I = I_p \\ sw_i, & I = I_t \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $rt_k$  是分支的故障修复时间;  $sw_i$  是切换时间 ( $sw_i < rt_k$ ).

在辐射式供电网络可靠性指标中, 系统的故障频率和故障时间为重要参数. 电量不足指标 ENS 中的母线节点平均负荷 ( $L_a$ ) 如式 (3) 所示:

$$L_a = L_p l_f, \quad (3)$$

式中:  $L_p$  是峰值负载需求;  $l_f$  为负载. ENS 如式 (4) 计算可得

$$ENS = \sum_{i=1} L_{a(i)} U_i, \quad (4)$$

其中,  $L_a$  是连接到负载点  $i$  的平均负载;  $U_i$  是供电中断的年持续时间.

随机的 MCS 方法可以用来分析 ENS 的指数和径向功率分配在故障状态下的可靠性. 在 MCS

计算之前,必须提供 RDS 的每个网络分支的可靠性参数,笔者假设了网络分支的 4 个可靠性级别,如表 1 所示.

表 1 可靠性水平等级  
Tab.1 Branch reliability levels.

等级	分支机构的可靠性水平
1	非常不可靠
2	不可靠
3	可靠
4	非常可靠

正常运行状态下的正态密度曲线可以得到一个概率密度函数  $f$ , 其特征是平均修复时间为一个随机变量. MCS 中不同的概率分布来源于网络的历史数据, 在实验中模拟了网络分支的故障和修复历史. 根据历史数据, MCS 预测 RDS 的每个分支故障频率  $\lambda_k$  (每年发生的次数) 和修复所需的时间  $rt_k$ . ENS 指数由式 (5) 决定,

$$ENS = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \lambda_k L_{a(i)} \beta_{ik}, \tag{5}$$

其中,  $\lambda_k$  是每年发生分支故障频率;  $\beta_{ik}$  是供电中断的持续时间.

1.3 年度有功功率损失

通过计算每个支路上的功率损耗, 可以得出在 RDS 中的总有功功率损耗, 如式 (6),

$$P_{损} = \sum_{i=1}^{B_i} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} r_i, \tag{6}$$

式中:  $B_i$  为支路数;  $r_i$  为支路上的阻值为  $P_i$  支路上的有功功率;  $Q_i$  为支路路上的无功功率;  $V_i$  为支路电压.

为了方便计算, 现把一年分成三个季节: 夏季 (7 月、8 月、9 月)、冬季 (12 月、1 月、2 月) 和半季 (剩余月份). 要估算年度的有功功率损失

( $W_{Loss}$ ), 需要在 MV 网络中把每天的能量损失都叠加起来, 计入到季节  $i$  中.  $W_{Loss}$  可通过公式 (7) 进行计算.

$$W_{Loss} = 92 \times W_W + 90 \times W_S + 183 \times W_{HS}, \tag{7}$$

通过计算, 可得出在季节  $i$  的每日  $j$  的有功功率损失  $W_i$ .

假设 RDS 是三相对称网络, 直接采用单相功率计算方法即可. 利用 IGA 算法在峰值时间分析冬季的功率流量, 在功率损耗曲线上可以查出  $Loss_{i,j}$  的值.

1.4 适应度函数

相比于单一复合函数优化方法, 经典加权和多目标的优化方法更为有效. 利用该方法, IGA 会同时处理两个目标, 并且根据这两个目标的附加权重做出不同的优化方案, 利用适应度函数求  $W_{Loss}$  和 ENS 的最小值,

$$\text{最小适应度} = (\alpha_1 W_{Loss} + \alpha_2 ENS) \times 100. \tag{8}$$

为了正确计算  $W_{Loss}$  和 ENS, 设置参数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ :

$$\alpha_1 = \frac{w_1}{W_{Lossb}}; \alpha_2 = \frac{w_2}{ENS_b}. \tag{9}$$

式中:  $w_1$  是功率损失的权重;  $w_2$  是不考虑基础网络配置的权重;  $W_{Lossb}$  是年度有功功率损失;  $ENS_b$  是能量总和.

2 案例分析

笔者通过两种方法对 DNR 进行分析. 第一, 只考虑可靠性, 不考虑经济性; 第二, 既考虑可靠性又考虑经济性. 在网络配置中, 由实验决定保护开关的个数和保护开关的安装地点. 案例是以 12.66 kV 的三相对称 RDS 网络<sup>[12]</sup>作为参考, 如图 4 所示.

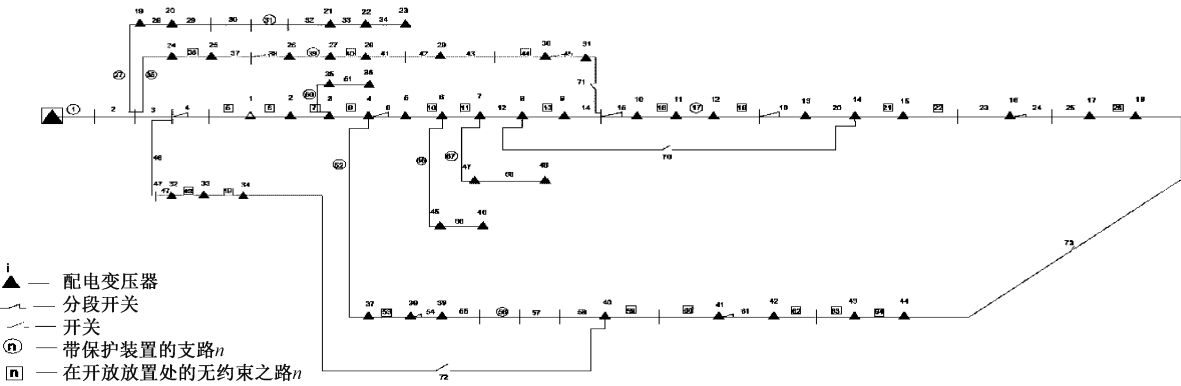


图 4 64 总线的 RDS 测试  
Fig.4 Tested 69 bus RDS

该网络以 8 MVA 的容量、73 个支路、9 个自动分段的开关、5 个自动连接保护开关、总负

荷为 3.8 MV 和 2.69 MVar(峰值)的 69 个节点(其中 48 个是配电变压器的负载点),构成一个变电站.此网络的功率因数为 0.8.在案例分析中,所有节点电压在 0.8~1 p.u.并利用 IGA 中的 GA 和粒子群算法的控制系数得出实验结果.

其中非连续 MCS 分析了 3 000 次实验,在假设的地点每一次实验就会随机发生 15 次年度支路故障.表 2 中列出了反应支路故障程度的参数,同时根据每条支路不同的故障程度归算到不同的概率上,如表 3 所示.开关时间设置为 5 min,每条支路的可靠性等级如图 5 所示.

表 2 支路故障程度

Tab.2 Degrees of failure severity

可靠性等级	所在支路百分比/%	故障程度等级		
		1	2	3
1	42.5	60	40	0
2	16.4	40	50	10
3	38.4	20	40	40
4	2.7	0	20	80

表 3 不同故障等级发生的概率

Tab. 3 Probability of occurrence of each degree of failure severity

故障程度等级	平均恢复时间 $rt_{av}$ /min	误差 %
1	60	9
2	40	6
3	15	3

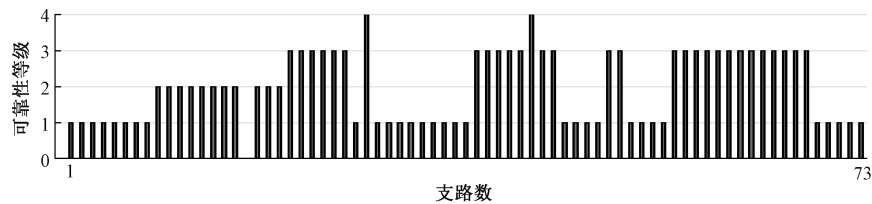


图 5 69 总线 RDS 的支路可靠性等级

Fig.5 Branch reliability levels of the 69 bus RDS

3 仿真结果

在分析了基础网络配置后,计算得  $W_{Loss}$  的值为 5 157,ENS 的值为 4.72 MWh.

改进后的模型不但提高了搜索故障点的能力,而且也提高了开关动作精度,从而获得了不同的 ENS 值.由于  $W_{Loss}$  和 ENS 之间的差异,实验过程中权重的取值可用标准化的方法确定.表 4 的结果显示了优化的第一个方法: $W_{Loss}$  和 ENS 等值时, $w_1 = 0.5$  倍  $\alpha_1(1.583 5 \times 10^{-4})$ , $w_1 = \alpha_2(0.105 9)$ .

在第二个方法中,RDS 线路中增加了一个新的保护开关.在这种情况下权重的分配有几种不同的方案,如表 4 所示.例如在方案 3 中,系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别调整到了  $0.950 1 \times 10^{-4}$  和 0.148 3.将表 4 中得到的不同优化解决方案和算法性能指标进行对比,得出最好的解决方法是方案 S1 中所提出的 IGA.该方案优化结果是使有功功率损耗减少了 16.3%,ENS 减少了 9.3%.虽然 IGA 与 PSO<sup>[9]</sup> 结果相似,但是 IGA 在收敛的过程中速度更快.

表 4 基于不同方法的投资优化

Tab.4 Optimization without investment based on different methods.

解决方案	开放支路路线	$W_{Loss}/(\text{MWh})$	$ENS/(\text{MWh})$	适应值
2 ( $w_1 = 0.5; w_2 = 0.5$ )	13-54-61-69-70	2 547.31	4.12	83.98
3 ( $w_1 = 0.3; w_2 = 0.7$ )	4-10-45-61-70	3 039.65	3.98	87.90
4 ( $w_1 = 1; w_2 = 0$ )	9-13-19-61-72	2 498.38	4.48	79.12
5 ( $w_1 = 0; w_2 = 1$ )	4-11-61-69-70	3 216.90	3.90	82.63

与传统 GA 方法相比,IGA 可以使用一个统一的交叉技术来解决这个值的动态变化.从而解决传统 GA 算法在优化过程中容易直接得到部分最优解的问题.表 5 中指出了在第 13 个支路中增加一个保护开关使开关动作具有速断性.GA 的方案 S2 中,功率损耗减少 19.3%,ENS 减少了

12.7%.在方案 S3 中,放弃部分速断性而增加了可靠性,所以功率损耗减少了 3.7%且 ENS 减少了 15.7%.方案 S4 和 S5 证明了结合两个目标获得折中解决方案的优点.假设 S4 只有有功功率损耗的减少量,S5 只有 ENS 的减少量,在设置了一个目标参数 i.e 后利用第一种方法有功功率损耗

表 5 安装新的连接开关后利用 IGA 进行投资优化各值  
Tab.5 Optimization with investment using IGA (one new tie-switch)

项目	文献[14]算法	GA	PSO	IGA
开放支路路线	69-70-71-72-73	9-45-61-70-72	9-61-70-71-72	
$W_{Loss}$ (MWh)	3 157.53	2 669.35	2 643.67	
ENS (MWh)	4.29	4.72	4.25	4.28
适应值	100	87.28	87.20	
基因代数	—	6	14	5

量减少了 20.8%,ENS 只减少了 5.1%;但是在第二种方法下只有 ENS 减少了 17.4%.

方案 S1 中利用 IGA、PSO 和 GA 算法得出适应度随基因代数的繁衍,如图 6 所示.结果证明了 IGA 快速收敛的能力,这样就节省了最佳解决方案的时间.而且从图中可以看出利用 IGA 算法适应度函数在第 5 代得出了一个不再变化的最小值,而 GA 和 PSO 算法分别在第 6 代和第 14 代确立了最小值.在计算速度方面,IGA、PSO 和 GA 算法模拟得到的平均计算时间分别是 220、309 和 294 s.笔者提出的方法在正常运行状态下会在一年内得到优化的 RDS 网络配置.

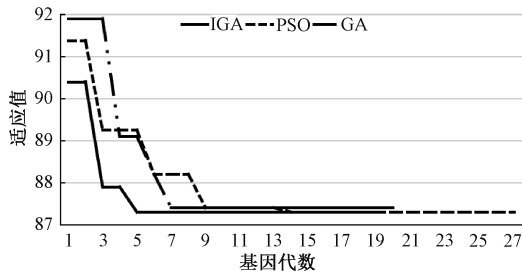


图 6 使用 IGA 和其他方法得出解决方案 S1 的收敛性能  
Fig.6 Convergence performace using IGA and other methods for solution S1

4 结论

笔者提出将 IGA 应用于 RDS 的优化,通过一个 DNR 过程将该算法的可靠性和效率同时结合起来.此外还提出了一种改进的算法模型,是在一个随机的 MCS 网络中进行网络配置,既考虑了保护的速断性,又考虑了保护的时效性.该算法在处理 DNR 问题时,使用了单一的复合函数,性能良好.这不但解决了快速收敛的关键问题,还增加了系统的稳定性,降低了故障概率.

将该方法应用于一个 69 节点的 RDS 中,所有实验节点都可以做到在稳定性提高的同时快速收敛,这个结果证明了可靠性与效率相结合的重要性.但是在实践中很难精确地选择目标的权重,如果改变目标的权重将会对结果造成很大的影响

(即会得到不同的优化解).为了解决这个问题,下一步应该采用一个多目标优化方案得到整个系统的最优解集.

参考文献:

[1] 孙磊,杨贺钧,丁明.配电系统开关优化配置的混合整数线性规划模型[J].电力系统自动化,2018,40(16):87-95.

[2] 吴博.基于蚁群算法的配电网保护最优协调整定[J].电气技术与经济报刊,2018(3):3-8.

[3] 侯雨伸,王秀丽,张玥,等.考虑维度重要性的电力系统可靠性评估拟蒙特卡洛方法[J].电力系统自动化,2016,40(16):31-37.

[4] CEBRIANJ C,KAGANN,Reconfigurationof distribution networks to minimize loss and disruption costs using genetic algorithms [J]. Electricpower systems research, 2010,80(1):53-62.

[5] MIRJALILI HR, SEDIGHIANARAKIAR, HAGHIFAM MR.A new method for lossreduction based onsimultaneous DG placement and network reconfiguration [C]//19th Iranian conference onelectrical engineering.Iran,2011:1-6.

[6] 季杭为.含分布式能源的交直流混合配电系统运行优化研究[D].东南大学吴健雄学院,2017:57-61.

[7] VITORINO R M,JORGE H M,NEVES L P. Network reconfiguration using a geneticapproachforloss and reliability optimization in distribution systems[C]//2nd international conferenceonpower engineering energy and electricaldrives.USA. University of California Berkeley Campus,2009:84-89.

[8] RAVIBABUP, RAMYA M S,SANDEEP R,et al.Implementation of improved genetic algori-thm indistribution system with feeder reconfi-guration to minimize real power losses[C]//2nd international conference on computer engineering and technology. China, Sanya, 2010,4:4320-4323.

[9] 马少飞,胡俊,刘强,等.基于粒子群算法的配电网故障定位研究[J].智慧电力期刊,2018,46(9):83-87.

[10] ZHANG BC, GUO QW, LI X, et al.Reconfiguration in distribution systems based onrefinedgeneticalgorithm

- for improving voltagequality [C]//Asia-pacific power and energyengineeringconference, China, Wuhan, 2011;1-4.
- [11] 魏超峰,李琼林,蒋建东,等.谐波因素的配电网损耗量化计算与建模仿真 [J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(1):53-57.
- [12] 肖炎,郭永基,席勇健,等.一种评估大规模电力系统可靠性的新算法[J].清华大学学报(自然科学版),1999,55(1):13-16.
- [13] 张振,刘艳红.基于特征值的单机无穷大电力系统随机稳定性分析[J]郑州大学学报(工学版),2018,39(4):58-63.

## Loss and Reliability Optimization for Power Distribution System Operation on Improved Genetic Algorithms

FAN Yina<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>2</sup>, HUANG Yuqing<sup>1</sup>, ZHAO Dongchu<sup>1</sup>, CHEN Shengbo<sup>1</sup>, LI Ming<sup>3</sup>

(1. Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China; 2. City Water Conservancy Survey and Design Institute, Liaocheng 252061, China; 3. Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** This study focused on an optimization method that combined simultaneously the reliability and the efficiency of radial power distribution systems (RDS), minimized active energy losses, through a process of network reconfiguration. The study based on the failure analysis on network branches, with a special concern on the protection system response to faults and the service restoration procedures, in the emergency state. A non-sequential Monte Carlo simulation based on the branch reliability was used to evaluate reliability of the network configurations. Due to a large number of possible configurations and the need of an efficient search, the optimization was made through an improved genetic algorithm (IGA). In a first step, the method analyzed the RDS considering the absence of investment, and in a second step, the possibility of placing a limited number of new tie-switches in certain branches, according to the definitions made by a decision maker. The effectiveness of the proposed methodology was demonstrated through the analysis of a 69 bus RDS and by comparison against other reported methodologies.

**Key words:** genetic algorithm; loss minimization; network reconfiguration; reliability; service restoration