

灾变遗传算法在配电网开关优化配置中的应用

王东, 史燕琨, 丛吉远, 孙辉, 邹积岩

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

Application of Catastrophic Genetic Algorithm to the Optimal Configuration of Switching Devices in Distribution System

WANG Dong, SHI Yan-kun, CONG Ji-yuan, SUN Hui, ZOU Ji-yan

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要: 分析了开关投资、运行维修费用、停电损失和网络损耗的计算方法, 基于等年值法建立了开关优化的含约束、非线性的组合优化模型, 采用了灾变遗传算法来求解这类优化问题。通过对实例的计算表明: 提出的数学模型和算法有较强的工程实用性, 灾变遗传算法具有较好的全局收敛性和较快的收敛速度。

关键词: 配电网; 开关优化配置; 灾变遗传算法

中图分类号: TM727.2

文献标识码: A

Abstract: This paper presents a model considering investment, maintenance, outage cost and line loss which is formulated as a combinatorial constrained optimization problem with constraints and non-linear objective function. The application of catastrophic genetic algorithm to the optimal configuration of switching devices in distribution system is also introduced. A typical calculation shows that the proposed model and algorithm are suitable for the application.

Key words: distribution network; optimal configuration of switching devices; catastrophic genetic algorithm

1 引言

配电网开关优化配置就是通过确定馈线上断路器、分段开关和联络开关等的最佳位置和数量, 来节约设备投资, 提高系统可靠性, 减少停电损失。

配电网开关优化配置是一个含约束、非线性的组合优化问题, 计算很复杂, 目前已经研究和采用的求解方法有很多^[1-5]。笔者采用灾变遗传算法, 该算法和简单遗传算法有一点不同, 就是引入了“灾变”的概念来模拟生物界遭受自然灾害。灾变后通过初始化操作来补全群体规模, 这样更能保证种群个体的多样性、防止早熟和以较快速度收敛到全局最优。

2 开关优化配置的数学模型

通常减小用户停电损失的途径就是提高配电

系统可靠性, 但是可靠性越高其设备投资就越大。开关优化配置应该在满足系统可靠性要求的基础上, 从综合年费用最少的角度出发, 确定一种开关优化配置方案。该方案的目标函数中应该包括开关投资和运行维修费用、停电损失和网络损耗。

2.1 投资费用

假设馈线电源侧都有断路器, 馈线上装设的联络开关和分段开关为同一种开关, 则开关总投资现值对应的等年值 $C_S = N \cdot C_{SP} \cdot \frac{(1+i)^P \cdot i}{(1+i)^P - 1}$ 。式中: N 为开关的总数; C_{SP} 为开关现值单价; i 为贴现率; P 为开关的使用寿命。

2.2 运行维修费用

开关设备每年的运行维修费用 C_M 按其投资的百分数给出: $C_M = C_{S0} \cdot \eta$ 。式中: C_{S0} 为开关总投资现值; η 为运行费用占投资的比例系数。

2.3 停电损失费用

停电损失费用用 C_L 表示, 应该考虑到线路故障、开关自身故障和负荷变压器故障对负荷造成的影响, 并将这些折算成负荷的年平均停电时间, $C_L = \sum_{i=1}^m P_i \cdot t_i \cdot f(i)$ 。式中: m 为负荷数目, P_i 为负荷点有功负荷, t_i 为负荷点折算后的年平均停电时间, $f(i)$ 为该性质负荷的停电损失价格。

2.4 网络损耗

在配电网系统中, 网络损耗 C_C 不容忽视:

$$C_C = C_f \cdot \sum_{i=1}^{br} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_i$$

式中: C_f 为网络损耗价格; br 为支路数; P_i 和 Q_i 为支路末端有功负荷和无功负荷; U_i 为支路末端节点电压, R_i 该支路的电阻。

2.5 数学模型

根据上述各项费用的计算方法, 优化的目标函数可表示为: $\min C = C_S + C_M + C_L + C_C$; 其约束为: ①可靠

性约束: $r \geq r_0$ 。式中: r 为某种开关配置模式下的系统可靠性指标; r_0 为给定的系统最低可靠性指标。②节点电压约束: $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$ 。式中: V_{\min}, V_{\max} 分别为节点电压最低值和最高值。③支路过负荷约束: $I \leq I_{\max}$ 。式中: I_{\max} 为支路安全电流。④辐射状约束。

3 灾变遗传算法

3.1 遗传算法的全局性能

遗传算法(GA)是一种基于自然选择和群体进化机理的搜索算法。人们将搜索和优化过程模拟成生物体的进化过程,用搜索空间中的点模拟自然界中的生物个体,将求解问题的目标函数度量成生物体对环境的适应能力,将生物的优胜劣汰过程类比为搜索和优化过程中用好的可行解取代较差可行解的迭代过程。遗传操作的三个基本遗传算子为:选择、交叉和变异。

在GA的搜索过程中,当进化初期群体中存在超常个体(该个体的适应值比其它个体高得多)时,由于其竞争性太强,下一代很快被该个体所控制,能导致未成熟收敛现象。另外,如果初始解生得不好(即初始解集中分布于解空间某角落),会出现局部最优。如果以增大种群规模来提高多样性,则会付出很大的时间代价^[6]。

3.2 “灾变”及其模型

为了进一步提高GA的全局搜索性能,笔者引入了“灾变”的概念,“灾变”往往是对绝大多数生物的灭顶之灾,只有适应能力特别强的物种或者个体才能得以生存,并进入下一代的繁衍。每经过一次灾变,在下一代操作前都要通过初始化来补全灾变过程中被淘汰的染色体数目,从而维持整个种群规模不变。“灾变”变相地增大了种群规模,避免了初始种群集中分布带来的影响,提高了种群中个体的多样性。

笔者采用7种典型灾变模型中的尖点灾变模型^[7],其具体表达方式为:

$$V(x) = c \cdot x^4 + u \cdot x^2 + v \cdot x$$

其中: x 为状态变量; u, v 是两个控制变量; c 为一常数; $V(x)$ 可以看作状态 x 的势。

该模型分歧曲线方程为:

$$8c \cdot u^3 + 27v^2 = 0 \quad (1)$$

设 $f_{\max}(t)$ 和 $f_{\text{ave}}(t)$ 为 t 代种群的最优适值和平均适值。用 $u \equiv [f_{\max}(t-1) - f_{\max}(t)] / f_{\max}(t-1)$ 表示当前相对进化程度 ($u \leq 0$), 用 $v \equiv [(f_{\text{ave}}(t) - f_{\text{ave}}(t-s)) / s]$ 表示近期 s 代平均进化速率 ($t > s$)。把 u, v 看作两个控制变量, x 是与当前群体进化有关的状态变量(如遗传机制、算子等), 则根据灾变模型的分歧曲线方程(1)得到灾变临界条件为:

$$f_{\text{ave}}(t) - f_{\text{ave}}(t-s) = \pm c' \cdot \left[\frac{f_{\max}(t)}{f_{\max}(t-1)} - 1 \right]^{3/2}$$

$$\text{其中: } c' = \frac{2\sqrt{6c} \cdot s}{9}$$

根据前面的尖点灾变模型性质, 给出下面结论。

(1) 当满足下面条件时, x 采用传统的遗传机制:

$$f_{\text{ave}}(t) - f_{\text{ave}}(t-s) \geq c' \cdot \left[\frac{f_{\max}(t)}{f_{\max}(t-1)} - 1 \right]^{3/2}$$

(2) 当满足下述条件, x 采用灾变算子:

$$f_{\text{ave}}(t) - f_{\text{ave}}(t-s) \leq -c' \cdot \left[\frac{f_{\max}(t)}{f_{\max}(t-1)} - 1 \right]^{3/2}$$

(3) 在其它条件下, x 保持原有的某种遗传机制, 即遗传性质具有延迟性。

3.3 开关优化配置的灾变遗传算法

3.3.1 染色体的表示和初始化

染色体表示的好坏直接影响到算法的计算效率。笔者采用二进制编码表示开关的配置: 0 表示某位置不配置开关, 1 表示配置开关。染色体的长度为待配置开关的位置个数。按随机抽取的方法产生初始解。

3.3.2 适应值的确定

由于遗传算法适应值越大, 个体越优, 需要将目标函数转化成相应的适应值函数。对笔者提出的目标函数, 选择适应值函数为:

$$F = \begin{cases} -\infty & \text{违反约束条件} \\ -C & \text{其它} \end{cases}$$

3.3.3 算法步骤

①将染色体和适应度分别对应于开关的配置方案和目标函数; ②染色体初始化, 形成初始种群; ③遗传进化操作: 选择、交叉、变异, 计算每一代染色体的适应值; ④判断是否进行灾变操作: 若是则进行灾变, 补全种群规模, 若否则进入下一步; ⑤判断是否收敛或达到迭代次数: 若是则输出结果并结束, 若否则转③。

4 算例分析

为了进行比较, 应用简单遗传算法和灾变遗传算法对 RBTS-BUS5 系统第 1, 2 条主馈线进行开关优化配置。参考文献[8, 9], 线路故障率取为 0.13 次/(km·a), 线路修复时间 t 为 4 h/次; 负荷点变压器故障率 0.01 次/(km·a), 修复时间 10 h/次; 开关投资 3 000 \$/组, 使用寿命 15 年, 每年运行维修费用按投资的 10% 计算, 贴现率 i 为 10%, 开关故障率取为 0.05 次/年, 修复时间 2 h/次; 线路电阻为 0.27 Ω /km, 电抗 0.347 Ω /km; 其它数据见表 1~3。

图 1 给出了最优方案对应的开关配置结果, 表 4 给出了优化结果。图 2 给出了联络开关在不同

表 1 线路类型和长度

线路类型	线路长度/km	线路标号
1	0.50	1, 9, 13, 14, 18, 21
2	0.65	4, 7, 8, 12, 15, 16, 19, 22
3	0.80	2, 3, 5, 10, 11, 17, 20

表 2 用户的停电损失 \$(kW\cdot h)\$

持续时间	居民	政府机关	写字楼	商业
1 min	0.004	0.021	1.602	0.129
20 min	0.044	0.168	3.406	1.014
1 h	0.243	0.710	7.020	2.951
4 h	2.235	3.027	21.212	10.922
4 h	6.778	13.020	38.820	28.020

表 3 用户数据

负荷点总数	负荷点	用户类型	平均负荷/MW
2	1,2	居民	0.426 9
2	4,6	居民	0.417 6
4	9,10,11,13	居民	0.321 3
3	3,5,8	政府部门	0.624 7
1	7	商业楼	0.408 9
1	12	写字楼	0.378 6

位置的目标函数值,因年综合费用考虑了网损的影响,联络开关最优位置与 RBTS5 中不同(RBTS 给出的联络开关在线路 20 末端)。

灾变遗传算法在对该算例进行优化时,由于引入

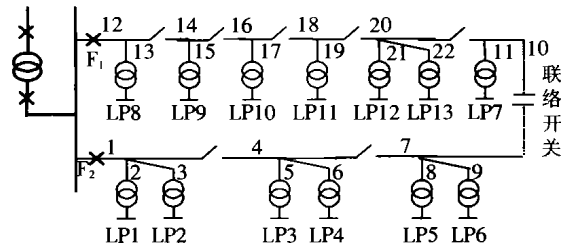


图 1 RBTS-BUS5 的开关优化配置(最优方案)

了“灾变”的概念,在每一代遗传操作之后都会进行灾变操作的判断。如果开关配置方案的初始解不好或遗传控制参数不当,经过灾变判断符合灾变条件,就启用灾变算子进行灾变,同时经过初始化操作给种群注入新的开关配置方案来补全种群规模,这实际上变相地增大了种群规模,保证了种群个体的多样性,从而能够有效地达到全局最优。而简单遗传算法在遇到上述问题时,不但影响收敛速度,还会陷入局部最优。

表 5 给出了灾变遗传算法和简单遗传算法对该

表 4 RBTS-BUS5 系统开关优化配置

分段开关位置(末端)	联络开关位置(末端)	系统可靠性指标					总投资/¥	每年投资费用/¥	每年运行维修费用/¥	停电损失/¥	网损/¥	经济效益/¥
		SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS						
1,4,12,14,16,18,20	7	0.340 2	3.680 6	10.818 3	0.999 579 8	20.742	24 000	3 155.4	315.54	29 286	3 821	36 578

注:SAIFI,SAIDI,CAIDI,ENS 分别为系统平均停电频率指标、系统平均停电持续时间指标、用户平均停电频率指标、电量不足指标,单位分别为:次/(用户·年)、h/(用户·年)、h/(停电用户·年)、(MW·h/a);ASAI 为平均供电可用率指标。

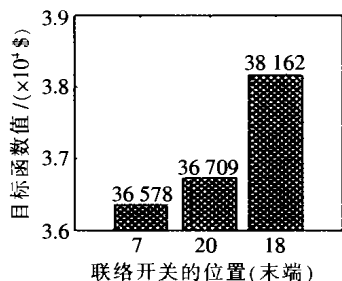


图 2 联络开关在不同位置时对应的目标函数值

表 5 两种算法的计算比较

算法	种群规模	平均迭代代数	全局收敛次数
GA	15	17	83
灾变 GA	15	12	96

算例的计算结果比较(计算 100 次的平均结果)。

从这些结果可以看出,灾变遗传算法在处理优化问题时,能够有效地克服简单遗传算法的局部收敛问题,并以较快的收敛速度收敛到全局最优。

5 结论

笔者提出了一种配电网开关优化配置的数学模型,采用灾变遗传算法来求解。采用该算法对 RBTS-BUS5 进行了计算,虽然算例规模比较小,算法的具体优势得不到充分体现,但是结果还是比较满意的,证实了该算法在实际工程上的可行性。

参考文献:

[1] R Billiton, S Jonnavithula. Optimal Switching Device

Placement in Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans. on Power System, 1996, 11(3): 1 646-1 651.

[2] Yang H T, Huang Y C, Huang C L. Solution to Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Method [A]. Proceedings of 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD'95)[C], Singapore, 1995.

[3] K Nara, Y Hayashi, Y Yamafuji, et al. A Tabu Search Algorithm for Determining Distribution Tie Lines [A]. Proceedings of 1996 International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP'96) [C], Orlando, USA, 1996.

[4] G Levitin, F Pilo. Optimal Sectionalizers Allocation in Electric Distribution System by Genetic Algorithm [J]. Electrical Power System Research, 1994, 31(2): 97-102.

[5] 谢开贵, 周家启. 基于免疫算法的配电网开关优化配置模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 35-39.

[6] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[7] P T 桑德斯. 灾变理论入门[M]. (凌复华译), 上海: 上海科学技术出版社, 1983.

[8] R Billiton, S Jonnavithula. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Trans. on Power System, 1996, 11(4): 1 670-1 676.

[9] R N Allan, R Billiton. A Reliability Test System for Education Purposes-basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(2): 813-820.

作者简介:王 东(1979-),男,硕士研究生,现从事配电网电能质量管理的研究。