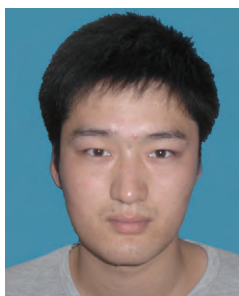


配电网分段开关优化问题的研究

配电网分段开关的配置对系统的供电可靠性、经济性具有重要影响。对配电网的分段开关进行优化设计,使系统在满足一定可靠性指标的前提下,达到社会经济效益最好具有极大意义。研究了配网分段开关的规划问题,建立了计及综合经济效益最好的开关规划模型,以开关投资费用、运行维护费用和用户失电损失之和最低为目标函数。为了提高计算的速度,运用了以开关分区的快速求取可靠性指标的方法。此外,运用了记录优秀种群并让其参与竞争的改进遗传算法,有效地解决了传统遗传算法收敛性与多样性之间的矛盾。该方案通过在某系统上的运用,证实了其较好的实用性。

刘大雷 郎 兵/北京交通大学电气工程学院

崔立忠/国网电力科学研究院北京科东电力控制系统有限责任公司



刘大雷/硕士研究生

关键词/Keywords

配电网·
分段开关·
用户失电损失·
优化配置·
遗传算法·

配电网的建设中,分段开关的设置对可靠性的提高有明显的改善^[1]。配电网的开关优化配置属于连续-离散混合的非线性优化问题,其目标函数常难以用决策变量解析表达,传统的数学优化方法不适合求解该问题。文献[1]采用的简单分段法是在主馈上设置分段开关的一种简化计算方法,认为仅在某段不设分段开关与所有段均设分段开关两种情况下,系统的年停电损失之差小于分段开关的年费用时,应该在该段馈线首端装设分段开关,不足是该方法没有考虑主馈线末端配置分段开关的必要性;文献[2]提出启发式算法,将大量经验转化成逻辑规则,并根据规则进行逻辑配置。但是由于配电网规模通常较大,待求变量维数较高,所以直接用数学规划方法进行求解几乎不可能^[3];遗传类算法如文献[4]中的免疫算法对一组个体进行操作,适用于对非线性、不可微等问题的求解,将其应用于开关优化配置可取得

不错的结果,但是控制参数的设置会对算法的收敛性与最终是否为最优结果影响很大。为了快速得到分段开关优化的最优结果,本文首先介绍了如何利用馈线分区思想得出各个区段、负荷的可靠性指标及系统的电量不足期望值,并论述了如何将这些可靠性指标转化为经济性指标即系统的用户失电损失,然后本文采用改进的遗传算法,以开关投资费用、维护费用及用户失电损失折算费用之和最小为目标函数,对配电网分段开关进行了优化配置,且该优化方案在实际工程中得到了很好的应用,验证了该优化方案的可行性^[5-10]。

基于馈线分区思想的配电网可靠性分析

本文对开关优化的最终目的是使系统经济性达到最佳,即使设备投资费用、维护费用与用户失电损失的折算费用之和最小,而计算用户失电损失又需要系统在研究期间的电量不足期望值(EENS, kW·h/年)及每个负荷点的可靠性指标,所以本文首先讨论如何对配网可靠性指标进行计算。

由于计划检修在配网运行中属于必然事件,即任何旨在改善系统可靠性的装置、措施的实施一般都难以改变计划检修安排,因而本文可靠性分析过程中均未考虑计划检修。此外由于发生多重故障的概率非常小,所以本文可靠性分析仅考虑单个元件的故障情况。

故障模式影响分析法是计算可靠性的基本方法,但对于复杂配电系统

来说,要计算所有元件故障模式对供电用户的影响,计算时间必然非常长,尤其对于本文这种开关优化问题,若采用传统的故障模式影响分析法计算系统可靠性指标有可能会发生“时间灾难”。为了提高计算速度,本文以开关为边界对配网进行分区处理,这样就可处理过程中对配网中所有设备元件之间的关系进行抽象划分,具体结合如图1所示的示例对线路上设备的关系划分进行说明。

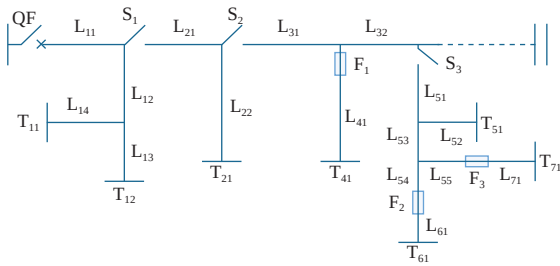


图1 典型的馈线分区图

在图1的系统中,以出口断路器QF,分段开关 S_1 、 S_2 和 S_3 、以及熔断器 F_1 、 F_2 和 F_3 为边界,将本系统分割成了七个区段,分别以 Zon_i ($i=1,2,\dots,7$)表示。 Zon_i 中包含的设备包括线路 L_{ie} 、负荷 T_{ie} ($e=1,2,\dots,n$)。而在本文可靠性分析工作中,不关注设备间的具体连接形式,只关注设备相互间的影响关系,即由于故障而造成其相互间的连带影响情况。本文中分段开关装设的FTU与计算机控制中心实时通信,并由控制中心遥控分段开关对故障定位、隔离并恢复非故障区的供电。下面结合如图2所示的图1的区域网络图对可靠性作具体的分析。

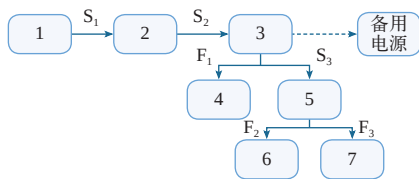


图2 图1的区域网络图

配电网正常运行时呈辐射状,其区域网络图用广度优先搜索方法将网络分层,以开关为边界将网络分割成许多区段,并建立区段与区段之间的关联关系。主电源所在区段为其

根节点,备用电源及末端节点所在的区段为其叶子节点,根节点至备用电源这一通路称为骨干网络,图2中区段4、5为区段3的子网,区段3为区段4、5的父网,骨干网之间的区段分别为其外网,非骨干网上相连的上一级区段为下一级区段的外网。

则计算可靠性指标的具体步骤如下。

1) 第一步。在建立区段的同时,对每个区段的内故障率 λ_{zi} 、内故障时间 γ_{in_i} 进行计算。

区段内的可靠性参数计算如下

$$\lambda_{zi} = \sum_{e=1}^{N_i} \lambda_e \quad (1)$$

$$\gamma_{zi} = \sum_{e=1}^{N_i} \lambda_e \gamma_e / \lambda_{zi} \quad (2)$$

式中, λ_e 为元件 e 的平均故障率,次/年; γ_e 为元件 e 的平均故障修复时间,h; γ_{zi} 为区段 i 的平均故障修复时间; N_i 为区段 i 内包含的元件数量。

当故障发生后,由控制中心遥控分段开关对故障段定位、隔离后,在区段 i 内对故障进行定位,区段 i 的平均内定位时间 t_{li} 为

$$t_{li} = \sum_{j=1}^{N_i} l_j \frac{t_{m1}}{2} + \sum_{k=1}^{N_i} l_k \frac{t_{m2}}{2} \quad (3)$$

式中, N_i 、 N_c 分别为区段 i 内的架空线路和电缆线路条数; l_j 、 l_k 为第 j 条架空线路和第 k 条电缆线路的长度,km; t_{m1} 、 t_{m2} 分别为单位长度的架空线路和电缆线路上人工故障定位时间,h/km。

所以,区段 i 内部元件发生故障造成本区段的失电时间 γ_{in_i} 为

$$\gamma_{in_i} = (T_s + t_{li} + \gamma_{zi}) \lambda_{zi} \quad (4)$$

式中, T_s 为系统对故障段隔离的时间,h。

2) 第二步。从除了备用电源外的叶子节点开始,向上计算由下级故障造成的上级区段发生失电的故障率、故障时间,将其称为上级节点的子故障率、子故障时间(叶子节点这两个参数为0),直至骨干网络上的T形节点(见图2中区段3)。

这里考虑了跌落式熔断器的自动切断故障能力,则区段 i 的子故障率 λ_{son_i} 、子故障时间 γ_{son_i} 分别为

$$\lambda_{son_i} = \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{t_j} \quad (5)$$

$$\gamma_{\text{son}_i} = \sum_{j=1}^{N_s} \gamma_{t_j} \quad (6)$$

式中, N_s 为区段*i*的子网数目; j 为区段*i*的第*j*个子网。

当与父网*i*连接的开关为分段开关时, 子网*j*对父网*i*的影响

$$\lambda_{t_j} = \lambda_{z_j} + \lambda_{\text{son}_j} \quad (7)$$

$$\gamma_{t_j} = \lambda_{z_j} T_s \quad (8)$$

当与父网*i*连接的开关为跌落开关时, 这里跌落开关在分支线上与负荷配合使用且通常作为末级开关, 所以子网*j*对父网*i*的影响

$$\lambda_{t_j} = (1-q)\lambda_{z_j} \quad (9)$$

$$\gamma_{t_j} = (1-q)\lambda_{z_j} [T_s + (2t_{li} + t_{lj} + \gamma_{z_j})] \quad (10)$$

式中, λ_{t_j} 、 γ_{t_j} 分别为子网*j*失电造成父网*i*失电的故障率、故障时间; q 为跌落开关正确动作率, 当其拒动时, 系统会将其所连两个区段都隔离, 人工寻线从其所连的父网开始向下搜索。

3) 第三步。从变电站出口由根节点向后遍历整个骨干网, 计算骨干网上区段*i*的外故障率 λ_{oi} 、外故障时间 γ_{oi} 分别为

$$\lambda_{oi} = \sum_{j=1}^{N_m} (\lambda_{z_i} + \lambda_{\text{son}_i}) \quad j=1, 2, \dots, N_m, j \neq i \quad (11)$$

$$\gamma_{oi} = \sum_{k=1}^{N_{m1}} (\lambda_{z_k} + \sum_{k_d} \lambda_{f_{k_d}}) (T_s + t_c) + \sum_m (\lambda_{z_m} + \lambda_{\text{son}_m}) T_s + \sum_{r=N_{m1}+2}^{N_m} (\lambda_{z_r} + \lambda_{\text{son}_r}) T_s \quad (12)$$

式中, N_m 为骨干网上的区段数; $1, 2, \dots, N_{m1}$ 为区段*i*的靠近电源侧骨干网上的区段, 用*k*表示; k_d 为通过跌落开关与骨干网上区段*k*相连的子网, $\lambda_{f_{k_d}}$ 为区段*k_d*故障且跌落开关拒动而造成故障扩大的概率, 如式(9)所示, 这两类区段故障造成区段*i*的停电时间为故障隔离时间 T_s 与联络开关的操作时间 t_c 之和; m 为与区段*k*以分段开关相连的区段*k*的子网, 此类区段及其下级所有子网故障造成区段*i*的停电时间为故障区段的隔离时间; $N_{m1} + 2, N_{m1} + 3, \dots, N_m$ 为区段*i*的靠近备用电源侧骨干网上的区段, 用*r*表示, 此类区段同时包括其下级所有子网故障造成区段*i*失电, 系统将故障隔离后即可恢复区段*i*的供电。

4) 第四步。从骨干网上的T形节点开始向下至叶子节点, 计算分支上的子网*j*受父网*i*失电引起的区段*i*的外故障率 λ_{oi} 、外故障时间 γ_{oi} 分别为

$$\lambda_{oi} = \lambda_{z_f} + \lambda_{oi_f} + \lambda_{\text{son}_f} - \lambda_{t_i} \quad (13)$$

$$\gamma_{oi} = \gamma_{in_f} + \gamma_{\text{son}_f} + \gamma_{oi_f} - \gamma_{t_i} \quad (14)$$

综上所述, 每个区段的停运会受三部分影响, 即区段本身故障、区段的子网故障和区段的外网故障, 区段*i*的这三部分之和即为区段*i*一年总的停电率 λ_{all_i} 、总的停电时间 γ_{all_i} 为

$$\lambda_{\text{all}_i} = \lambda_{z_i} + \lambda_{\text{son}_i} + \lambda_{oi} \quad (15)$$

$$\gamma_{\text{all}_i} = \gamma_{in_i} + \gamma_{\text{son}_i} + \gamma_{oi} \quad (16)$$

区段*i*内的每个负荷的总停电率 λ_p 与总停电时间 γ_p 与区段*i*的总停电率 λ_{all_i} 、总停电时间 γ_{all_i} 相同。所以系统电量不足期望值为

$$\text{EENS} = \sum_p^n \gamma_p S_p U_p \quad (17)$$

式中, n 为系统的负荷总数, γ_p 、 S_p 、 U_p 分别为第*p*个负荷的一年总停电时间、容量和负荷平均利用率(通过对负荷数据调研, 此参数近似取为0.5)。

可靠性效益分析模型

论及可靠性效益一个关键问题是系统运行可靠性如何转化为经济性。鉴于直接统计由于系统可靠性指标提升所带来的经济收益比较困难, 因而本文分析由于供电中断造成系统与用户经济损失的情况来找出可靠性与经济性间的关系。

由前面分析过程, 可得到系统每个节点的可靠性指标, 在此基础上再把节点用户的失电损失情况结合进来, 就可以建立系统可靠性与经济性之间的联系。本文可靠性效益分析考虑三个方面: 用户失电损失、设备投入成本和设备运行维护费用。目标函数为

$$\min C = OC + C_s + C_m \quad (18)$$

式中, OC 为用户失电损失费用万元/年; C_s 为设备的投资费用, 万元/年; C_m 为设备的运行维护费用, 万元/年。

1. 用户失电损失模型

失电损失是指电力供应不完全可靠或预期不

完全可靠时社会所承担的全部经济损失, 本文利用停电损失评价率 (IEAR) 的指标求解法得出用户失电损失, 单位为万元/kW·h。利用IEAR指标, 系统在研究期间内的停电损失OC可按照下式计算

$$OC = IEAR \cdot EENS \quad (19)$$

本文通过估算各个负荷点的IEAR指标来获取系统的IEAR。

1) 确定负荷点 p 的 $IEAR_p$, p 点的停电损失评价率 $IEAR_p$ 为

$$IEAR_p = \frac{1}{\gamma_p} \lambda_p C_p(t) \quad (20)$$

式中, $C_p(t)$ 为负荷点 p 在故障持续时间 t 下的单位容量停电损失函数。

为获取 C_p , 本文共调研了文教、卫生、工业、市政和居民等类别的9个用户, 分别得到各用户在突发故障失电1~8 h内的经济损失情况。经观察, 这些用户的单位容量失电损失函数普遍具有类似如下的曲线特性 (近似为二次曲线)。通过对样本进行二次拟合, 得到不同用户的失电损失函数曲线, 其中的一类如图3所示。

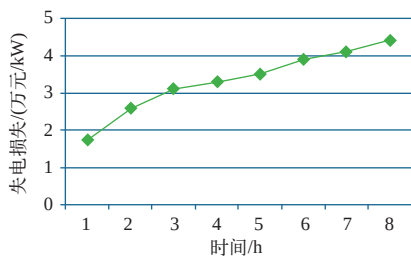


图3 某类用户失电损失函数曲线

2) 将所得负荷点的 $IEAR_p$ 按该点负荷在系统中的用电比例进行加权, 得到系统的IEAR, 再利用式 (19) 计算出系统的停电损失。

2. 开关设备投资与运行费用

(1) 设备投资费用

开关设备总投资现值对应的等年值费用 C_s 为

$$C_s = NC \frac{q(1+q)^P}{(1+i)^P - 1} \quad (21)$$

式中, N 为分段开关的总数量; C 为一台开关的市场价格; q 为年贴现率; P 为设备的运行寿命。

(2) 设备运行维护费用

每年开关的运行维修费用 C_m 按其投资的百分比给出

$$C_m = C_s H \quad (22)$$

式中, C_s 为由式 (21) 求出的开关设备的总投资; H 为运行费用占投资的比例系数。

改进的遗传算法在配网开关优化中的应用

目前对于非线性的配网开关优化问题多采用遗传算法求解, 普通遗传算法 (SGA) 将一组以基因形式描述的候选解作为种群, 仿照生物进化过程对候选解进行交叉、变异及选择等操作, 进行多次迭代直至满足预定的收敛准则, 从而得到最优解。但算法受交叉率 P_c 、变异率 P_m 影响较大: 较大的 P_c 、 P_m 有利于探索更大的解空间, 从而搜索到全局最优解, 但好的遗传模式容易受到破坏, 使算法收敛速度减慢; 取值较小时虽可保证适应度高的个体中优良模式不被破坏, 但限制了新个体的产生, 种群的多样性遭到破坏, 很可能使优化结果为局部最优解, 出现早熟的收敛现象。

本文采用二进制表示分段开关的配置, 0表示某位置不配分段开关, 1表示某位置配分段开关, 将这些代表馈线上开关信息的数字连起来就成了一个二进制的子串。而且针对上述普通遗传算法存在的问题, 本文将父代种群参与竞争的遗传算法几乎必然收敛的理论与优化问题结合并做改进, 记录了 n 个历代以来最优秀个体并将这些个体与子代一起参与竞争, 这样保证了在取较大的 P_c 、 P_m 情况下算法的快速性与收敛性, 算法的具体过程如下所述。

1) 确定遗传算法群体规模、最大遗传代数、交叉概率和变异概率等。

2) 染色体初始化。

3) 计算每个染色体的适应值 (由于目标函数的值越小方案越优, 所以适应值应以一个较大的数减去用户损失、设备投资与维护费用之和) 并选出初始 n 个优秀个体。

4) 对种群进行交叉、变异操作, 计算每个个

体适应值后与优秀个体的适应值比较后决定是否将优秀种群中适应值较小的个体替换掉，确保优秀种群为历代以来最优个体集合。

5) 采用轮盘赌算法对进化后种群及优秀种群进行选择操作，如果没有达到停止条件则转到d，继续进行遗传操作。收敛判据为：①超过最大迭代次数；②在指定次数的迭代过程中群体最优值没有变化。

6) 停止遗传，选出最优个体。
其中计算个体适应值的流程如图4所示。

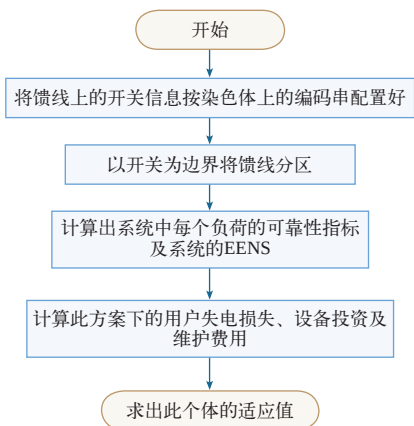


图4 计算个体适应值的流程图

算例分析

利用上述方法对西宁乐家湾变电站的某条馈线进行优化配置，线路如图5所示，图5中负荷侧的开关为跌落式熔断器，其正确动作率为0.8，架空线路和电缆的故障率分别取3.643 次/(100 km·年)、5.323 次/(100 km·年)，架空线路和电缆的修复时间分别取3.25 h/次、4.833 h/次，负荷点故障率为0.01 次/年，修复时间为5 h/次，架空线路和电缆的人工故障定位时间分别为0.42 h/km和0.33 h/km，开关投资为1万元/台、使用年限为15年，每年运行的维护费用按投资的10%计算，年贴现率取10%；

变电站出口开关为重合器，备用电源出口处为联络开关，馈线的平均供电可用度指标必须达到99.98%以上；图5中的馈线上有商业、居民、交通运输和文卫共四类负荷，负荷的容量这里不再详细列出。分段开关的候选位置为馈线及子馈线路的首末两端和无任何开关的分支线首端。优化前分段开关的设置如表1所示，表1中 $N_a N_b$ 表示节点a与节点b之间的线段，T表示在线段的相应位置装设分段开关。没有在表中列出的线段则不额外装设开关。

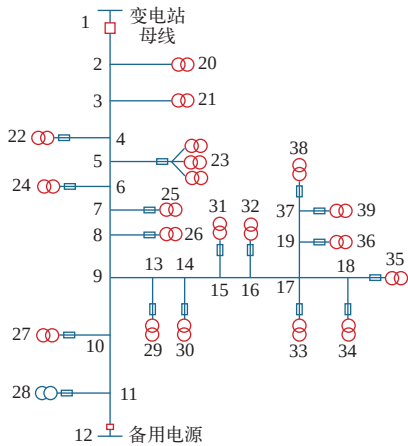


图5 乐家湾变电站馈线1的线路图

表1 优化前线路上分段开关的设置

线段	N_2-N_3	N_3-N_4	N_4-N_5	N_8-N_9	N_9-N_{13}	N_2-N_{20}	N_3-N_{21}
首端	T	T	T			T	T
尾端				T	T		

遗传算法的参数设置：种群大小为80，最大遗传代数为60，交叉率取0.8，变异率取0.2，历代最优种群数20。

优化结果：本案例应用改进的遗产算法在40代之后记录的最优个体就不再变化，表明算法已经收敛并得到最优的开关优化结果，优化具体方案如表2所示。

表2 优化后线路上分段开关的设置

线段	N_4-N_5	N_8-N_9	N_9-N_{10}	$N_{10}-N_{11}$	$N_{15}-N_{16}$	$N_{16}-N_{17}$	N_3-N_{21}	$N_{17}-N_{18}$
首端			T				T	T
尾端	T	T		T	T	T		

如表3所示，通过表3中对优化前后各项指标的对比发现系统平均供电可用度指标（ASAI）有所提高并满足要求；系统平均停电频率指标（SAIFI）没有变化，但系统平均停电持续时间指标（SAIDI）

降低，这是因为分段开关的设置不能降低停电事故的发生，只能缩短用户的停电时间；而主要关心系统的EENS、OC和年总费用值均大幅降低，说明此优化方案相对优化前能得到很好的经济效益。

表3 优化前后的两种方案可靠性、经济性指标的对比

项目	可靠性指标				经济性指标			
	ASAI	SAIFI /(次/年)	SAIDI /(h/年)	EENS /(kW·h/年)	OC /(万元/年)	开关投资费用 /(万元/年)	开关维护费用 /(万元/年)	年总费用 /(万元/年)
优化前	0.999 895	0.360 2	0.916 4	3 812.60	447 134	9 203.2	920.3	457 257.5
优化后	0.999 931	0.360 2	0.603 8	3 202.15	306 347	10 518.1	1 051.8	317 916.9

结束语

本文建立了以开关设备的运行、维护费用以及用户失电损失之和最低为目标的配电网分段开关的优化模型，运用了以开关分区的快速求取可靠性指标的方法，而且对如何将系统的可靠性问题转化为经济性问题分析，此外本文采用了保留优秀个体并让其参与竞争的改进遗传算法来解决开关优化问题，此改进的遗传算法在保持较好的全局寻优能力情况下，保证了算法的快速性与收敛性。通过对实际案例优化前后各项指标进行对比，证明了本文开关优化方法具有很好的优化效果。

参考文献

[1] 万国成，任震，荆勇．主馈线分段开关的设置研究[J]．中国电机工程学报，2003，23（4）：124-127．
[2] Levitin G, Mazal-Tov S, Elmakis D. Optimal allocation of sectionalizer in radial distribution networks [C]．Proceeding of the 1995 Stockholm Power Tech. Conference, 1995：761-764．
[3] 谢开贵，刘柏私，赵渊．配电网开关优化配置的

动态规划算法[J]．中国电机工程学报，2005，25（11）：29-34．
[4] 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（25）：35-39．
[5] 徐宗本，聂赞坎，张文修．父代种群参与竞争遗传算法几乎必然收敛[J]．应用数学学报，2002，25（1）：167-175．
[6] 史燕琨，王东，孙辉．基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]．中国电机工程学报，2004，24（9）：136-141．
[7] 谢莹华，王成山．基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]．中国电机工程学报，2004，24（5）：35-39．
[8] 曹晋华，程侃．可靠性数学引论[M]．北京：高等教育出版社，2006：205-212．
[9] 张鹏，王守相．大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]．中国电机工程学报，2004，24（3）：77-84．
[10] 张焰．电网规划中的可靠性成本一效益分析研究[J]．电力系统自动化，1999，23（15）：33-36．

（收稿日期：2014-07-15）EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告