

基于 LCC 的配电网开关优化配置研究

成先文

(盐城供电公司配电运检工区, 江苏 盐城 224000)

摘 要: 随着电力市场的逐步形成, 用户对供电可靠性的要求越来越高。在配电馈线上配置一定数量的开关设备是提高供电可靠性的有效措施。科学、合理的对配电网开关优化配置, 可以获得巨大的经济效益和社会效益。国家电网引入了全寿命周期管理的理念, 其核心内容是全寿命周期成本管理。

关键词: 全寿命周期成本管理; 开关优化配置; 遗传算法; 配电网

0 引言

随着电力市场的逐步形成, 用户对供电可靠性的要求越来越高。而配电网的故障对用户供电可靠性的影响最大, 用户停电故障中近 80% 是由配电网的故障引起的。而在配电馈线上配置一定数量的开关设备是提高供电可靠性的有效措施。科学、合理地配置开关设备, 可获得巨大的经济效益和社会效益; 反之, 如果配置不当将会扩大故障影响范围、降低供电质量。所以解决合理配置配电网开关设备与降低项目建设成本、使有限的资源充分发挥作用, 成为配电网开关选择优化中的一个重要问题。

国家电网公司同时非常重视对于全寿命周期管理的应用, 在最新发布的《国家电网公司资产全寿命周期管理评估指标体系》中提到: “实施资产全寿命周期管理是国家电网公司贯彻落实科学发展观的重要内容, 是新形势下实现公司全面、协调、可持续发展的迫切需要, 是建设世界一流电网、国际一流企业, 实现公司发展再上新台阶的战略举措”^[1]。

1 全寿命周期成本管理的内容

1.1 LCC 管理的基本概念

全寿命周期成本管理是国际上目前较为前沿的建设成本管理理论, 是从设备、项目的长期经济效益出发, 相对传统的管理方法更加合理和有效。目前为止, 将LCC技术应用于电力行业的仅为少数发达国家, 较为集中的是美国和瑞典, 该项技术在电力行业中的应用在国际上具有前瞻

性。同时, 全寿命周期成本管理是目前国家电网公司积极推行的一项实践和创新项目。LCC管理的核心内容是从一开始就把工作做好, 对设备或系统进行LCC分析, 并进行决策。

全寿命周期成本指的是从设备、系统或者项目的长期经济效益出发, 全面考虑其再规划、设计、制造、购置、安装、运行、维修、更新、直至报废的整个寿命周期全过程中, 一种需要支付的总费用。应用基于LCC的管理方法可以使设备或系统在整个寿命周期内的成本更合理, 效益更高。传统的管理方法没有从设备或系统的整个周期考虑, 得出的成本可能是阶段性最优, 但从长远来看并不一定是最优的。因此, 在电力行业中使用全寿命周期成本管理理念更具优越性, 也将在电力行业中逐步推行。

1.2 全寿命周期成本运用在配电网开关优化配置的主要计算模型

全寿命周期成本方法在配电网开关优化配置中的基础框架机构是:

$$LCC = C_I + C_O + C_M + C_F \quad (1)$$

式中:

C_I 指配电网开关初次投入成本;

C_O 指配电网开关运行成本;

C_M 指配电网开关检修成本;

C_F 指配电网开关故障损失成本。

配电网开关的全寿命周期成本管理是在可靠性的基础上使配电网开关的全寿命拥有成本最低的管理。如图1所示曲线1表示日常运行维护成本，随着可靠性指标的提高，在相应的实际工作中设备出现故障的几率变小，日常的运行维护工作量也相应会减少。因此，这一部分的成本随着可靠性的增加而减少的。曲线2代表基本投资，增加基本投资会增加设备的可靠性。因此，曲线1是随着可靠性的增加而递减的。曲线3代表的寿命周期成本是由1和2合成的，随着设备可靠性的加强，寿命总成本呈现出先递减后递增的U型趋势，在一定的可靠性下，存在一个寿命周期成本最低的点。在最低点的左侧，虽然可靠性的增大了基本建设投资成本，但是也大量减少了运行维护成本。因此，总的寿命周期成本是呈现递减的趋势。在最低点的右侧，当可靠性达到了一定程度后再想有更大的提高就需要加大基本建设投资的力度从而得到更高的可靠性标准。因此，寿命周期总成本呈现递增的趋势。在曲线3的最低点代表了设备在一定可靠性下的最小的LCC成本[2]。

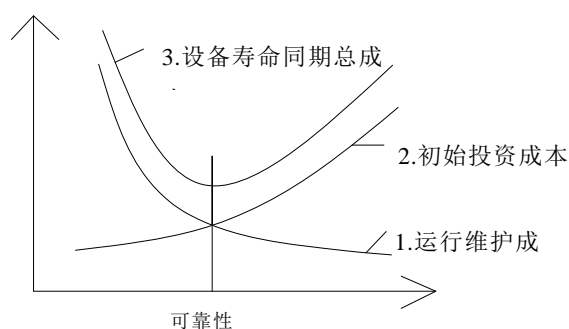


图1 寿命周期成本LCC与可靠性关系

2 遗传算法原理及分析

2.1 遗传算法概述

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。遗传算法 (Genetic Algorithm) 是一类借鉴生物界的进化规律 (适者生存，优胜劣汰遗传机制) 演化而来的随机化搜索方法。它是由美国的J.Holland教授1975年首先提出，其主要特点是直接对结构对象进行操

作，不存在求导和函数连续性的限定；具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力；采用概率化的寻优方法，能自动获取和指导优化的搜索空间，自适应地调整搜索方向，不需要确定的规则。遗传算法的这些性质，已被人们广泛地应用于组合优化、机器学习、信号处理和人工生命等领域。

2.2 遗传算法的一般算法

遗传算法是基于生物学的，理解或编程都不太难。流程图如图2所示，下面是遗传算法的一般算法：

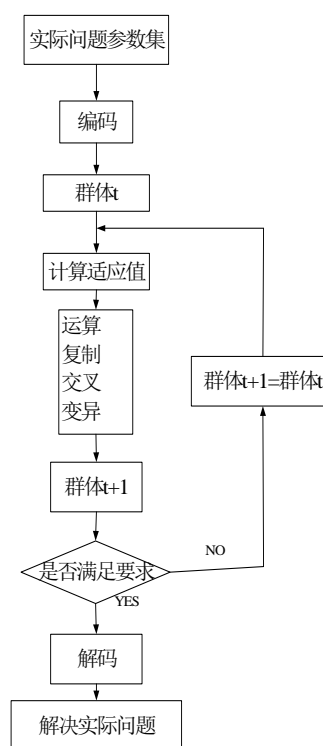


图2 遗传算法流程图

(1) 创建一个随机的初始状态

初始种群是从解中随机选择出来的，将这些解比喻为染色体或基因，该种群被称为第一代，这和符号人工智能系统的情况不一样，在那里问题的初始状态已经给定了。

(2) 评估适应度

对每一个解(染色体)指定一个适应度的值，根据问题求解的实际接近程度来指定(以便逼近求解问题的答案)。不要把这些“解”与问题的“答案”混为一谈，可以把它理解成为要得到答案，系统可能需要利用的那些特性。

(3) 繁殖

带有较高适应度值的那些染色体更可能产生后代(后代产生后也将发生突变)。后代是父母的产物,他们由来自父母的基因结合而成,这个过程被称为“杂交”。如果新一代包含一个解,能产生一个充分接近或等于期望答案的输出,那么问题就已经解决了。如果情况并非如此,新一代将重复他们父母所进行的繁衍过程,一代一代演化下去,直到达到期望的解为止。

(4) 并行计算

非常容易将遗传算法用到并行计算和群集环境中。一种方法是直接把每个节点当成一个并行的种群看待。然后有机体根据不同的繁殖方法从一个节点迁移到另一个节点。另一种方法是“农场主/劳工”体系结构,指定一个节点为“农场主”节点,负责选择有机体和分派适应度的值,另外的节点作为“劳工”节点,负责重新组合、变异和适应度函数的评估。

3 基于 LCC 的配电网开关优化配置模型

3.1 配电网开关优化模型

由于设备使用寿命可能不同,为避免设备寿命差异带来的影响,故选择等年值法进行经济评价。开关优化配置的目标是合理地选择配电网中分段开关及联络开关的位置,使在满足用户及系统供电可靠性要求的前提下综合费用最低。系统综合费用包括开关投资及维护、用户停电损失及网络损耗等,其定义如下:

首先建立待优化问题的目标函数,开关优化配置的目标是合理地选择开关的位置,使在满足用户及系统供电可靠性要求的前提下综合费用最低。系统综合费用包括开关投资及维护、用户停电损失及网络损耗等等。

(1) 开关投资费用

开关设备总投资现值对应的等年值 C_s :

$$C_s = \sum_{j=1}^M [N_j C_{sp} \frac{(1+i)^p i}{(1+i)^p - 1}]$$

式中:

M 为开关类型总数(断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器及切换开关等);

N 为开关总数;

i 为贴现率;

C_{sp} 为开关现值单价;

P 为开关的使用寿命 ($C_{sp} \frac{(1+i)^p i}{(1+i)^p - 1}$ 表示开关

在使用寿命里等效价值)。

(2) 运行维修费用

开关设备每年的运行维修费用 C_M 按其投资的百分比给出为:

$$C_M = C_s \eta$$

式中: η 为运行费用占投资的比例系数。

(3) 停电损失费用

停电损失是指由于配电系统实际停电而对国民经济造成的损失。其中包括对用户造成的损失和电力部门自身原因造成的经济损失。由于配电系统与用户自己相连,直接面对用户,停电损失的计算是很复杂的,主要和以下几个因素有关:停电发生的时间、停电提前通知时间、停电持续时间和停电频率。

用户停电损失应该是上述个因素的函数。

但是,用户停电损失函数很难精确计算,有些因素的影响程度也难以表达和计算,因此要准确计算用户停电损失是非常困难的。目前一些国家通常采用以下几种简单的估算方法:

1) 按国民生产总值计算 这种估算方法按照每单位电量所造成的国民生产总值来确定平均停电损失,即国民生产总值/总用电量。这种方法体香了停电对整体经济的平均影响,但是无法反映对不同用户造成的影响。

2) 按电价倍数估算 这种方法对各类用户进行停电损失的调查分析,用平均电价的倍数来估算停电损失。

3) 综合考虑缺点功率、缺电量、停电持续时间以及停电频率 工业用户停电损失与四个因素有关,因而在计算停电损失时综合考虑了这些因素。

停电损失费用的计算不仅与国民经济的发展、国情以及电力和需求侧管理水平有关,而且

还与法制法规的健全与实施有关，其涉及面很广，问题也很复杂。

用户停电损失的确定比较复杂，它与许多因素有关，综合各种因素用户停电损失费用

C_L ：

$$C_L = \sum_{j=1}^{n_{LP}} \sum_{t=1}^{T_j} E_{ENS_{jt}} C_{L_{jt}}$$

式中：

n_{LP} 为负荷点总数；

T_j 为第 j 个负荷点有 T_j 种停电持续时间；

$E_{ENS_{jt}}$ 为负荷点 j 第 t 种停电持续时间对应的失电量；

$C_{L_{jt}}$ 为负荷点 j 第 t 种停电持续时间对应的单位停电损失。

3.2 基于 LCC 的配电网开关优化配置数学模型

3.2.1 目标函数

开关优化配置模型以开关投资成本、运行维护成本及系统停电损失等总费用最小为目标，目标函数如下：

$$\min C_T = C_S + C_M + C_L$$

3.4.2 约束条件

$$\textcircled{1} R \in R_0 \quad \textcircled{2} V_{k \min} \leq V_k \leq V_{k \max}$$

$$\textcircled{3} I_k \leq I_{ks} \quad \textcircled{4} \sum_{i=1}^m D_i = 1$$

式中：

式①表示可靠性约束；

R 为某开关配置方案下计算出的系统可靠性数据，称为此方案下的系统可靠性状态；

R_0 为满足指标要求的可靠性状态集。

式②表示节点电压约束；

V 为节点 k 的电压；

$V_{k \max}$ 、 $V_{k \min}$ 为节点电压允许的最大值和最小值。

式③表示线路容量约；

I_k 为馈线对大允许电流；

I_{ks} 为实际传送电流；

n 为系统中馈线段数。

式④表示系统开环运行且对所有负荷点供电约束；

m 为系统中环网开关的数量；

$D_i = 0, 1$ 为开关闭合和断开。

3.3 算法设计

3.3.1 算法的原理

遗传算法是一种基于自然选择和自然遗传的生物进化机制的搜索算法，通过选择合适的编码方式，将问题的所有参变量编码成对应的子串，再将各子串首尾连接成一定长度的串，即染色体，一个染色体代表空间的一个解。

3.3.2 算法的实现过程

(1) 二进制编码

配电网开关优化问题实际上就是要进行位置的选择，开关优化问题的决策变量是各种开关的装设装填。线路中所有可选的位置最终只有两种状态，即选择和不选择，所以我们采用 0 表示某位置不配置开关，1 表示某位置配置开关。

$$X = [x_1, \Lambda, x_{n_1}, M_{n_1+1}, \Lambda, x_{n_2+1}, \Lambda, x_n]$$

式中：

$x_i = 0$ ，表示位置 i 不安装开关； $x_i = 1$ ，表

示位置 i 安装开关 $i = 1, \dots, n$ 。

初始解表示的好坏直接影响算法的计算效率。初始解的编制过程如下：设系统有 M 中开关设备，其中第 k 种开关可安装的位置数为

$N_k (k = 1, 2, \Lambda, M)$ ，从而可用 N_k 位二进制子串

表示第 k 种开关的配置状态；将 M 段二进制子串按顺序排列既可以形成一个初始解。

(2) 种群初选

种群初选涉及到两个问题：一个是初始种群的生成方式；一个是种群规模的决定。最基本的初始种群生成方式是随机生成，即染色体中的每位基因以等概率初始化为各种可能值。随着优化问题中变量数目激增。随机生成初始种群将导致搜索效率极为低下，这就需要根据优化问题的

特点制定初始种群生成方式。种群规模通常被当做经验数据制定。

(3) 选择

选择策略的主导思想就是优质染色体应比劣质染色体以更大的概率被选中参与交叉和变异操作。最常见的有轮盘赌选择方法。

i 轮盘赌算法介绍如下:

- 1) 将种群中所有染色体的适应值求和得到 SUM。
- 2) 产生一个随机实数 r , r 取值范围为 $[0, \text{SUM}]$ 。
- 3) 从群体中第一个染色体开始, 将其适应值与后继染色体的适应值相加知道累加和等于或大于 r , 就停止求和, 最后那个加上去的染色体即为选择对象。
- 4) 重复以上步骤, 直到选出 N 个染色体。

(4) 交叉

交叉是从当前种群中按一定概率 p 选择父代, 每一个对父代通过交叉运算产生两个子代。交叉运算的方法是由问题的类型和编码的方法共同决定的。

交叉主要有单点交叉和双点交叉。

1) 单点交叉

设染色体长度是 L , 在 $[1, L]$ 中随机产生一个整数作为交叉点, 子代在交叉点前面的基因因为从一个父代那里得到, 交叉点及后面的基因从另外一个父代那里得到。

2) 两点交叉

随机选择两个交叉点 i, j 子代基因在两个交叉点间部分来自一个父代基因, 其余部分来自另外一个父代基因。

交叉运算还涉及交叉概率 p 。 p 决定参与交叉运算的染色体数量, 即从当前种群中, 随机的以概率选出 $p \cdot N$ 个染色体进行两两交叉, 生成的新的个体将在种群中覆盖其父辈, 没有参加交叉的 $(1-p) \cdot N$ 不变。

(5) 变异

对二进制染色体而言, 变异就是以一定的概率对当前种群中的每个染色体选择某些基因进行变异运算, 即从 1 变成 0 或从 0 变成 1。变异的目的是为了保持种群多样性, 避免过早收敛于局部

最优解。但是变异率过大会导致染色体的剧烈变化, 不利于优质基因的遗传, 故变异率不宜过大。

(6) 迭代结束判断

该步骤主要是判断是否应该结束迭代过程, 主要有三种结束判断准则。

- 1) 已经达到事先规定的迭代次数;
- 2) 连续几代最优个体的适应值没有变化或者相差不大;
- 3) 最优个体的适应值与种群的平均适应值之比小于某个允许值。

3.3.3 基于 LCC 的配电网开关优化配置研究遗传算法的流程步骤

遗传算法的流程步骤为:

- (1) 随机形成 M 个初始群体, 并计算每个个体的适应度函数 f_i ;
- (2) 按照适者生存的自然法则, 个体适应度越高, 被选择的机会越多的概率选择个体 (以概率 $P_i = f_i / \sum_{i=1}^M f_k$ 选取 X_i , 从而得到 $p'(t)$);
- (3) 对 $p'(t)$ 做单点交叉得到 $p''(t)$;
- (4) 对 $p''(t)$ 做均匀变异操作得 $p'''(t)$;
- (5) 对个体进行适应度降序排列, 取前 M 个个体;
- (6) 若不满足终止条件, 则返回 (3)。

4 算例分析

4.1 算例及结果

本文采用对 IEEE RBTS-5 系统的第 1 2 条主馈线进行优化配置, 如图 3 所示。数据见表 1、2、3、4, 线路的故障率取为 0.13 次/(km·a), 修复时间取 4h/次, 开关投资 3000 美元/组, 线路规划使用年限是 20 年, 分段开关倒闸时间 20min/次。年运行费用占总投资的 3%, 贴现率取 10%, 平均电价取 0.45 元/kWh^[3]。

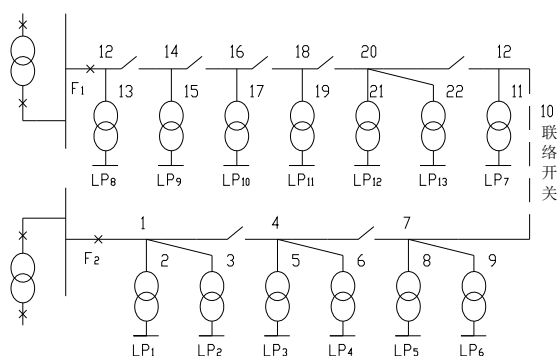


图 3 RBTS-BUS5 系统开关最优配置

表 1 各负荷点用户数据

负荷点数	负荷点	用户类型	平均负荷/kW
2	LP _{1,2}	居民	426.9
2	LP _{4,6}	居民	417.6
4	LP _{9,10,11,13}	居民	321.3
3	LP _{3,5,8}	政府部门	624.7
1	LP ₇	商业楼	408.9
1	LP ₁₂	写字楼	378.6

表 2 线路类型及长度

线路类型	线路长度/km	线路标号
1	0.5	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 3 用户的停电损失

持续时间 /min	各类型用户停电损失/(kW·h)			
	居民	政府机关	写字楼	商业
1	0.004	0.021	1.602	.0129
20	0.044	0.168	3.406	1.014
60	0.243	0.710	7.020	2.951
240	2.235	3.027	21.212	10.922
480	6.778	13.020	38.820	28.020

表 4 最优方案结果表

最优 方案	联机开 关位置	分段开关 安装位置	设备每年 投资	设备每年 运行费用	停电 损失费	经济 效益
1	7	1, 4, 14, 18, 16, 20	2113.5	63.407	13171	15348

备注：表中价格的单位为美元。

在实际的线路中，联络开关的位置往往受到约束，只能在有限的范围内安装。本文算例中在 7~10 位置处安装联络开关。

5 结论

5.1 对于配电网开关优化配置研究应用 LCC 技术理论的优点

(1) 在对配电网开关改造方案的选择和立项过程中，运用LCC的方法分析全寿命期成本，从而选择LCC最小的改造方案，必将使整个电网系统的效益得到提升。因为，LCC技术理论还充分考虑了故障成本、维护成本等诸多其他因素。

(2) 对于新建设备，用LCC管理方法可减少新建设备选择上的盲目性，可以以合理的成本获得相对高的性能，从而获得最大的经济收益。

(3) 对于现有配电网开关，用LCC技术理论来确定维护检修方式，备品备件的配置地点和数量。根据不同的设备情况来选择不同方案，是用维护检修来延长寿命，还是更新或技术改造来获得最低的LCC值。

总之，无论从理论深度还是实际效果来看，将全寿命周期理论应用于配电网开关优化配置会在提高投资利用效率方面发挥巨大的作用。

5.2 LCC 在电力行业应用的展望

全寿命周期成本管理理念已在国内外多个行业得到了推广和应用，在电力行业的应用也有逐步推广之势。在配电网开关优化研究中，运用全寿命周期成本(LCC)管理的优点是显而易见的，并且通过国内外各公司的实践已经知道全寿命周期成本(LCC)管理相对传统的管理理念更加合理。但是由于在使用LCC管理理念时需要使用较多的设备及系统数据，因此必须搜集和积累相关数据，以推进全寿命周期成本管理理念在配电网开关优化中的应用，使其可持续发展。

参考文献：

- [1] 国家电网公司.国家电网公司资产全寿命周期管理指标体系（试行版）详细说明[Z].2011.
- [2] 王东,史燕琨,丛吉远,等.灾变遗传算法在配电网开关优化配置中的应[J].高压电器,2004,40(3):180-182.
- [3] Billinton R, Jonnavithula Satish. A Test System for Teaching Overall Power System Assessment[J].IEEE Trans. on Power Delivery,1996,11(4):1663-1669.

作者简介：

成先文（1989—），男，江苏盐城人，配电运检工区。