

修正节点阻抗矩阵元素的递归算法

吕飞鹏¹, 王强¹, 张军文², 王建²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力调度局, 四川 成都 610016)

摘要: 基于递归原理, 提出了变结构电力系统修正节点阻抗矩阵元素的新算法, 完全避免了现有方法的复杂矩阵运算, 具有良好的计算效率, 便于编程实现。

关键词: 电力系统计算; 节点阻抗矩阵; 递归算法

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)10-0019-02

1 引言

电网继电保护整定计算、灵敏度校验、分支系数的计算等总是要涉及在系统最大、最小运行方式下, 同时考虑多个相邻元件开断等特殊方式下故障电流的计算问题。实质上, 此时故障电流的计算问题均可归结为变结构变参数电网的故障分析计算, 电网网络拓扑结构和网络参数的变化可通过向原网络接入一组等值链支/树支来模拟^[1]。传统算法采用修正全网节点阻抗矩阵的方法, 或通过电流补偿法将所接入的等值支路用等值电流源替代后注入到原网节点^[1], 其中存在的主要问题是重复计算量非常大, 而且需要进行大量的矩阵运算和矩阵求逆运算, 不便于编程实现。

基于递归计算原理, 本文提出了变结构变参数电网修正部分节点阻抗矩阵元素的新方法, 此新算法不需要任何矩阵运算, 避免了不必要的重复计算, 简化了程序设计, 成功克服了现有算法的缺陷。

2 修正节点阻抗矩阵的一般原理

设已知网络变化前的节点阻抗矩阵为 Z , 原网络共有 N 个独立节点。向原网络节点 i, j 之间接入一条阻抗为 Z_{ij} 的等值链支, 此时任意节点阻抗矩阵元素的修正值为

$$\tilde{Z}_{hk} = Z_{hk} - \frac{(Z_{hi} - Z_{hj})(Z_{ki} - Z_{kj})}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} + Z_y} \quad (1)$$

$$h = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N$$

式中, $Z_{hk}, Z_{hi}, Z_{hj}, Z_{ki}, Z_{kj}, Z_{ii}, Z_{jj}, Z_{ij}, Z_y$ 分别为原网节点阻抗矩阵元素。

若接入支路为接地链支 Z_{i0} , 令式(1)中下标有 j 的节点阻抗矩阵元素均为零, 可得,

$$\tilde{Z}_{hk} = Z_{hk} - \frac{Z_{hi}Z_{ki}}{Z_{ii} + Z_{ij}} \quad (2)$$

$$h = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N$$

电网继电保护整定计算中常常需要向原网络接入一组等值链支来等值多种系统运行方式变化的影响, 传统做法采用式(1)、式(2)修正全网节点阻抗矩阵, 或通过电流补偿法将所接入的等值支路用等值电流源替代后注入到原网节点后再进行故障分析, 其中需要进行大量最繁琐的计算量, 尤其是矩阵运算。

向原网络接入一组等值链支后, 此时计算任意节点阻抗矩阵元素修正值, 等价于逐次接入一条等值链支后按式(1)、(2)计算, 直到所有等值链支加完为止。其中每次追加一条等值支路, 计算公式完全一致, 差别仅在于所采用的矩阵元素值不同。此过程中, 若采用迭代循环求解的方法, 则需要管理保存大量的中间计算结果, 编程实现较困难。由于逐一追加等值链支计算过程自身具有较明显的递归特性, 因此很容易采用递归方法来实现此过程。

3 修正节点阻抗矩阵的递归算法

递归是一种非常有效的控制策略, 应用这种策略能较容易地处理存在大量重复性计算的数值问题和非数值计算问题。递归的基本原理是根据一个关系或过程的自身来限定该关系或过程。在程序设计中, 直接或间接调用自身的程序称为递归程序。实质上, 递归也是一种循环结构, 它把较复杂的计算逐次归结为较简单的计算, 一直归结到最简单的计算, 并得到计算结果为止。从某种意义上而言, 递归是一种比迭代循环更强的循环结构。

假设向原网络接入一组共 M 条等值链支支路集合为

$$MBs = [b_1, \dots, b_m, \dots, b_M], m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

当 $m = 0$ 时, 即尚未向原网络接入任何等值链支时的节点阻抗矩阵元素为

$$\begin{cases} \tilde{Z}_{hk}^{(0)} = Z_{hk} = f(h, k, MBs_0, 0), & h = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, N \\ MBs_0 = [] \end{cases} \quad (4)$$

当 $m = 1$, 即向原网络节点 i_1, j_1 已经接入第一条等值链支 b_1 后, 此时节点阻抗矩阵元素修正值为,

$$\begin{cases} \tilde{Z}_{hk}^{(1)} = \tilde{Z}_{hk}^{(0)} - \frac{(\tilde{Z}_{ki_1}^{(0)} - \tilde{Z}_{hj_1}^{(0)})(\tilde{Z}_{ki_1}^{(0)} - \tilde{Z}_{kj_1}^{(0)})}{\tilde{Z}_{i_1 i_1}^{(0)} + \tilde{Z}_{j_1 j_1}^{(0)} - 2\tilde{Z}_{i_1 j_1}^{(0)} + Z_{i_1 j_1}} = f(h, k, MBs_1, 1) \\ MBs_1 = [b_1], \quad h = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

当向原网络已经接入 $m - 1$ 条等值链支后, 此时再向原网络节点 i, j 追加一条新的等值链支 b_i , 此时节点阻抗矩阵元素修正值为,

$$\begin{cases} \tilde{Z}_{hk}^{(m)} = \tilde{Z}_{hk}^{(m-1)} - \frac{(\tilde{Z}_{hi}^{(m-1)} - \tilde{Z}_{hj}^{(m-1)})(\tilde{Z}_{ki}^{(m-1)} - \tilde{Z}_{kj}^{(m-1)})}{\tilde{Z}_{ii}^{(m-1)} + \tilde{Z}_{jj}^{(m-1)} - 2\tilde{Z}_{ij}^{(m-1)} + Z_{ij}} = f(h, k, MBs_m, m) \\ MBs_m = [b_1, b_2, \dots, b_{m-1}, b_m], \quad h = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\tilde{Z}_{hk}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ki}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{hj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{kj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ii}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{jj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ij}^{(m-1)}$ 分别为接入 $m - 1$ 条等值链支后节点阻抗矩阵对应元素的修正值。从此式可以看出, 计算时要用到上一次若干个修正值。

因此, 向原网络接入一组等值链支 MBs , 计算节点阻抗矩阵元素的修正值可描述为以下的递归过程,

$$\begin{cases} \tilde{Z}_{hk}^{(m)} = f(h, k, MBs_m, m), & m = 1, 2, \dots, M \quad (7) \\ \tilde{Z}_{hk}^{(0)} = f(h, k, MBs_0, 0) = Z_{hk}, & m = 0 \quad (8) \\ h = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$

式(8)是递归结束条件。

要实现上述递归算法, 首先需要设计两个基本的数据结构。按照面向对象的程序设计方法, 可将反映电网变化而接入原网的一组等值支路 MBs 用一集合对象类 TModifiedBranches 来封装, 其中的子对象数据成员封装每一接入等值链支的支路阻抗、关联节点号等信息; 节点阻抗矩阵 Z 可用一对称矩阵对象类 TZMatrix 来封装, 用于存贮、访问节点阻抗矩阵元素, 修正矩阵元素值的算法 ModifyNodalElement 作为其中的类成员函数。此算法可用 Object Pascal 语言描述如下:

```
FUNCTION TZMatrix. ModifyNodalElement (h, k : integer ; MBs : TModifiedBranches) : single ; BEGIN
```

```
IF MBs 为空集 THEN Result := Zhk // 递归结束
ELSE BEGIN
```

```
(1) 追加 MBs 中的一条等值链支 bi 并从 MBs 中删除此链支;
```

```
(2)  $\tilde{Z}_{hi}^{(m-1)} = \text{ModifyNodalElement}(h, i, MBs)$  ;
```

Recursive algorithm for modifying nodal impedance matrix

L üFei - peng¹, WANG Qiang¹, ZHANG Jun - wen², WANG Jian²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Power Dispatch Bureau, Chengdu 610016, China)

(3) 同理, 递归调用 ModifyNodalElement 计算 $\tilde{Z}_{hj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ki}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{kj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ii}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{ij}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{jj}^{(m-1)}$ 、 $\tilde{Z}_{hk}^{(m-1)}$;

(4) 按式(6)计算 $\tilde{Z}_{hk}^{(m)}$;

(5) Result := $\tilde{Z}_{hk}^{(m)}$; // 返回计算结果

END

END

从上面的算法可以看出, 递归计算过程中应始终保持原网节点阻抗矩阵元素值不变, 同时仅修正计算时所必需的部分元素值, 其值存放于堆栈空间。

4 结论

本文提出了变结构变参数电网修正部分节点阻抗矩阵元素的新方法, 避免了传统算法大量矩阵运算的复杂性和不必要的重复计算, 简化了程序设计, 提高了计算效率。本文方法尤其适用于电网局部故障分析计算、继电保护定值的快速自动计算和人工干预整定计算或分析保护的运行行为, 已成功用于四川省电力调度局、云南省电力局、重庆电业局等单位的 110 ~ 500kV 电网继电保护整定计算专家系统。

参考文献:

- [1] 米麟书, 等. 电力系统故障的计算机辅助分析 [M]. 重庆大学出版社, 1992.
- [2] 严蔚敏, 等. 数据结构 [M]. 清华大学出版社, 1992.

收稿日期: 2000-03-01

作者简介: 吕飞鹏 (1968 -) 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及其综合信息处理智能系统。

基于遗传算法的水火电混合电力系统短期发电计划优化

王亚娟, 熊信良

(华中理工大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在改进传统遗传算法的基础上,提出了水火电混合电力系统短期发电计划优化问题的数学模型和求解方法。模型计及了水电机组的发电流量、净水头和输出功率间的非线性关系,水电系统中多级水库的水流延迟等因素。算例表明本算法能更有效地达到或接近全局最优解,对编制大型水火电混合电力系统的日调度计划有实用价值。

关键词: 水火电混合电力系统; 短期发电计划; 遗传算法

中图分类号: TM715; TM61

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)10-0021-04

1 引言

现代电力系统中通常包含火电、水电、原子能和抽水蓄能等多种发电厂,由两种及以上发电厂组成的电力系统称为混合电力系统。电力系统发电计划优化是电力系统经济运行的一项任务,它是指在满足系统负荷需求和其他约束条件的前提下,合理安排各类机组的出力,使整个系统在未来计划周期内的总费用最小。在短期发电计划优化中,一般假设火电的开机方式已定,水库在计划时段末的水位根据水库的中期计划确定。目前,混合电力系统短期发电计划优化问题的求解方法有等微增率法、动态规划法、拉格朗日协调求解法等^[1]。这些方法不同程度地对问题进行了简化,以减少计算量。因此这些方法只能得到问题的局部最优解。为了得到全局最优解,可采用穷举法、模拟退火法和遗传算法。其中穷举法由于存在“维数灾”问题,未能得到实际应用。模拟退火法和遗传算法是利用随机化技术来指导全局最优解的高效搜索方法,已有一些研究者将其应用于机组优化组合、无功优化和电网规划等许多方面,但大部分仅限于纯火电系统。

本文在改进简单遗传算法和研究水火电混合电力系统短期运行特点的基础上,提出了一种水火电混合电力系统短期发电计划优化的遗传算法模型,并给出了具体求解方法。通过与常规算法比较,表明本文所提出的数学模型和算法是可行的。

2 简单遗传算法的改进

遗传算法的核心是选择、杂交和变异等遗传操作。以赌轮选择、随机配对、一点杂交、群体中允许有相同个体存在为特点的遗传算法称为标准遗传算法,也称为简单遗传算法^[2](SGA-Simple Genetic Algorithm)。文献^[2]已经证明SGA不能以概率“1”收敛至全局最优解。针对混合电力系统短期发电计划优化问题计算规模大、变量取值范围大的特点,本文对SGA进行了部分改进。

2.1 采用“起始权”编码法

在遗传算法中,将十进制数据转换为二进制数据称为编码。在实际问题中,整型变量很容易转换为二进制数据。对于实型变量,通常将变量的取值范围划分为 N 段,用 $0 \sim N-1$ 表示,再将各段序号转换为二进制数据。若 N 一定时,取值范围的大小将对转换精度影响较大。为了充分保证转换精度,本文采用一种称为“起始权”编码方法。

设某变量二进制串的长度为 N ,将二进制串的第一位规定为符号位,例如用 0 表示该数为正数, 1 表示该数为负数,剩余 $N-1$ 位表示该数绝对值的编码。若起始位的权因子为 2^X ,则从前到后各位的权因子依次为 $2^{X-1}, \dots, 2^{X-N+2}$ 。当 N 一定时,转换精度仅取决于 X 的大小,可以最大限度地保证转换精度,并且对变量取值范围无限制。 X 根据变量取值范围上下限的绝对值中较大者与 2 的整数倍确定。

Abstract: Based on the recursive principle, a new algorithm is presented in this paper to modify nodal impedance matrix in power systems with variable configurations. Complex matrix operations necessary for available algorithms are completely avoided. The recursive algorithm proposed has good calculation efficiency and it is easy to program.

Key words: power system computation; nodal impedance matrix; recursive algorithm