

重载潮流算法

孙德胜¹, 郭志忠¹, 王永刚²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

摘要: 结合类编程思想和重载原理开发了三相潮流和单相潮流算法的统一结构。在此基础上, 文章提出了三相潮流和一般潮流的统一算法——重载潮流算法。通过单相、三相与重载潮流在收敛性、计算速度以及存储量等方面的比较, 得出该算法能够简化计算, 具有收敛性好、灵活、通用、计算速度快的结论。

关键词: 潮流; 重载; 重载潮流; 三相潮流

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)05-0009-03

1 引言

严格地讲, 电力网络是三相不对称的。当不对称度较小时, 可以用单相潮流按照对称情形计算; 当不对称度较大时, 必须采用三相潮流算法。

三相潮流算法, 一般可划分为对称分量法和相分量法两大类。对称分量法使用的前提是运行状态可以不对称, 但网络结构必须对称。而相分量法能够适合所有的不对称情况。因此, 在一般意义上采用相分量法是解决不对称系统潮流问题的根本途径。

对潮流算法的计算速度问题, 由于计算机技术的突飞猛进, 已显得不很重要。重要的是在确保计算速度的前提下, 使算法具有灵活的模型适应性和运行的可靠性。在这种指导思想下, 本文提出一种重载潮流算法, 它将单相和三相潮流统一描述, 能够兼顾三相对称和不对称情况。在对称情况下, 它是地道的单相潮流; 在不对称情况下, 它演化为基于相分量法的三相潮流。该算法简捷可靠, 具有很好的收敛性。

2 类编程和重载

本文算法采用类编程方式实现。之所以如此, 不仅因为面向对象程序设计是最好的程序设计方式, 更重要的是利用类编程中“重载”的原理可以简单地实现单相与三相潮流算法的统一描述。

重载的本质是对单元的多重定义。这里的单元可以是运算符, 可以是函数, 也可以是数据结构。对算法进行重载的目的是使内涵不同的算法具有相同的表述形式。本文的以下部分将在重载的概念下, 讨论重载潮流算法。

3 单元

单元是重载潮流的基本运算单位。重载算法的

单元在形式上是一种矩阵结构。在不对称情况下具有 3×3 、 3×1 和 1×3 结构, 在对称情形下它演化为 1×1 结构。重载算法的单元结构如图 1 所示:

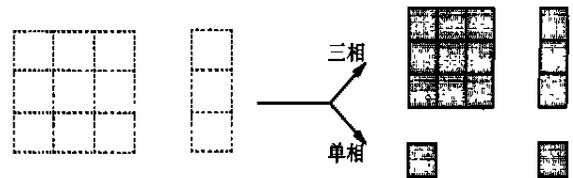


图1 重载潮流的单元结构

潮流的基本运算是复数计算。在重载潮流中,

定义导纳对应的元素结构为: $Y^{pm} = \begin{bmatrix} G^{pm} & -B^{pm} \\ B^{pm} & G^{pm} \end{bmatrix}$,

电压对应元素结构 $V^p = \begin{bmatrix} e^p \\ f^p \end{bmatrix}$, 电流对应元素结构 I^p

$= \begin{bmatrix} I_x^p \\ I_y^p \end{bmatrix}$, 功率对应元素结构 $S^p = \begin{bmatrix} P^p \\ Q^p \end{bmatrix}$, 这种元素结

构是实现重载潮流中的复数运算的基础。在不对称情况下 $p = a, b, c, m = a, b, c$, 导纳单元由 9 个元素组成, 其余单元含有 3 个元素, 能够实现三相潮流的运算; 在对称情况下, $p = m = a$ 或 b 或 c , 单元中只含一个元素, 与单相潮流对应。在重载潮流中, 单元重载是用统一形式描述数据单元之间的各种运算, 如表 1 所示。表中 $E_{3m} \odot E_{3p}$ 代表 3×3 矩阵结构, E_{3p} 代表 3×1 或 1×3 矩阵结构, \odot 表示运算符。

表1 单元重载的形式

$E_{3m} \odot E_{3p}$	
$E_{3m} \odot E_{3m}$	
$E_{3m} \odot E_{3p}$ 或 $E_{3p} \odot E_{3m}$	

由此可见,单元决定了重载算法面向的对象。重载潮流就是基于单元,实现了对单相与三相潮流的统一描述。

4 单相潮流

本文将在直角坐标系下讨论单相潮流、三相潮流和重载潮流。它们采用的算法是电流注入型牛顿法^[1],该算法是牛顿-拉夫逊算法的改进^[2]。

令节点电压向量的直角坐标形式为 $V_i = e_i + jf_i$, 导纳矩阵中的元素表示为 $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, 各节点功率表示为 $S_i = P_i + jQ_i$, 那么关于潮流问题的非线性方程 $f(x) = 0$ 的具体表达式为:

$$S_i = (e_i + jf_i) \sum_{j \in i} (G_{ij} - jB_{ij}) (e_j - jf_j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中 $j \in i$ 表示节点 j 与 i 关联,包括 $j = i$ 的情况。该式展开得:

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \end{cases} \quad (2)$$

令导纳矩阵 Y , 功率矩阵 S 已知。 $\frac{S^*}{(V^*)^2} V^*$ 中 V^* 与 V 只是符号差别,引入变换: $\frac{S^*}{(V^*)^2} V^* = \left[\frac{S^*}{(V^*)^2} \right] V$, 得到关于 PQ 节点的电流注入型的修正方程式:

$$\left[Y + \left[\frac{S^*}{(V^*)^2} \right] \right] V = \frac{S^*}{V^*} \quad (3)$$

其中 S^* 为 S 中各元素的共轭组成的功率矩阵,其它与此相同。对于 PV 节点,其修正方程式通过求导得到。电流注入型牛顿法的原理和详细推导过程见文献^[1]。

5 三相潮流

令三相系统的节点电压向量直角坐标形式为 $V_i^p = e_i^p + jf_i^p$ ($p = a, b, c$), 导纳矩阵中的元素表示为 $Y_{ij}^p = G_{ij}^p + jB_{ij}^p$ ($p = a, b, c$), 各节点功率表示为 $S_i^p = P_i^p + jQ_i^p$ ($p = a, b, c$), 那么要求解的非线性方程为:

$$S_i^p = (e_i^p + jf_i^p) \sum_{j \in i, m=a}^c (G_{ij}^{pm} - jB_{ij}^{pm}) (e_j^m + jf_j^m) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (p = a, b, c) \quad (4)$$

(4) 式展开可以得到:

$$\begin{cases} P_i^p = e_i^p \sum_{j \in i, m=a}^c (G_{ij}^{pm} e_j^m - B_{ij}^{pm} f_j^m) + f_i^p \sum_{j \in i, m=a}^c (G_{ij}^{pm} f_j^m + B_{ij}^{pm} e_j^m) \\ Q_i^p = f_i^p \sum_{j \in i, m=a}^c (G_{ij}^{pm} e_j^m - B_{ij}^{pm} f_j^m) - e_i^p \sum_{j \in i, m=a}^c (G_{ij}^{pm} f_j^m + B_{ij}^{pm} e_j^m) \end{cases} \quad (5)$$

令三相导纳矩阵 Y , 三相功率矩阵 S 已知。

$\frac{S^*}{(V^*)^2} V^*$ 中 V^* 与 V 只是符号差别,关于 PQ 节点的电流注入型修正方程式如下:

$$\left[Y + \left[\frac{S^*}{(V^*)^2} \right] \right] V = \frac{S^*}{V^*} \quad (6)$$

其中 S^* 为 S 中各元素的共轭组成的矩阵,其它与此相同。对于 PV 节点,其修正方程式通过求导得到,求导过程见文献^[3]。

6 重载潮流的统一模型

定义重载潮流中的单元表示符为:电流 I , 电压 V , 功率 S , 导纳 Y 。根据面向对象的不同,各单元将有不同的结构,以适应不同对象的求解要求。在不对称情形下, I 、 V 和 S 是 3×1 或 1×3 矩阵结构, Y 具有 3×3 矩阵结构,面向的对象是三相潮流;在对称情形下, I 、 V 、 S 和 Y 都将成为 1×1 矩阵结构,面向的对象为单相潮流。为与单元的表示符相区别,令重载潮流统一模型的三相导纳矩阵为 Y , 电压矩阵为 V , 电流矩阵为 I , 功率矩阵为 S 。

6.1 节点功率方程式

重载潮流计算可以归结为给定系统各节点功率单元求各节点电压单元的过程。系统节点方程式为:

$$I = YV \quad (7)$$

$$\text{或写成 } I_i = \sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

节点功率单元与电流单元的关系为:

$$S_i = V_i I_i^* \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

其中 I_i^* 为 I_i 中各元素的共轭组成的单元,以下情况与此相同。将式(8)代入(9)式,可得:

$$S_i = V_i \left(\sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \right)^* \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

令功率误差单元为 S_{is} , 给定的功率单元为 S_{is} , 可以得到:

$$S_i = S_{is} - V_i \left(\sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \right)^* \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

潮流问题实质就是以一定方式寻找电压单元

V_i ,使其满足给定的收敛条件。电流注入型重载潮流的误差方程式为:

$$\frac{S_i}{V_i} = \frac{S_{is}}{V_i} - \sum_j (Y_{ij}V_j)^* \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

求解电压单元将以 $\frac{S_i}{V_i}$ 是否满足要求为标准。

6.2 修正方程式

电流注入型重载潮流的修正方程式为:

$$\left[Y + \left[\left[\frac{S^*}{(V^*)^2} \right] \right] \right] V = \frac{S^*}{V^*} \quad (13)$$

其中 S^* 为 S 中各单元的共轭组成的功率矩阵,其它与此相同。由公式(13)可知,对于 PQ 节点,修正方程式系数矩阵的对角线元素是导纳矩阵的对角线单元 Y_{ii} 与 $\left[\frac{S_i^*}{(V_i^*)^2} \right]$ 的和。非对角元素将是导纳矩阵的非对角线单元 Y_{ij} 。系数矩阵中与 PV 节点相关的元素通过求导得到。修正方程式的右端量是系统各节点注入电流变化量的共轭值。

综上所述,无论是单相潮流还是三相潮流,其模型都可以按照单元来表述,从而得到基于单元的统一表现形式。

7 重载潮流算法的优越性

重载潮流算法的优越性主要体现简化三相潮流稀疏技术、简化运算过程和提高潮流算法的通用性三个方面。

7.1 稀疏技术

三相潮流需要处理的数据繁多,导纳阵、雅可比矩阵庞大,数据量是一般潮流的九倍。电力网络具有稀疏特性,因而在三相潮流中采用稀疏技术就要比单相潮流复杂。无论采用何种方法,都需要额外的存储。以常用的稀疏技术为例,潮程序需要记住雅可比阵中各元素的列号、行号以及每行元素的起始位置。这就需要创建数组完成相应的功能。这样计算量和存储量的花费都较大。如果采用重载潮流算法,由于算法的基本单位是单元,每个单元封装一系列元素,和以复数向量为计算单位的单相潮流相比,会获得相似的效果。这样重载潮流的稀疏问题与单相潮流的稀疏问题非常相似,实现过程简便易行。

7.2 简化计算

重载潮流能够较大程度地简化三相潮流的复杂

计算,而且能够改善单相潮流运算过程。重载潮流的运算类似矩阵的分块,但又优于矩阵分块计算。重载潮流的“块”就是自身的单元,而不是纯粹为简化计算而划分的块。重载潮流的单元结构决定了其运算必然符合矩阵的分块计算规则。

对该重载潮流的统一模型进行程序设计,其代码能够同时为单相和三相潮流复用,较大地提高了编程效率和计算速度。

7.3 重载算法的通用性

潮流是电力系统计算和分析的基本工具,重载潮流算法的统一结构可以被其它算法借鉴。例如重载潮流的元素结构就与电力系统的基本向量元素一一对应;重载潮流的单元结构,是实现单相和三相潮流的统一计算的基础,其结构可以应用于状态估计、故障分析等高级软件,进而开发其它的重载算法,实现单相和三相的统一分析。重载潮流算法的统一结构在其它高级算法中的应用会节省大量的人力、物力,同时对软件的质量也会有所提高。

8 算例分析

作者在编写重载潮流程序过程中,计算并分析了 5、11、30 和 40 节点单相系统,5 和 24 节点三相系统,统计时间包括形成导纳阵的时间。其中,5 节点单相系统取自文献^[4],11 节点、30 节点单相系统是 IEEE 标准系统,40 节点单相系统和 5 节点三相系统是实验系统,24 节点三相系统取自文献^[5]。各计算都在 586/166 计算机上进行,计算时间以秒为单位,收敛精度取 10^{-4} 。各算法的计算速度与收敛性比较情况见下表。

表 2 单相潮流比较(收敛次数/计算时间)

节点系统	牛顿法	电流注入型牛顿法	电流注入型重载算法
5	5/0.05	5/0.05	5/0.05
11	4/0.06	3/0.05	3/0.05
30	3/0.06	3/0.05	3/0.05
40	5/0.11	4/0.06	3/0.06

表 3 三相潮流比较(收敛次数/计算时间)

节点系统	牛顿法	电流注入型牛顿法	电流注入型重载算法
5	3/0.05	3/0.05	3/0.05
24	3/0.22	3/0.16	3/0.16

由表中结果可知,无论是单相潮流还是三相潮流,电流注入型重载算法都取得了与电流注入型牛顿法相同的效果。(下转第 15 页)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A3} &= 0, & \dot{I}_{B3} &= 6.128979 - j1.636715, \\ \dot{I}_{C1} &= -6.128979 - j1.636715 \end{aligned}$$

5 结论

本文在纵向端口等值理论上,尝试着提出了一种计算故障电力系统网络的方法,它取消了对故障类型的限制,可计算电力系统跨大区域多个地理位置发生的复杂故障(包括同杆双回线路的跨线故障)。

参考文献:

[1] 丘昌涛,邓集祥,白桦.采用稀疏技术和分块法的电力

系统短路电流计算,电机工程学报,1983,4.

[2] 曹国臣,武晓梅,宋家骅.一种基于分解协调法的电力系统故障计算方法.中国电机工程学报,1999,19(1).

收稿日期: 1999-11-17

作者简介: 余保东(1970-),男,博士,工程师,主要研究方向为电力系统运行分析; 杨勇(1964-),男,大学本科,高级工程师,从事电力系统运行工作; 杨先贵(1963-),男,大学本科,高级工程师,从事电力系统运行工作。

The calculation method for a complex fault electric power system

YU Bao-dong, YANG Yong, YANG Xian-gui

(Hubei Electric Power Dispatching Center, Wuhan 430077, China)

Abstract: Based on the longitudinal port theory, a decomposition-coordinate method for calculating a fault electric power system is presented in this paper. No fault types can be limited. The full bus admittance matrix and full bus impedance matrix of the original network are not needed. The dimension of calculation matrix can be reduced greatly. By simulation, this method is fast and accurate.

Keywords: electric power system; decomposition-coordinate; fault

(上接第 11 页)

9 结论

重载潮流算法结合类结构和重载,开发了特有的单元结构,以单元为基础实现了三相和单相潮流的统一描述。重载潮流算法的应用解决了三相潮流较复杂的稀疏问题,简化了计算过程,具有运算速度快,存储量小、灵活和通用的特点。

参考文献:

- [1] 郭志忠. 电力网络解算的统一形式. 哈尔滨工业大学学术研究论文. 1994:2-8.
- [2] 牛辉. 广义特勒根潮流计算方法. 哈尔滨工业大学硕士论文. 1997:7-19.
- [3] Wasley R G and Shalash M A. Newton - Raphson Algorithm

for Three Phase Load Flow. IEE PRCEEDINGS, 1974, 121 (7):630-638.

- [4] 西安交通大学. 电力系统计算. 水利电力出版社, 1978:151.
- [5] Chen B K, Chen M S, Shoultz R R and Liang C C. Hybrid Three Phase Load Flow. IEE Proc - C, 1990, 137(3):177-185.

收稿日期: 1999-09-10

作者简介: 孙德胜(1975-),男,硕士,从事配电自动化和电力系统应用软件方面的研究; 郭志忠(1961-),男,教授,博导,从事电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用及电力系统光学测量技术等方向的研究; 王永刚(1970-),男,博士,工程师,从事优化调度、电网调度自动化方面的研究。

Overloading load flow algorithm

SUN De-sheng¹, GUO Zhi-zhong¹, WANG Yong-gang²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: A uniform data structure of single-phase and three-phase load flow, incorporating the class programming thought and overloading idea, is proposed in this paper. On the basis of this structure, overloading load flow algorithm is developed, which is the uniform algorithm of single-phase and three-phase load flow. A conclusion is drawn that overloading load flow simplifies the computation and has the characteristics of better astringency, agility, universality, faster computing speed and less memory size by the comparison with single-phase, three-phase and overloading load flow in convergency, computing speed and memory size.

Keywords: load flow; three-phase load flow; overloading load flow