

电力系统 潮流计算的 计算机方法

吴际舜 侯志俭 编著



上海交通大学出版社



上海交通大学“九五”重点教材

电力系统潮流计算的计算机方法

吴际舜
侯志俭 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

电力系统潮流计算是电力系统稳态分析中一个最为基本和最为重要的分支。迄今为止,不少学者已经发表过大量论著。本教材根据国内外公认的成功算法,探讨了与潮流计算相关的若干问题。内容涉及基本潮流计算(第1~3章)、线路开断潮流计算(第4,7章)、稀疏技术(第5,6章)、最优潮流(第9章),以及某些特殊问题(第8章)。

本书为适合教学需要,将所有算法都做了详细的推导和加工,使得只要熟悉矩阵代数和非线性规划基本知识的读者都能顺利地理解所叙述的内容。所以,本书除可用作本科生选修课教材和研究生课程教材外,也可作为电业部门工程技术人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统潮流计算的计算机方法/吴际舜,侯志俭编著. 上海:上海交通大学出版社,2000
ISBN 7-313-02334-0

I. 电… II. ①吴…②侯… III. 电力系统计算-计算机应用 IV. TM744

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 53330 号

电力系统潮流计算的计算机方法

吴际舜 侯志俭 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 11.5 字数: 281 千字

2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—800

ISBN 7-313-02334-O/TM·113 定价:19.50 元

版权所有 侵权必究

前 言

电力系统潮流计算是研究电力系统稳态运行的一项最基本和最重要的分析方法,是电力系统及其自动化专业的同学首先应当掌握的计算工具。本书是一本基础教材,不可能涉及有关潮流计算众多方面的各种问题,只是对其中最为基本的若干算法作了阐述。书中第1章至第3章是为了同学在学过算法语言的基础上,如何利用各种基本语句来实现电力系统大型计算机程序的编制而编写的。为此,提供了较详细的可行框图和说明,以使同学能对潮流计算的整个编程过程有较全面的理解。尤其在第2章中,特别介绍了具有较高编程技巧的双因子分解法框图,相信可使同学们从中深获教益。第1章至第3章的内容曾用作我校本科生的选修教材。

线路开断进而引起网络分裂是电力系统中最常遇到的事故情况。为此,本书第4章和第7章介绍了用补偿算法处理这类情况的内容,以求达到节省计算机时的目的。由于其中牵涉到稀疏向量技术和部分重新因子化法,所以在第5章和第6章中详细叙述了这些算法。事实上,这些算法已经成为从事电力系统研究和运行人员所必需的基础知识。

随着电力系统经济性和安全性要求的日益提高,最优潮流问题的研究受到学者的普遍重视,而Newton最优潮流算法被公认是具有可喜前景的成功算法之一。本书在第9章中详细讨论了这一问题的各个方面,以期同学们能对这一算法有较清晰的了解。

此外,本书还在第8章中介绍了潮流计算中的若干特殊问题,以扩展同学的知识面。

从第4章到第9章,都曾用作我校研究生必修课和选修课教材的部分内容。

总之,本书的取材都属最为基本的,所介绍的算法,目前在电力系统研究领域内正被广泛采用,具有相当的成熟性和实用性。所有算法都曾被我编制的应用软件中引用,充分证明了它们的有效性。

宋依群硕士为本书第1章和第3章编写了部分章节。谢宁硕士则编制了基本潮流计算的部分程序以作为部分框图的基础。赵晋泉博士研究生则提供了IEEE-14节点~118节点标准测试系统的原始数据和全部答案。三位同志还分别通读了全部或部分内容,并提出不少宝贵的改进意见,谨在此表示衷心的感谢。

由于编者的学力所限,书中不妥或错误之处在所难免,务请读者指正幸。

编著者

1999年4月

目 录

1	网络的基本方程式和导纳阵的形成	1
1.1	概述	1
1.2	网络的基本方程式和导纳矩阵	1
1.3	形成导纳矩阵的程序框图	5
	参考文献	17
2	线性代数方程组的解算方法	18
2.1	概述	18
2.2	Gauss 消去法	18
2.3	因子表求逆法和双因子分解法	23
2.4	最优消去顺序问题	30
2.5	最优消去顺序和形成因子表存放方案的程序框图	33
2.6	求取双因子分解法因子表数值的程序框图	43
2.7	对已知向量进行直接解的程序框图	50
	参考文献	55
3	电力系统潮流计算	56
3.1	概述	56
3.2	BX 型快速解耦法	59
3.3	对耦型快速解耦法	64
3.4	BX 型快速解耦法的实施	65
3.5	支路潮流的计算与框图	77
	参考文献	82
4	支路开断后潮流计算的补偿求解法	83
4.1	概述	83
4.2	用逆阵修改引理(IMML)求取事故后的导纳阵因子表	85
4.3	补偿法的分类和运算步骤	86
4.4	补偿法在快速解耦法中的实现	87
	参考文献	91
5	稀疏向量法	92
5.1	概述	92
5.2	快速前代(FF)和快速回代(FB)	92
5.3	因子化路径	97
	参考文献	102
6	系数矩阵的部分重新因子化	103
6.1	概述	103

6.2 部分重新因子化法	106
参考文献	115
7 线路开断引起网络分裂后的潮流计算	116
7.1 概述	116
7.2 补偿法的物理解释和网络分裂的判据	116
7.3 利用补偿法识别组成各岛的相关节点集	118
7.4 各岛新因子表的求取方法	120
参考文献	122
8 潮流计算中的若干特殊问题	123
8.1 概述	123
8.2 用于稀疏向量法中的节点最优消去顺序问题	123
8.3 动态潮流的解算方法	127
8.4 发电机开断后计及系统频率变化的潮流解算方法	129
8.5 线路开断下 Newton 潮流的补偿算法	132
参考文献	135
9 Newton 法最优潮流	136
9.1 概述	136
9.2 Newton 法 OPF 的基本列式	137
9.3 OPF 问题的例子	139
9.4 Newton 等式约束子问题的求解	141
9.5 变量不等式约束的处理	145
9.6 函数不等式约束的处理	150
9.7 Newton 法 OPF 的解算流程	152
9.8 提高 Newton 法 OPF 收敛性的一些措施	155
参考文献	157
附录 A IEEE 标准测试系统原始数据	158

1 网络的基本方程式和导纳阵的形成

1.1 概述^[1, 5]

电力系统潮流计算是电力系统稳态运行方式下的一项基本计算。对已建成的电力系统来说,它可以根据给定的运行条件和网络的结构形式,确定整个网络的运行状态,如各母线(或节点)上的电压,各元件(线路、变压器等)中通过的功率,以及整个系统的功率损耗等等。根据计算结果,可以评定这一电力系统运行方式的合理性和经济性。

在负荷增长或网络扩建的条件下,执行基本情况和预想事故的潮流计算,就能对所需扩建的装机容量和必要增添的输变电设备提供可行的依据,使之在保证供电可靠性的前提下节约投资费用。

此外,在计算电力系统的动稳定和静稳定之前,也要利用潮流计算来确立系统的初始运行方式,以识别电力系统在该运行条件下的抗干扰能力。所以,潮流计算是电力系统分析中使用得最广泛、最基本和最重要的一项计算方法。

近半个世纪以来,随着数字计算机的不断发展,潮流计算曾采用过众多的不同算法,试图解决收敛可靠、计算快速,以及减少内存需量等方面的问题。经过研究人员与运行人员的多年实践与筛选,目前在国内外被广泛采用的是 Newton 潮流算法和以之为基础但经过简化而得到的快速解耦潮流算法(其变型可见第 3 章)。这些算法的出发点都是来自以导纳阵表示的节点注入方程式,我们称之为网络的基本方程式。本章将介绍这些方程式的推导过程,以及给出利用程序形成所需导纳阵的可行方案。

1.2 网络的基本方程式和导纳矩阵

设电力网络中有 n 个节点(或母线),如果在每个节点上都接有发电机或负荷,那么在每一节点上就有所谓的注入电流。通常规定:流入节点的电流(发电机电流)作为正电流,而流出节点的电流(负荷电流)作为负电流。如果节点上既未接有发电机又未接有负荷,那么就可认为该节点具有零注入电流;而具有零注入电流的节点,通常称之为浮游节点。

在节点 i 与节点 j 之间,接有变电或输电元件(统称之为支路或串联支路),其导纳值用 $\dot{y}_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ 表示。

此外,在某些节点 i 与地之间还接有补偿用静电电容器或线路对地电容等(统称之为对地支路或并联支路),其电纳值用 $\dot{y}_{i0} = jb_{i0}$ 表示。

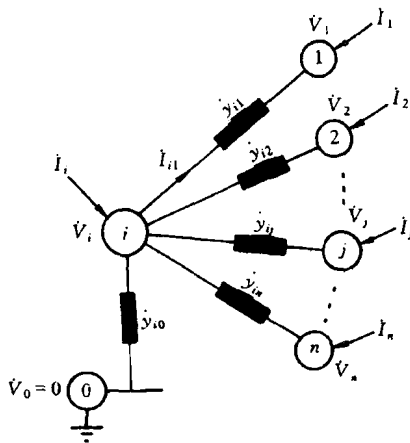


图 1.1 电力网络示意图

图 1.1 表示一个 $n+1$ 节点的电力网络($i=0,1,2,\dots,n$),其中节点 0 就是作为基准的“地”。取电压 $\dot{V}_0=0$,而其他节点的电压都是相对于 $\dot{V}_0$ 而言的。

在稳态运行情况下,电力系统基本上是一个三相平衡电网。因此,系统本身可以用一个单相线性网络来模拟。对于 $n+1$ 节点的线性网络,在取节点 0 的电位为零的情况下,可以写出 n 个节点方程式,其中每一方程式都满足:

$$\dot{I}_i - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \dot{I}_{ij} = 0, \quad (1.1)$$

其中, $\dot{I}_i$ 为注入电流, $\dot{I}_{ij}$ 为自节点 i 流出的支路电流。

当所有节点的电位都高出地电位时,有

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{i0} &= (\dot{V}_i - \dot{V}_0) \dot{y}_{i0}, \\ \dot{I}_{i1} &= (\dot{V}_i - \dot{V}_1) \dot{y}_{i1}, \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{I}_{ij} &= (\dot{V}_i - \dot{V}_j) \dot{y}_{ij}, \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{I}_{in} &= (\dot{V}_i - \dot{V}_n) \dot{y}_{in}. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

由于 $\dot{V}_0=0$,在将式(1.2)代入式(1.1)后,可得

$$\dot{I}_i = -\dot{y}_{i1}\dot{V}_1 + \dots + (\dot{y}_{i0} + \dot{y}_{i1} + \dots + \dot{y}_{ij} + \dots + \dot{y}_{in})\dot{V}_i - \dots - \dot{y}_{in}\dot{V}_n, \quad (1.3)$$

或写作

$$\dot{I}_i = Y_{i1}\dot{V}_1 + \dots + Y_{ii}\dot{V}_i + \dots + Y_{in}\dot{V}_n. \quad (1.4)$$

式中

$$Y_{ii} = \dot{y}_{i0} + \dot{y}_{i1} + \dot{y}_{i2} + \dots + \dot{y}_{ij} + \dots + \dot{y}_{in}, \quad (1.5)$$

$$Y_{ij} = -\dot{y}_{ij} \quad (j=1,2,\dots,n; j \neq i). \quad (1.6)$$

式(1.5)、式(1.6)中, Y_{ii} 称为节点的自导纳,它等于接到节点 i 的各支路导纳之和; Y_{ij} 称为节点的互导纳,它等于连接 $i-j$ 节点间支路导纳的负值。

对其他节点也可写出类似式(1.4)的方程式,于是,对 n 个节点而言,就有 n 个相互独立的方程式。为了简便起见,可写成矩阵形式:

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV}, \quad (1.7)$$

式中

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_i \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix},$$

其中, $\mathbf{Y}$ 称为节点导纳矩阵。

节点导纳矩阵,具有如下特性:

(1) $\mathbf{Y}$ 是 $n \times n$ 维方阵。

(2) 节点 $i-j$ 间的互导纳 Y_{ij} 是连接 $i-j$ 两节点间支路导纳 $\dot{y}_{ij}$ 的负值;而 Y_{ji} 是连接 $j-i$ 两节点间支路导纳 $\dot{y}_{ji}$ 的负值。由于 $\dot{y}_{ij} = \dot{y}_{ji}$, 所以有 $Y_{ij} = Y_{ji}$ 。也就是说, $\mathbf{Y}$ 是对称阵。

(3) 由式(1.5)和式(1.6)可知:

$$Y_{ii} = \dot{y}_{i0} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij},$$

从而有

$$Y_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} = \dot{y}_{i0}. \quad (1.8)$$

也就是说, Y 矩阵每行(或每列)元素之和是相应节点的对地支路导纳。为此, 当存在对地支路时, Y 是非奇异阵。

(4) 在电力网络中, 通常每个节点只接有不多的支路, 很多节点之间并不存在直接连接的支路。如果不计支路间的互感, 则根据式(1.6), 在 Y 阵中凡是无直接连接的节点, 其 $Y_{ij} = -\dot{y}_{ij} = 0$, 从而 Y 阵中具有众多的零元素。这意味着 Y 阵还是一个稀疏矩阵。

(5) 根据式(1.5)、式(1.6)可知: 当网络中每个节点都经多条支路与其他节点相连时, 则总有 $|Y_{ii}| > |Y_{ij}|$ 。因而, Y 将是一个对角元占优的方阵。但是, 当网络中某些节点只经一条感性支路与邻近的相应节点相连时, 则因 $Y_{ii} = y_{i0} + y_{ij}$, 且若 y_{i0} 为容性对地导纳, 就会出现 $|Y_{ii}| < |Y_{ij}|$ 的情况。这时, 有可能减缓潮流解的收敛特性。

各节点间的支路, 除输电线路外, 还有变压器支路。在运行情况下, 一般两绕组变压器可以用归算到低压侧的短路阻抗串联一个无损耗的理想变压器来模拟(图 1.2), 其中理想变压器的变比 $N = \dot{V}_h / \dot{V}_l$ 。 $\dot{V}_h$ 和 $\dot{V}_l$ 分别为高压侧与低压侧的电压。

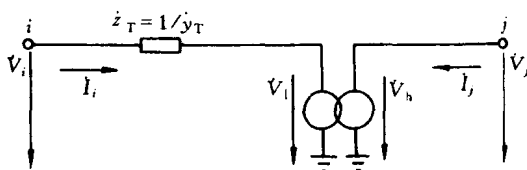


图 1.2 两绕组变压器表示法

由于理想变压器没有能量损耗, 故输入功率等于输出功率, 即

$$\dot{V}_l \dot{I}_i = -\dot{V}_h \dot{I}_j, \quad (1.9)$$

所以有

$$N = \frac{\dot{V}_h}{\dot{V}_l} = \frac{\dot{I}_i}{-\dot{I}_j}. \quad (1.10)$$

其中, $*$ 号代表共轭值。

由图 1.2 可得

$$\dot{I}_i = (\dot{V}_i - \dot{V}_l) \dot{y}_T = \dot{y}_T \dot{V}_i - \frac{\dot{y}_T}{N} \dot{V}_h,$$

但是 $\dot{V}_h = \dot{V}_j$, 于是上式为

$$\dot{I}_i = \dot{y}_T \dot{V}_i - \frac{\dot{y}_T}{N} \dot{V}_j. \quad (1.11)$$

由式(1.10)、式(1.11)有

$$\dot{I}_j = -\frac{\dot{I}_i}{N} = -\frac{1}{N} \left(\dot{y}_T \dot{V}_i - \frac{\dot{y}_T}{N} \dot{V}_j \right),$$

或写成

$$I_j = -\frac{\dot{y}_T}{\dot{N}} \dot{V}_i + \frac{\dot{y}_T}{\dot{N}N} \dot{V}_j \quad (1.12)$$

同时,图 1.2 可以用两节点网络方程式表示为

$$\left. \begin{aligned} I_i &= Y_{ii} \dot{V}_i + Y_{ij} \dot{V}_j, \\ I_j &= Y_{ji} \dot{V}_i + Y_{jj} \dot{V}_j. \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

比较式(1.11)、式(1.12)和式(1.13),可得

$$\begin{aligned} Y_{ii} &= \dot{y}_T, Y_{ij} = -\frac{\dot{y}_T}{\dot{N}}, \\ Y_{ji} &= -\frac{\dot{y}_T}{\dot{N}}, Y_{jj} = \frac{\dot{y}_T}{\dot{N}N}. \end{aligned}$$

如果网络中不存在相移变压器,则变比 N 为实数,故有

$$Y_{ii} = \dot{y}_T, Y_{ij} = Y_{ji} = -\frac{\dot{y}_T}{\dot{N}}, Y_{jj} = \frac{\dot{y}_T}{\dot{N}^2}. \quad (1.14)$$

为此,变压器支路可用 π 型等值网络表示,如图 1.3 所示。

根据图 1.3,可得

$$\left. \begin{aligned} Y_{ii} &= \dot{y}_1 + \dot{y}_2, \\ Y_{ij} &= -\dot{y}_1, \\ Y_{jj} &= \dot{y}_2 + \dot{y}_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

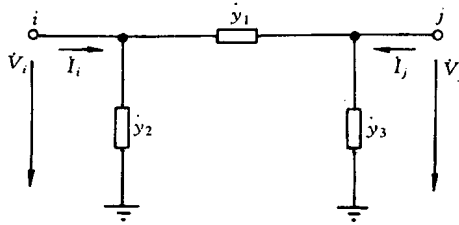


图 1.3 两绕组非标准变比的 π 型等值电路

将式(1.14)代入上式,解之可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= \frac{\dot{y}_T}{\dot{N}}, \\ \dot{y}_2 &= \dot{y}_T - \dot{y}_1 = (N-1)\dot{y}_1, \\ \dot{y}_3 &= \frac{\dot{y}_T}{\dot{N}^2} - \dot{y}_1 = \left(\frac{1}{\dot{N}} - 1\right)\dot{y}_1. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

在采用标么制计算时, $\dot{y}_T$ 一般为归算到低压侧的变压器短路阻抗标么值,而变比则为

$$N = \frac{V_h/V_{hn}}{V_l/V_{ln}} = \frac{w_h/w_{hn}}{w_l/w_{ln}}. \quad (1.17)$$

式中, V_{hn} , V_{ln} 分别为变压器高、低压侧的电压基准值, w_{hn} , w_{ln} 分别为变压器高、低压侧标准变比下的绕组匝数值。

由于变压器的可变抽头通常设在高压侧,故有 $w_l = w_{ln}$ 和 $w_h \neq w_{hn}$, 所以 $N = \frac{w_h}{w_{hn}}$ 。换言之

之, N 等于变压器高压侧的实际绕组匝数(非标准变比下的绕组匝数)与主抽头下(标准变比下)绕组匝数的比值。

当变压器运行在标准变比下时, 有 $w_h = w_{hm}$, 即 $N = 1$ 。于是由式(1.16)有

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= \dot{y}_T, \\ \dot{y}_2 &= \dot{y}_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

此时, 变压器的短路阻抗标么值就可和线路阻抗标么值一样, 直接用来形成导纳阵。

对于三绕组变压器来说, 可以按同样的原理, 用星形电路来模拟, 如图 1.4 所示^[3]。这样就把三绕组变压器的等值电路转变为两个双绕组变压器的等值电路。图中 z_{ih} , z_{kh} , z_{jh} 分别为归算到低压侧的等值短路阻抗标么值。

1.3 形成导纳矩阵的程序框图

利用计算机形成导纳矩阵应首先明确各有关数据的存放地址。对稀疏阵来说, 数据的存放, 目前都采用压缩存放(即排除零元素存放)的方法以节省内存。这样, 不同行和列的所有元素都放在一套数组内。为了有效而快速地存取所需要的某行某列的元素, 就必须采用特殊的存放格式或表格, 以便能迅速地查找到所需要的数据。这种表格形式称为链式列表法(见表 1.2)。

然而, 链式列表法虽便于计算机对稀疏阵元素的操作, 但对使用者来说却是不方便的, 尤其不便于做输入原始数据的准备工作。为此, 对于用户来说往往采用一种存放网络数据的自然方法, 称为 $i-j$ 列表法^[4]。

为了形成导纳阵, 首先应当向计算机输入电网的原始数据, 它们包括支路两端的节点号(或称起始节点号与终端节点号) $i-j$, 支路的电阻和电抗值, 对地支路的电抗值, 以及变压器支路的非标准变比等。为了存放这些数组, 我们可以在机器内开出依次以 II, JJ, WR, WX, WXC, WNT 为标志的数组。

为了说明存放网络数据的 $i-j$ 列表法, 现以图 1.5 的电力系统作为例子, 其中节点 1 和节点 3 之间有双回线路相连接。

根据图 1.5, 我们可以写出隶属于各数组的原始数据, 见表 1.1。

表 1.1 基本上是以节点作为基准来描述网络结构的。从表 1.1 可见, 在以节点 1 为基准时, 我们填写了支路 1-2 的支路阻抗, 而到以节点 2 为基准时, 又填写了支路 2-1 的支路阻抗, 也就是说, 每条支路在 $i-j$ 列表中出现两次。这从描述网络结构的矩阵元素来看, 即既有上三

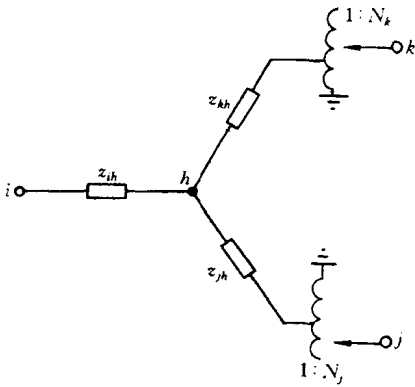


图 1.4 三绕组变压器的等值电路图
(h 为增加的虚构节点)

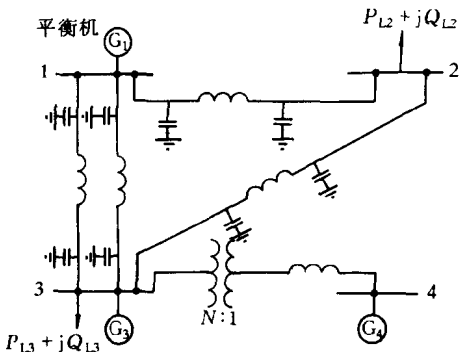


图 1.5 模型系统接线图
(其中支路数据均为阻抗标么值)
注: 节点 1 为平衡节点, 节点 4 为 PV 节点

角元素又有下三角元素。由于电力网络矩阵是一个对称阵,因此这种填写数据的方法从占用的内存看,是很不经济的。在一般实用程序中,往往采用只给出上三角元素(或下三角元素)的另一种 $i-j$ 列表法,如附录 A 给出的 IEEE 标准测试系统的原始数据。但是本课程的目的,是便于说明编写程序的基本技巧,那么采用目前的列表法,就有便于说明问题的优点。

表 1.1 原始数据的 $i-j$ 列表

数组名 单元地址	II	JJ	WR	WX	WXC	WNT
1	1	2	r_{12}	x_{12}	$-x_{120}$	0.0
2	1	3	r_{13}	x_{13}	$-x_{130}$	0.0
3	1	3	r'_{13}	x'_{13}	$-x'_{130}$	0.0
4	2	1	r_{21}	x_{21}	$-x_{120}$	0.0
5	2	3	r_{23}	x_{23}	$-x_{230}$	0.0
6	3	1	r_{13}	x_{13}	$-x_{130}$	0.0
7	3	1	r'_{13}	x'_{13}	$-x'_{130}$	0.0
8	3	2	r_{23}	x_{23}	$-x_{230}$	0.0
9	3	4	0.0	x_{34}	0.0	N
10	4	3	0.0	x_{34}	0.0	$-N$

对于表 1.1,还有几点需要说明:

(1) $i-j$ 列表法,是一个按用户提供的网络结构来进行存贮节点间支路数据的自然方法,有些数据可以按任意顺序存取,如 II, JJ 不一定要按递升顺序(见表 1.1)或递减顺序来填写。但是要注意的是:若两节点间有双回或多回支路(线路或变压器)相连接,为了方便处理,规定这些支路数据应连续存放。图 1.5 中节点 1 和节点 3 之间存在双回线路,对应的原始数据 $i-j$ 列表中则连续存放 1-3、1-3 两条支路的支路阻抗。

(2) 所有数组的维数由网络中支路数的两倍来决定。例如在本例中有 5 条支路,故取维数为 10。有关数据则分别存放在各有关数组的相应单元中。

(3) 支路 3-4 为具有非标准变比的变压器支路, N 侧在节点 3, 1 侧在节点 4。在填写 WNT 的数据时,对 II=3, JJ=4 的支路,因 N 在 II 侧,则取 WNT 为 $+N$;而对 II=4, JJ=3 的支路,因 N 在 JJ 侧,则取 WNT 为 $-N$ 。这样就便于分清应用式(1.16)的第 2 式或第 3 式来修正节点 3 及节点 4 的自导纳。

(4) 不是非标准变比变压器支路(即输电线路和标准变比变压器支路),其 WNT 值均赋以 0.0。

在有了表 1.1 的原始数据后,紧接着要形成以导纳值表示的链式列表(表 1.2)。表 1.2 给出了导纳阵中所有互导纳在计算机中的存贮地址。自导纳则另行存贮(表 1.3)。

表 1.2、表 1.3 中绝大部分数组名的含义,可以从其单元中存放的内容而得到理解。其中:

$$-(g_{ij} + jb_{ij}) = - \left(\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + j \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \right),$$

$$b_{ij0} = \frac{-1}{-x_{ij0}}.$$

表 1.2 链式列表(互导纳)

数组名 单元地址	IFD	JF	GF	BF	BF1	NT	数组名 单元地址
1	1	2	$-g_{12}$	$-b_{12}$	$1/x_{12}$	0.0	1
2	3	3	$-g_{13}$	$-b_{13}$	$1/x_{13}$	0.0	2 ^①
3	5	1	$-g_{12}$	$-b_{12}$	$1/x_{12}$	0.0	3
4	8	3	$-g_{23}$	$-b_{23}$	$1/x_{23}$	0.0	4
5	9	1	$-g_{13}$	$-b_{13}$	$1/x_{13}$	0.0	5 ^①
		2	$-g_{23}$	$-b_{23}$	$1/x_{23}$	0.0	6
		4	0.0	$-b'_{34}$	$1/(Nx_{34})$	N	7
		3	0.0	$-b''_{34}$	$1/(Nx_{34})$	-N	8

① g_{13}, b_{13}, x_{13} 分别为已计及双回路后得到的总电导、总电纳和总电抗值。

而 b'_{34}, b''_{34} 和 b'''_{34} 则表示计及了变压器的非标准变比。其中, $b'_{34} = \frac{b_{34}}{N}, b''_{34} = b'_{34} + y_2, b'''_{34} = b'_{34} + y_3$ (参看图 1.3)。

表 1.3 自导纳列表

数组名 单元地址	GD	BD
1	$g_{12} + g_{13}$	$b_{12} + b_{13} + b_{120} + b_{130}$
2	$g_{12} + g_{23}$	$b_{12} + b_{23} + b_{120} + b_{230}$
3	$g_{13} + g_{23}$	$b_{13} + b_{23} + b'''_{34} + b_{130} + b_{230}$
4	0.0	b'''_{34}

现在需要说明的是数组 IFD 的含义:

(1) 根据网络结构图 1.5, 我们有如图 1.6 所示的导纳阵结构形式。其中 $\times$ 和 $\blacktriangle$ 都代表存放互导纳的非零非对角元, 而 $\blacktriangle$ 则代表每行的第一个非零非对角元。如果把所有非零非对角元都按行存放在一个数组内, 那么每行第一个非零非对角元的地址: 1 (属第 1 行), 3 (属第 2 行), 5 (属第 3 行), 8 (属第 4 行), 就是 IFD 数组的存放内容。所以 IFD 就代表每行非零非对角元首元的地址, 简称为每行首址。通过数组 IFD 和列指数数组 JF 可以寻出图 1.6 的导纳阵中任一非零非对角元所在地址。

(2) 相邻两个 IFD 元素之差, 就代表每行有几个非零非对角元, 例如 $\text{IFD}(4) - \text{IFD}(3) = 8 - 5 = 3$, 说明第 3 行有 3 个非零非对角元。

(3) 由于 IFD 除表示每行首址外, 还表明每行中有几个非零非对角元, 所以它的维数应为 $\text{IM} + 1$ (IM 表示网络节点总数), 以便表明最后一行具有几个非零非对角元。

(4) 从表 1.2 可见, 如果要知道某一支路连接哪两个节点, 可以通过数组 IFD 作为媒介, 由 IFD 的相邻两个单元地址来确定节点号。例如, 如果要知道 BF(7) (即 BF 数组的第 7 个单元) 的支路与哪些节点有关, 可以通过 IFD 的单元地址来确定其一端的节点号, 因为

$$(\text{IFD}(3) = 5) < 7 < (\text{IFD}(4) = 8)。$$

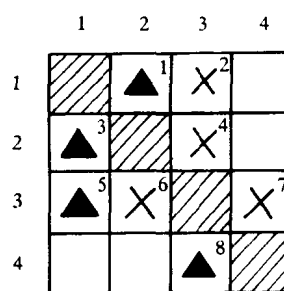


图 1.6 导纳阵结构图
(非零元上方的数字
为其存放地址)

所以可以确定 BF(7)所连的一端节点号为 3。至于另一端节点号,可以通过列指数数组 JF 来确定,由于

$$JF(7)=4,$$

所以该支路的另一端连接节点 4。由此可见,该支路是起始节点为节点 3、终端节点为节点 4 的支路。

除了说明数组 IFD 的含义及作用外,还需注意以下三点:

(1) 在表 1.2 中,JF,BF 等数组既用来存放导纳矩阵上三角非零元,又同时用于存放导纳矩阵下三角非零元的有关元素值,所以它们的维数应为支路数的两倍(注意:双回路已被归成一条支路)。

(2) 通过表 1.3 可以确定某一自电导或自电纳值隶属于哪一个节点。

(3) 若节点 i, j 间存在双回线路或多回线路,则将这些线路导纳值的总和作为节点 i, j 间的互导纳。

从表 1.1 的 $i-j$ 列表法变换成表 1.2 和表 1.3 的形式,可以有多种实施方案。本书为了便于说明和容易理解,利用式(1.8)及式(1.16)来逐步实现导纳矩阵的形成。其思路可以用图 1.7 的原理框图来表示。

图 1.7 中的三个原理框分别对应的较详细流程图为图 1.8、图 1.9 及图 1.10。下面逐个说明这三个详细框图。

(1) 计算各节点对地电纳的流程(见图 1.8)。详细流程图(图 1.8)中的标识符意义如下:

IM: 节点总数

MM: 支路数的两倍

BD($\cdot$): 节点的自电纳值

BC: 临时工作变量

计算各节点对地电纳的基本原则是搜索与该节点相连的支路,然后把这些支路的等值对地电纳值相加,即为该节点的对地电纳值。以图 1.5 系统而言,原始数据的存放见表 1.1。

以计算节点 1 的对地电纳为例,节点 1 与节点 2,3 均有支路相连,而且与节点 3 之间存在双回线路。我们应用数组 II 来寻找起始节点号与节点 1 相同的支路的单元地址。这里为了便于说明问题,图 1.5 中的每条支路都表示成两条不同起始节点和终端节点的支路。

此时, $I=1$ 表示从节点 1 开始,接着临时工作变量 BC 清零,从第 1 条支路($J=1$)开始搜索, $II(1)=1=I$,说明第 1 条支路的起始节点号与节点 1 相同,转入第 6 框,由于 $WXC(1) \neq 0$,即存在对地支路,所以在第 7 框内计算对地电纳值,叠加入临时变量 BC 内。然后,其流程说明可见表 1.4。

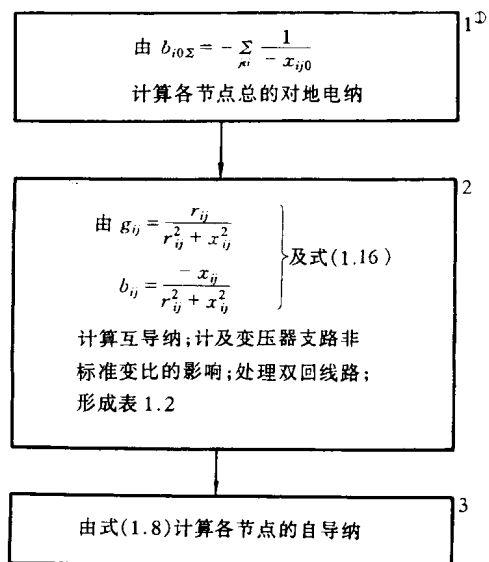


图 1.7 导纳矩阵形成的原理框图

① $j \in i$ 表示与节点 i 相邻接的节点

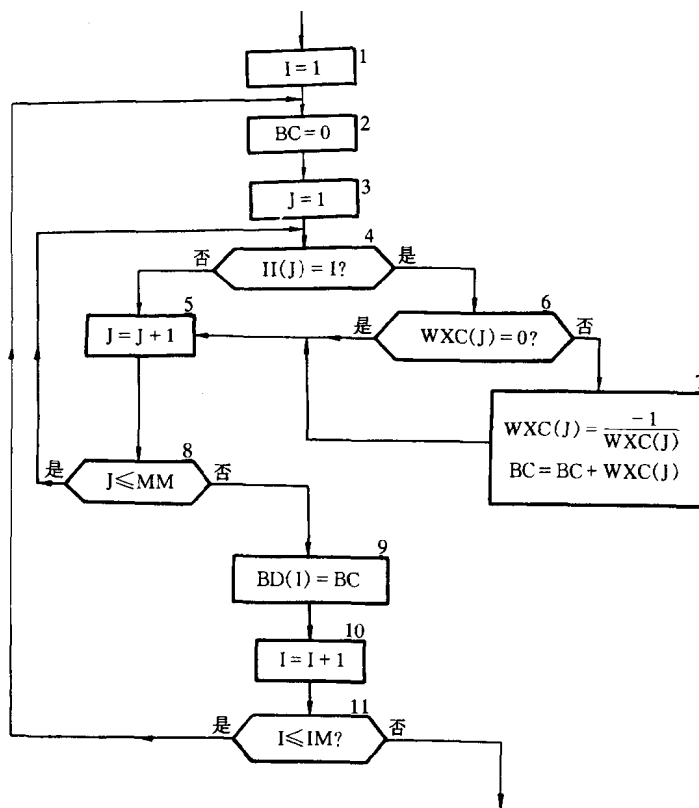


图 1.8 计算对地电纳框图(图中 I, J 为循环变量)

表 1.4 计算对地电纳流程的说明

程序框	说 明
$J = J + 1 = 2$	开始处理第 2 条支路
$J = 2 < MM (MM = 10)$	判断 J 是否已超支路数范围
$II(2) = I = 1$	第 2 条支路的起始节点号与节点 1 相同, 需计入该支路的对地电纳
$WXC(2) = x_{130} \neq 0$	该支路存在等值对地支路(或称其对地电抗值不为零)
$WXC(2) = \frac{-1}{WXC(2)}$ $BC = BC + WXC(2)$	计算该支路的对地电纳值, 并叠加入临时变量 BC 中
$J = J + 1 = 3$	开始处理第 3 条支路
$J = 3 < MM$	判断 J 是否已超支路数范围, 此时 J 尚未超出范围
$II(3) = 1 = I$	第 3 条支路的起始节点号与节点 1 相同, 需计入该支路的对地电纳
$WXC(3) = x'_{130} \neq 0$	该支路存在等值对地支路
$WXC(3) = \frac{-1}{WXC(3)}$ $BC = BC + WXC(3)$	计算该支路的对地电纳值, 并叠加入临时变量 BC 中
$J = J + 1 = 4$	开始处理第 4 条支路

续表

程序框	说 明
$J = 4 < MM$	判断 J 是否已超出支路数范围,此时 J 尚未超出范围
$II(4) = 2 \neq I$	第 4 条支路的起始节点号与节点 1 不同,无需计及该支路的对地电纳
$\vdots$	$\vdots$
$J = J + 1 = 10$	开始处理第 10 条支路
$J = 10 = MM$	判断 J 是否已超出支路数范围,此时 J 尚未超出范围
$II(10) = 4 \neq I$	第 10 条支路的起始节点号与节点 1 不同,无需计及该支路的对地电纳
$J = J + 1 = 11$	开始处理第 11 条支路
$J = 11 > MM$	判断 J 是否已超出支路数范围,此时 J 已超出范围。说明搜索起始节点号与节点 1 相同的支路的过程已结束,转入第 9 框
$BD(1) = BC$	将 BC 值赋予 BD(1),即此时的临时变量 BC 的值为节点 1 的对地电纳
$I = I + 1 = 2$	开始处理节点 2
$\vdots$	$\vdots$

计算节点 2,3,4 的对地电纳的步骤与节点 1 的相同,图 1.8 的最后结果是形成 $BD(1) \sim BD(4)$,此时数组 BD 内存放的值是构成各节点自电纳的一部分——各节点的对地电纳值。

应当指出,在通过图 1.8 的运算后,表 1.1 中数组 WXC 存放的值已经变为相应支路的对地电纳,而不再是原来的对地容抗。

(2) 计算各支路互导纳的流程(见图 1.9)。详细流程图(图 1.9)中数组标识符的意义如下:

JF:各单元列指数

GF:支路互电导

BF:支路互电纳

BF1:用 $\frac{1}{x_{ij}}$ 表示的支路互电纳,其负值用于形成 BX 型潮流解法中系数阵 B' 的非对角元(原理详见第 3 章)

NT:变压器变比

GD:各节点的自电导

BD:各节点的自电纳

计算各支路互导纳流程的关键有三点:

①形成 IFD 数组(或形成表 1.2):首先给定 $IFD(1) = 1$,然后依次统计与节点 i 有支路相连的节点号($i = 1, 2, 3, 4$),即统计导纳阵中的非零非对角元,就可以顺次得出数组 IFD 的值。

②计及变压器支路非标准变比的影响:通过变压器变比数组 WNT 可以确定某支路是否为变压器支路,而且变比 N 是在该支路的起始节点侧还是终端节点侧,分别用式(1.16)来修正非标准变比变压器支路的互导纳和对地导纳。因为一个系统内很可能有两台或两台以上的变压器并联运行,因此修正对地导纳的步骤也放在这个框图内进行。

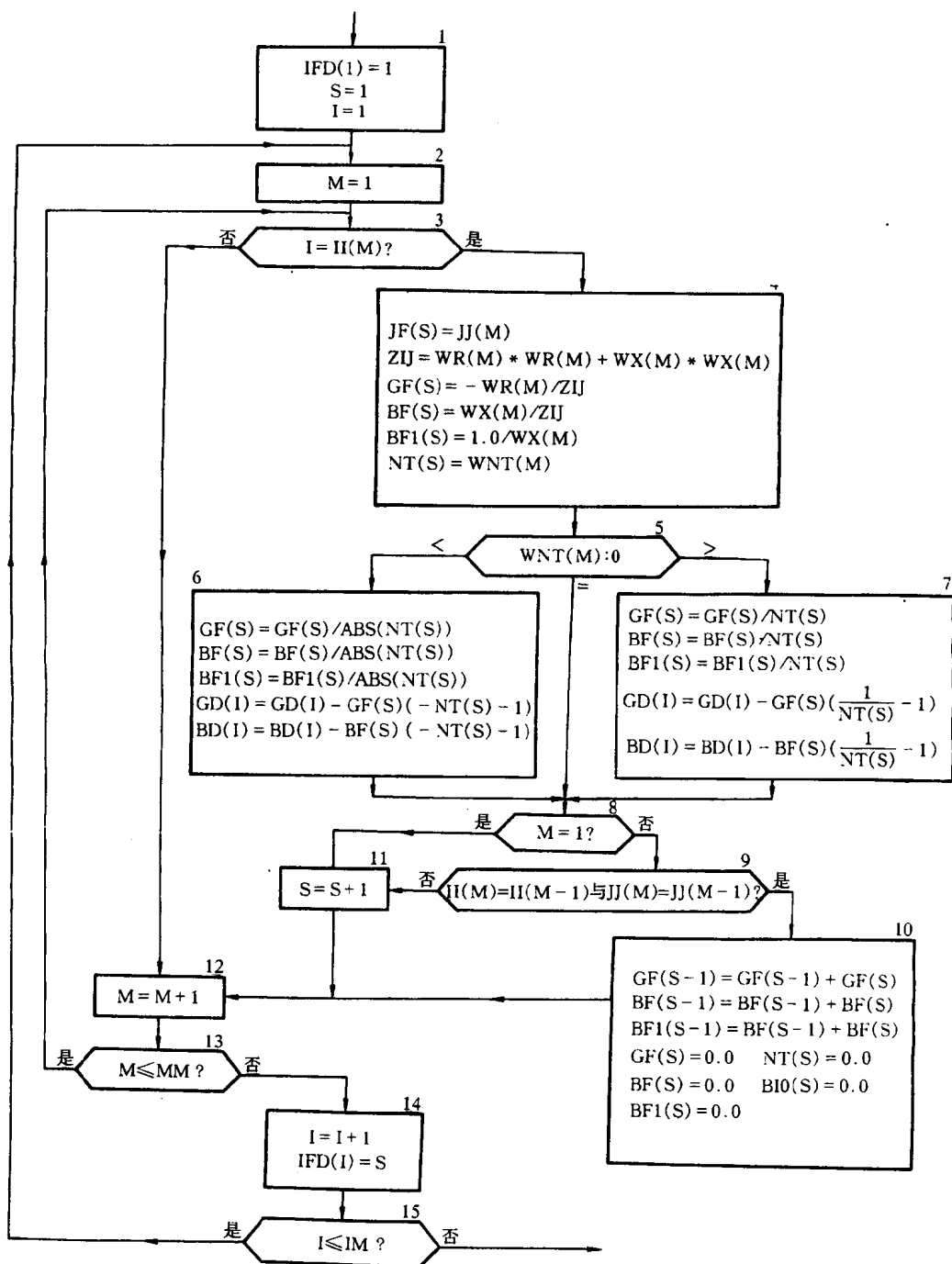


图 1.9 计算节点间互导纳框图(图中 I, M 为循环变量; S 为计数变量)

③处理双回(或多回)线路:由于在原始数据的存放过程中,双回(或多回)线路是连续排列的,因此从同一起始节点号开始检索时,只要在表 1.1 中前后两条支路的列指数 JJ 一致,则可判定这两条线路为双回线路,将它们的导纳值相加,就起到了双回线路等值成单回线路的作用。多回线路可以视作几个双回线路来处理。