



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电力系统分析

房大中 主编

房大中 贾宏杰 编著

1-43



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电力系统分析

房大中 主编

房大中 贾宏杰 编著

科学出版社

北京

TM711-43

F257

内 容 简 介

本书重点阐述电力系统分析涉及的元件模型和计算机分析方法。全书共分11章,包括电力网络的数学模型、电力系统潮流的计算机分析方法、电力系统的经济运行、同步电机的数学模型、同步电机三相短路暂态过程分析、电力系统故障的计算机算法、电力系统稳定性分析中的元件模型、电力系统稳定性的基本概念、电力系统小扰动稳定性、电力系统暂态稳定性、提高电力系统稳定性的措施。每章都提供了一些思考题,便于学生掌握相关知识。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业的本科生教材,也可供高职、高专相关专业师生参考,还可作为电力工程技术人员的参考资料和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/房大中主编;房大中,贾宏杰编著. —北京:科学出版社,2009
(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)
ISBN 978-7-03-026211-0

I. 电… II. ①房…②房…③贾… III. 电力系统-系统分析-高等学校-教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 228892 号

责任编辑:余江 潘继敏 / 责任校对:张怡君
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2010年1月第一次印刷 印张: 17 1/2
印数: 1—4 000 字数: 353 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是为电气工程及其自动化专业本科生编写的一门专业课教材,也是天津大学李林川教授主编的《电力系统基础》一书的配套教材。

电气工程及其自动化专业的本科生,在学习了“电路”、“电机学”、“电力系统基础”课程后可继续学习本书。本书重点讲述电力系统分析涉及的元件模型和计算机分析方法,其中:第1章介绍电力网络的数学模型;第2章介绍电力系统潮流分析的数学模型及常用的计算机方法;第3章介绍电力系统有功负荷的经济分配和最优潮流的基本概念及计算方法;第4章引出电力系统稳态和暂态分析中的同步电机的数学模型;第5章为同步电机三相短路电流的解析分析方法;第6章为电力系统短路及断线故障的计算机分析方法;第7章介绍电力系统暂态稳定性分析中的元件模型,包括发电机励磁系统、调速器模型及负荷模型;第8章介绍电力系统各种稳定性的基本概念;第9章和第10章介绍电力系统小扰动和暂态稳定性的分析方法;第11章介绍提高电力系统稳定性的措施,其内容包括安全稳定控制技术的基本概念及实现方法。编者希望通过本书的学习,可以使读者对电力系统的各种安全稳定问题及分析方法有一个比较全面的了解。

本书由房大中任主编,第1~6章由房大中编写,第7~11章由贾宏杰编写。

本书初稿承蒙余贻鑫教授审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此深表感谢。同时感谢编者的研究生为本书所做的绘图及文字校对工作。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009年9月

目 录

前言

第 1 章 电力网络的数学模型	1
1.1 节点电压方程与节点导纳矩阵	1
1.1.1 节点电压方程的建立	1
1.1.2 节点导纳矩阵元素的物理意义	3
1.1.3 节点导纳矩阵形成与修改的计算机方法	5
1.1.4 节点方程的实数化求解方法	8
1.2 节点阻抗矩阵	8
1.2.1 节点阻抗矩阵表示的网络方程	8
1.2.2 节点阻抗矩阵的特点及其元素的物理意义	9
1.2.3 节点阻抗矩阵元素的求解方法	9
1.2.4 节点阻抗矩阵元素的实数化求解方法	10
思考题	11
第 2 章 电力系统潮流的计算机分析方法	12
2.1 潮流计算的数学模型.....	12
2.1.1 节点的功率方程	12
2.1.2 潮流计算中节点的分类	13
2.1.3 电力网络的潮流方程	14
2.2 牛顿-拉夫逊潮流算法	15
2.2.1 牛顿迭代算法	16
2.2.2 牛顿法的几何解释	17
2.2.3 极坐标牛顿潮流算法的雅可比矩阵	17
2.2.4 直角坐标牛顿潮流算法的雅可比矩阵	19
2.2.5 初值的设置与元件通过功率和电流的计算.....	21
2.2.6 牛顿潮流算法流程及评价.....	22
2.3 快速解耦潮流算法.....	24
2.3.1 快速解耦潮流算法的基本原理	24
2.3.2 快速解耦潮流算法的评价.....	25
2.4 直流潮流算法.....	27
思考题	28

第 3 章 电力系统的经济运行	29
3.1 电力系统经济运行的基本概念	29
3.2 火电厂间有功负荷的经济分配	29
3.3 水火电厂间有功负荷的经济分配	34
3.4 电力系统最优潮流	36
3.4.1 最优潮流的数学模型	37
3.4.2 最优潮流计算的降维梯度法	39
3.4.3 解耦最优潮流	43
思考题	45
第 4 章 同步电机的数学模型	46
4.1 abc 坐标系的同步电机数学模型	46
4.1.1 理想同步电机	46
4.1.2 abc 坐标系的同步电机方程	48
4.2 dq0 坐标系的同步电机数学模型	52
4.2.1 派克变换	52
4.2.2 dq0 坐标系的同步电机方程	52
4.2.3 派克变换的物理解释	54
4.3 同步电机的标幺值基本方程	56
4.4 电机参数表示的同步电机数学模型	59
4.4.1 同步电机参数	59
4.4.2 同步电机参数与其原始参数的关系	61
4.4.3 电机参数表示的同步电机方程	63
4.4.4 同步电机的电磁转矩方程	64
4.5 同步电机的简化数学模型	65
4.5.1 定子电压方程简化模型	65
4.5.2 转子电压磁链方程简化模型	66
4.6 同步电机的稳态数学模型及相量图	68
4.6.1 用同步电抗表示的同步电机稳态模型	68
4.6.2 用暂态电抗表示的同步电机稳态模型	70
4.6.3 用次暂态电抗表示的同步电机稳态模型	71
思考题	73
第 5 章 同步电机三相短路暂态过程分析	74
5.1 同步电机三相短路物理过程分析	74
5.1.1 同步电机三相短路的特点及磁链守恒原理	74
5.1.2 无阻尼绕组同步电机空载三相短路的物理过程	74
5.2 无阻尼绕组同步电机三相短路电流计算	77

5.2.1	不计衰减时同步电机空载短路电流计算	77
5.2.2	不计衰减时同步电机负载状态下的短路电流计算	80
5.2.3	自由电流衰减的时间常数	82
5.3	有阻尼绕组同步电机三相短路电流计算	86
5.3.1	不计衰减定子转子短路电流计算	86
5.3.2	自由电流分量的衰减时间常数	91
5.4	强行励磁对同步电机短路暂态过程的影响	94
	思考题	95
第6章	电力系统故障的计算机算法	97
6.1	三相对称短路故障计算	97
6.2	简单不对称故障计算	99
6.2.1	序网络端口电压方程	99
6.2.2	不对称短路故障计算	101
6.2.3	不对称断线故障计算	104
6.3	复杂故障的计算	105
6.3.1	不对称故障的通用边界条件	105
6.3.2	多重故障计算	107
	思考题	109
第7章	电力系统稳定性分析中的元件模型	110
7.1	概述	110
7.2	发电机的转子运动方程	111
7.2.1	转子运动方程的推导	111
7.2.2	转子运动方程的标幺值表示	113
7.2.3	惯性时间常数及物理含义	114
7.3	发电机功角及功率特性	115
7.3.1	转子位置角	115
7.3.2	功角及简单电力系统稳态功率特性	116
7.3.3	用其他电势表示的发电机功率特性	118
7.3.4	复杂系统的功率特性	121
7.4	功率特性影响因素分析	122
7.4.1	网络参数的影响	122
7.4.2	自动励磁调节器的影响	125
7.5	发电机励磁系统	127
7.5.1	发电机励磁系统的构成	127
7.5.2	主励磁系统模型	129
7.5.3	发电机励磁系统数学模型	133

7.6	原动机及调速器系统	134
7.6.1	水轮机及调速器系统	134
7.6.2	汽轮机及调速器系统	136
7.6.3	原动机及调速器系统简化模型	138
7.7	电力负荷模型	138
7.7.1	静态负荷模型	139
7.7.2	感应电动机负荷模型	140
7.7.3	其他负荷模型简介	141
	思考题	142
第8章	电力系统稳定性的基本概念	144
8.1	电力系统稳定性概述	144
8.2	小扰动稳定性的初步概念	146
8.3	暂态稳定性的初步概念	149
8.4	负荷稳定的初步概念	151
8.5	电压稳定的初步概念	153
	思考题	159
第9章	电力系统小扰动稳定性	160
9.1	小扰动稳定性基础概念	160
9.1.1	动力系统模型	160
9.1.2	运动稳定性的基本概念	162
9.1.3	系统的线性化模型	163
9.1.4	系统控制参数变动的的影响	164
9.1.5	电力系统小扰动稳定性分析步骤	165
9.2	单机-无穷大系统小扰动稳定性分析	166
9.2.1	不计发电机阻尼时的稳定性分析	166
9.2.2	计及发电机阻尼时的稳定性分析	169
9.2.3	小扰动稳定储备系数和系统阻尼因子	171
9.3	简单电力系统小扰动稳定分岔分析	173
9.3.1	系统模型	173
9.3.2	系统小扰动稳定性分析	176
9.4	多机电力系统小扰动稳定性分析	182
9.4.1	系统模型	182
9.4.2	系统初始点的小扰动稳定性分析	184
9.4.3	系统负荷水平变动对小扰动稳定性的影响	187
9.4.4	发电机出力对系统小扰动稳定性的影响	188
9.4.5	综合考虑负荷水平和调度方式变化对系统小扰动稳定性的影响	191

思考题	192
第 10 章 电力系统暂态稳定性	194
10.1 概述	194
10.1.1 大扰动后的暂态过程	194
10.1.2 电力系统暂态稳定分析模型及其简化	195
10.1.3 电力系统暂态稳定分析方法	198
10.1.4 暂态稳定性研究的一些新问题	199
10.2 单机无穷大系统的暂态稳定判据——等面积定则	200
10.2.1 发电机各阶段的功率特性曲线	200
10.2.2 暂态稳定和不稳定场景分析	201
10.2.3 等面积定则	203
10.3 电力系统暂态稳定分析数值方法	205
10.3.1 常微分方程的数值积分方法	205
10.3.2 微分-代数方程的数值积分方法	210
10.4 单机无穷大系统暂态稳定数值分析	212
10.4.1 电力系统模型	212
10.4.2 不计阻尼时的暂态性分析	212
10.4.3 影响系统暂态稳定性的因素分析	217
10.5 多机电力系统暂态稳定性分析简介	220
10.5.1 暂态稳定分析的网络模型	221
10.5.2 电力系统暂态稳定分析的一般步骤	225
10.5.3 多机电力系统暂态稳定分析示例	228
思考题	232
第 11 章 提高电力系统稳定性的措施	234
11.1 概述	234
11.2 在电力系统规划设计阶段可采取的措施	235
11.2.1 提高系统功率极限的原理	235
11.2.2 改善发电机运行特性	236
11.2.3 改善输电线路的运行参数	238
11.2.4 改善变压器运行特性	245
11.2.5 实施无功补偿	247
11.2.6 优化保护装置	248
11.3 DyLiacco 安全构想和运行控制措施	249
11.3.1 DyLiacco 安全构想	249
11.3.2 EMS 系统安全监控功能简介	250
11.3.3 电力系统运行控制的三道防线	252

11.4 电力系统运行控制措施	253
11.4.1 电力系统预防控制	254
11.4.2 电力系统紧急控制	256
11.4.3 实际例子	262
11.5 电力系统恢复控制	262
11.5.1 制定恢复计划和实施恢复培训	263
11.5.2 有功平衡和频率控制	263
11.5.3 无功平衡和电压控制	264
11.5.4 继电保护及安全自动装置的配合	265
思考题	266
参考文献	267

第 1 章 电力网络的数学模型

随着计算机技术的飞速发展,计算机已成为分析复杂电力系统运行状态和动态响应不可或缺的计算工具。各种电力系统分析皆和电力网络的数学模型有关,本章介绍复杂电网的节点导纳和节点阻抗矩阵的形成和计算方法。电力系统计算中大都采用标么值,在本章中如无特殊说明,所有变量皆为统一系统基准容量下的标么值。

1.1 节点电压方程与节点导纳矩阵

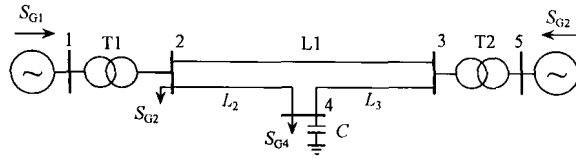
反映电力网络中电流与电压间关系的数学方程称为网络方程,建立网络方程的方法包括基于基尔霍夫电流定律(KCL)的节点电压法和基于基尔霍夫电压定律(KVL)的回路电流法。因为电力网等值电路中的接地支路较多,所以一般电力网络节点电压方程的数目要比回路电流方程的数目少很多。另外,复杂电网节点电压方程的建立和修改比较容易,因而电力系统分析中大都采用节点电压方程。

1.1.1 节点电压方程的建立

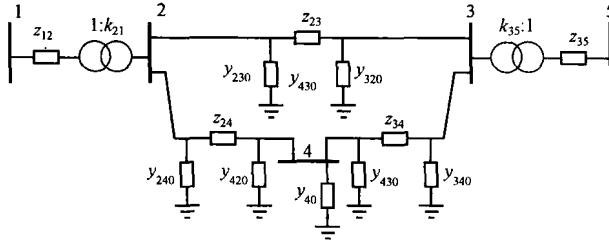
以图 1-1(a)所示简单电力系统为例来说明建立其节点电压方程的方法。在该系统中,节点 1 和 5 为发电机母线,节点 2、3 和 4 为负荷或联络母线。该电力网络由输电线、变压器和接在节点 4 上的补偿电容等元件构成。变压器采用理想变压器模型,线路采用 π 型等值电路模型,并将节点 4 上的补偿电容用接地导纳表示,则可以得出图 1-1(b)所示等值电路。将变压器转化为 π 型等值电路,用导纳表示支路阻抗参数,并包括节点注入电流的系统等值电路图如图 1-1(c)所示。注意,这里将元件等值电路中的导纳用小写字母 y 而不用大写字母 Y 表示,其原因是避免与后面的节点导纳矩阵中的元素相混淆,其中下标带零的表示接地导纳,例如, y_{ij0} 表示线路或变压器 π 型等值电路中节点 i 侧的接地导纳, y_{j0} 表示节点 j 的接地导纳。在等值电路图 1-1(c)中,每一节点包括一个节点注入电流 $\dot{I}_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 相量,它的规定正方向为由地指向该节点,节点的电压用 $\dot{U}_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 表示,为各节点对地电压相量。

由图 1-1(c)对每一节点应用 KCL,可列出系统的电力网络的节点方程如式(1-1)所示。

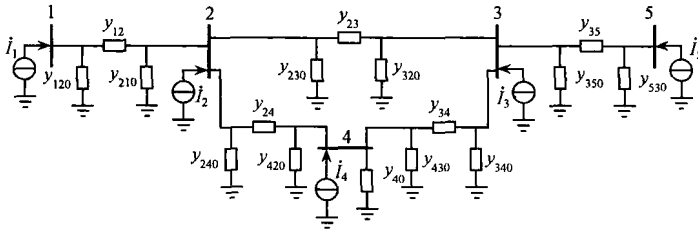
$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{120}\dot{U}_1 + y_{12}(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \\ \dot{I}_2 = (y_{210} + y_{230} + y_{240})\dot{U}_2 + y_{12}(\dot{U}_2 - \dot{U}_1) + y_{23}(\dot{U}_2 - \dot{U}_3) + y_{24}(\dot{U}_2 - \dot{U}_4) \\ \dot{I}_3 = (y_{320} + y_{340} + y_{350})\dot{U}_3 + y_{23}(\dot{U}_3 - \dot{U}_2) + y_{34}(\dot{U}_3 - \dot{U}_4) + y_{35}(\dot{U}_3 - \dot{U}_5) \\ \dot{I}_4 = (y_{40} + y_{420} + y_{430})\dot{U}_4 + y_{24}(\dot{U}_4 - \dot{U}_2) + y_{34}(\dot{U}_4 - \dot{U}_3) \\ \dot{I}_5 = y_{530}\dot{U}_5 + y_{35}(\dot{U}_5 - \dot{U}_3) \end{cases} \quad (1-1)$$



(a) 电力系统接线图



(b) 电力系统采用理想变压器的等值电路图



(c) 化掉理想变压器的系统等值电路图(包括节点注入)

图 1-1

式(1-1)左边为图 1-1(c)各节点注入电流,右边为各节点沿与其相连支路流出电流的代数。式(1-1)可写成式(1-2)所示标准矩阵形式,称为电力网络的复系数节点电压方程。节点电压方程由节点导纳矩阵、节点电压相量和节点注入电流相量构成。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \\ \dot{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

式(1-2)左端系数矩阵即为节点导纳矩阵,其中对角线元素为

$$Y_{11} = y_{120} + y_{12}, \quad Y_{22} = (y_{210} + y_{230} + y_{240}) + y_{12} + y_{23} + y_{24}$$

$$Y_{33} = (y_{320} + y_{340} + y_{350}) + y_{23} + y_{34} + y_{35}$$

$$Y_{44} = (y_{40} + y_{420} + y_{430}) + y_{24} + y_{34}, \quad Y_{55} = y_{530} + y_{35}$$

非对角元素为

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}, \quad Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}, \quad Y_{24} = Y_{42} = -y_{24}, \quad Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

$$Y_{35} = Y_{53} = -y_{35}, \quad Y_{13} = Y_{31} = Y_{14} = Y_{41} = Y_{15} = Y_{51} = Y_{25} = Y_{52} = Y_{45} = Y_{54} = 0$$

上述对简单电力网络建立节点导纳矩阵的方法可推广到一般电力网络。设电力网络有 n 个节点,若节点 i 通过线路或变压器 π 型等值电路与节点 j 相连,则称节点 i 与节点 j 相关联,用符号 $j \in i$ 表示,反之称节点 i 与节点 j 不相关联,用符号 $j \notin i$ 表示。如图 1-1(c)所示,假定相关节点间的电路模型只用一个 π 型等值电路表示(包括存在多个元件并联的情况),同样地,对于节点存在多个接地电容或电感的情况,接地等值电路亦用一个导纳 y_{i0} 表示,于是节点 i 的节点方程可用式(1-3)概括。

$$\begin{aligned} \dot{I}_i &= (y_{i0} + \sum_{j \in i, j \neq i} y_{ij0} + \sum_{j \in i, j \neq i} y_{ij}) \dot{U}_i + \sum_{j \in i, j \neq i} (-y_{ij}) \dot{U}_j \\ &= Y_{ii} \dot{U}_i + \sum_{j \in i, j \neq i} Y_{ij} \dot{U}_j \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中, Y_{ii} 称为节点 i 的自导纳,显然任一节点的自导纳都具有非零性; Y_{ij} 称为节点 i 与节点 j 间的互导纳,若 $j \in i, Y_{ij} = -y_{ij}$, 反之若 $j \notin i, Y_{ij} = 0$ 。于是一般 n 节点电力网络的节点方程可用式(1-4)表示。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_i \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

由以上分析不难得出以下节点导纳矩阵性质:

(1) 节点导纳矩阵是 n 阶复系数方阵,由于接地支路的存在,所以它是非奇异矩阵。

(2) 考虑实际电网母线平均只与 3~5 线路或变压器相连,鉴于 $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} (j \in i)$ 及 $Y_{ij} = 0 (j \notin i)$, 所以实际电力网络的节点导纳矩阵是非常稀疏的对称复系数矩阵。

一般情况下, n 节点电力网络节点相量方程可以简记为

$$YU = I \quad (1-5)$$

式中,节点导纳矩阵 Y 为 $n \times n$ 阶复系数矩阵; U 为 n 维节点电压相量构成的复向量; I 为 n 维节点注入电流相量构成的复向量。

1.1.2 节点导纳矩阵元素的物理意义

若令电力网络除 k 节点外的其余节点皆直接接地,即满足条件 $\dot{U}_k \neq 0, \dot{U}_j = 0 (j = 1, 2, \dots, n, j \neq k)$ 时,由式(1-4)节点方程可得

$$Y_{ik} = \frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-6)$$

式(1-6)表明 Y_{ik} 的物理意义为(包括 $i = k$ 时的自导纳和 $i \neq k$ 时的互导纳):当电力

网络除 k 节点其余节点皆接地时,节点 i 注入电流相量同施加于节点 k 的电压之比。

例 1-1 对图 1-1(a) 系统,假定对系统统一功率基准图 1-1(b) 电力网络的标么值参数为,变压器 T1 和 T2: $z_{12} = j0.1, k_{21} = 1.05, z_{35} = j0.175, k_{35} = 1.0$; 线路 L1、L2 和 L3: $z_{23} = 0.03 + j0.08; y_{230} = y_{320} = j0.02, z_{24} = 0.02 + j0.053; y_{240} = y_{420} = j0.013, z_{34} = 0.018 + j0.048; y_{340} = y_{430} = j0.012$; 电容器: $z_{40} = -j20.0$, 试计算该电力网络节点导纳矩阵参数。

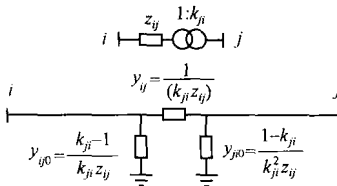


图 1-2 理想变压器电路转换为
变压器 π 型等值电路图

解 图 1-2 中给出了理想变压器电路转换为变压器 π 型等值电路图的公式,可见变压器元件(对照图 1-2)对节点导纳矩阵自导纳和互导纳元素的贡献分别为

$$\Delta Y_{ii} = \frac{k_{ji} - 1}{k_{ji} z_{ij}} + \frac{1}{k_{ji} z_{ij}} = \frac{1}{z_{ij}} \quad (1-7)$$

$$\Delta Y_{jj} = \frac{1 - k_{ji}}{k_{ji}^2 z_{ij}} + \frac{1}{k_{ji} z_{ij}} = \frac{1}{k_{ji}^2 z_{ij}} \quad (1-8)$$

$$\Delta Y_{ij} = -\frac{1}{k_{ji} z_{ij}} \quad (1-9)$$

应用式(1-7)、式(1-8)和式(1-9),图 1-1(b) 电力网络节点导纳矩阵参数可求出如下:

$$Y_{11} = y_{120} + y_{12} = \frac{1}{z_{12}} = \frac{1}{j0.1} = -j10.0$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{k_{21} z_{12}} = -\frac{1}{1.05 \times j0.1} = j9.5238$$

$$\begin{aligned} Y_{22} &= y_{230} + y_{240} + \frac{1}{z_{23}} + \frac{1}{z_{24}} + \frac{1}{k_{21}^2 z_{12}} \\ &= j0.02 + j0.013 + \frac{1}{0.03 + j0.08} + \frac{1}{0.02 + j0.053} + \frac{1}{1.05^2 \times j0.1} \\ &= 10.3422 - j36.5123 \end{aligned}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -\frac{1}{z_{23}} = -\frac{1}{0.03 + j0.08} = -4.1096 + j10.9589$$

$$Y_{24} = Y_{42} = -\frac{1}{z_{24}} = -\frac{1}{0.02 + j0.053} = -6.2326 + j16.5161$$

$$\begin{aligned} Y_{33} &= y_{320} + y_{340} + \frac{1}{z_{23}} + \frac{1}{z_{34}} + \frac{1}{k_{35}^2 z_{35}} \\ &= j0.02 + j0.012 + \frac{1}{0.03 + j0.08} + \frac{1}{0.018 + j0.048} + \frac{1}{1.0^2 \times j0.175} \\ &= 10.9589 - j34.913 \end{aligned}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -\frac{1}{z_{34}} = -\frac{1}{0.018 + j0.048} = -6.8493 + j18.2648$$

$$\begin{aligned} Y_{44} &= y_{420} + y_{430} + \frac{1}{z_{24}} + \frac{1}{z_{34}} + \frac{1}{z_{40}} \\ &= j0.013 + j0.012 + \frac{1}{0.02 + j0.053} + \frac{1}{0.018 + j0.048} + j0.05 \\ &= 13.0819 - j34.7059 \end{aligned}$$

$$Y_{35} = Y_{53} = -\frac{1}{k_{35} z_{35}} = -\frac{1}{1.0 \times j0.175} = j5.7143$$

$$Y_{55} = y_{530} + y_{53} = \frac{1}{z_{35}} = \frac{1}{j0.175} = -j5.7143$$

将以上计算结果填入Y矩阵可得

$$Y = \begin{bmatrix} 0.0 - j10.0 & 0.0 + j9.5238 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 + j9.5238 & 10.3422 - j36.5123 & -4.1096 + j10.9589 & -6.2326 + j16.5161 & 0.0 \\ 0.0 & -4.1096 + j10.9589 & 10.9589 - j34.9130 & -6.8493 + j18.2648 & 0.0 + j5.7143 \\ 0.0 & -6.2326 + j16.5161 & -6.8493 + j18.2648 & 13.0819 - j34.7059 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 + j5.7143 & 0.0 & 0.0 - j5.7143 \end{bmatrix}$$

1.1.3 节点导纳矩阵形成与修改的计算机方法

在研究电力网络节点导纳矩阵形成与修改的计算机方法之前,先要设计一种电力网络参数的输入方法。假定构成电力网络的元件包括双绕组变压器、输电线路及母线接地支路。对变压器,假定三绕组变压器已转化为三个双绕组变压器的等值电路,且略去励磁导纳支路,若需考虑励磁导纳支路,则将该支路视为接到相应节点上的母线接地支路处理。书中的母线接地支路可以表示母线上的接地电容和接地电感,亦可模拟短路故障等异常情况。

本书介绍的电力网络参数的输入方法以电力网络元件为单位,如表 1-1 每一行所示,其中:

第一和第三个字段为字符串型数据,表示元件的首节点名和尾节点名。

第二和第四个字段为整数型数据,表示元件的首节点和尾节点编号,如果尾节点编号为 0,表示该行数据对应的元件为接地支路元件。

第五和第六个字段为实数型数据,若该行对应变压器元件,这两个数据分别表示变压器绕组的等值电阻和电抗;若该行对应输电线(或母线接地支路元件),这两个数据分别表示该元件模型的串联等值电阻和电抗。

第七和第八个字段为实数型数据,分别表示输电线 π 型等值电路一端的接地电纳和变压器的变比,若第八个字段的数据为空,表示该行对应输电线元件,否则为双绕组变压器元件。

表 1-1 所示的输入文件内容为图 1-1(b)所示电力网络的输入参数。需要注意的是,双绕组变压器的变比统一规定为首节点至尾节点的变比,为 $1:k$;另外,允许电力网络存在并联元件,例如,若图 1-1 网络增加一条与输电线 L1 相同的并联输电线,表 1-1 输入文件中只要再增补一行与第四行相同的数据即可。另外,需要指出的是输入文件对每行数据的先后次序无限制。

表 1-1 图 1-1 所示电力网络形成节点导纳矩阵的输入文件列表

首节点名	首节点编号 i	尾节点名	尾节点编号 j	$R/(p.u.)$	$X/(p.u.)$	$B/2/(p.u.)$	$k/(p.u.)$
BUS1	1	BUS2	2	0.0	0.1	—	1.05
BUS5	5	BUS3	3	0.0	0.175	—	1.0
BUS2	2	BUS3	3	0.03	0.08	0.02	—
BUS2	2	BUS4	4	0.02	0.053	0.013	—
BUS3	3	BUS4	4	0.018	0.048	0.012	—
BUS4	4	—	0	0.0	-20.0	—	—

1. 节点导纳矩阵的形成方法

对照表 1-1 所示的电力网络输入文件格式,形成 n 节点电网节点导纳矩阵的方法描述如下。

读入每一行数据,且执行以下操作:

若该行对应变压器元件,则作

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{i,i} \leftarrow Y_{i,i} + \frac{1}{R+jX}; \quad Y_{j,j} \leftarrow Y_{j,j} + \frac{1}{k^2(R+jX)} \\ Y_{i,j} \leftarrow Y_{i,j} - \frac{1}{k(R+jX)}; \quad Y_{j,i} \leftarrow Y_{j,i} - \frac{1}{k(R+jX)} \end{array} \right\} \quad (1-10)$$

若该行对应输电线元件,则作

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{i,i} \leftarrow Y_{i,i} + j\frac{B}{2} + \frac{1}{R+jX}; \quad Y_{j,j} \leftarrow Y_{j,j} + j\frac{B}{2} + \frac{1}{R+jX} \\ Y_{i,j} \leftarrow Y_{i,j} - \frac{1}{R+jX}; \quad Y_{j,i} \leftarrow Y_{j,i} - \frac{1}{R+jX} \end{array} \right\} \quad (1-11)$$

若该行对母线接地支路元件,则作

$$\left\{ Y_{i,i} \leftarrow Y_{i,i} + \frac{1}{R+jX} \right\} \quad (1-12)$$

对电力网络输入文件的每一行执行上述操作后, $n \times n$ 阶复系数节点导纳矩阵 Y 便形成了。上述方法的特点是逐个将每一电力网络的元件对节点导纳矩阵的贡献添加到矩阵中。实际电力网络具有高维、稀疏及对称的特点,如何针对上述特点,并结合节点导纳矩阵的实际使用设计节点导纳矩阵的稀疏存储方法,对提高电力系统分析的效率是一件非常有意义的研究工作。

2. 节点导纳矩阵的修改

在电力系统运行中,电力网络的接线方式会因运行方式或元件检修而变化,例如,某电力线路或变压器投入前后的状况,以及某些元件参数变更前后的运行状况。由于元件投入、退出或参数改变只涉及该元件节点导纳矩阵的自导纳和互导纳变化,可不必重新形成节点导纳矩阵,仅需对原有的矩阵作某些修改,修改的方法是增补一个节点导纳矩阵修改的输入文件,读入该文件,并执行式(1-10)、式(1-11)和式(1-12)的操作。以下介绍几种典型的修改情况。

(1) 在原有网络 i, j 之间加入一新元件,相当于在修改输入文件中增加一行,其表述方法与表 1-1 所示相同。

(2) 在原有网络加入一新元件同时增加一节点,例如,输电线或变压器元件。为叙述简单,令 $n \leftarrow n+1$, 新元件首节点编号为 i , 尾节点编号为 j , 即新增节点 n , 于是情况(2)等同于情况(1), 相当于在修改输入文件中增加一行,其表述方法与表 1-1 所示相同。

(3) 在原有网络 i, j 之间切除一元件, 相当于在修改输入文件中增加一行, 其表述方法与表 1-1 所示相同, 但其对应元件的 R, X 和 $B/2$ 取其原值的负值。

(4) 原有网络 i, j 之间变压器的变比由 k 变为 k' , 相当于在修改输入文件中增加两行, 一行对应切除变比为 k 的变压器元件, 另一行对应增加变比为 k' 的变压器元件, 其表述方法与表 1-1 所示相同。

表 1-2 所示为图 1-1(b) 所示电力网络节点导纳矩阵的一种修改输入文件列表, 其中第一行和第二行相当于 1、2 节点间的变压器变比由 1.05 修改为 1.10; 第三行相当于 2、4 节点间增加一条参数和原输电线参数相同的输电线元件; 第四行相当于切除 3、4 节点间的输电线元件; 第五行相当于在 4 号节点上增加一个变压器元件, 其新节点编号为 6; 第六行表示在 2 号节点上增加一个 5.0 的接地电抗元件, 修改后的电力网络结构如图 1-3 所示。如表 1-2 所示, 在原有网络 i, j 之间切除一输电线元件, 相当于在原网络中增加一个输电线 π 型等值电路, 但其对应的 R, X 和 $B/2$ 参数取其原值的负值。类似地, 在原有网络 i, j 之间切除一变压器元件, 相当于在原网络中增加一个变压器 π 型等值电路, 但其对应的 R 和 X 参数取其原值的负值。作为练习, 读者可采用例 1-1 所示的方法直接建立图 1-3 电力网络的节点导纳矩阵, 读者也可以练习设计直接由输入文件建立和修改节点导纳矩阵的计算机程序。

表 1-2 图 1-1 所示电力网络节点导纳矩阵修改的输入文件列表

首节点名	首节点编号 i	尾节点名	尾节点编号 j	$R/(p. u.)$	$X/(p. u.)$	$B/2/(p. u.)$	$k/(p. u.)$
BUS1	1	BUS2	2	0.0	-0.1	—	1.05
BUS1	1	BUS2	2	0.0	0.1	—	1.10
BUS2	2	BUS4	4	0.02	0.053	0.013	—
BUS3	3	BUS4	4	-0.018	-0.048	-0.012	—
BUS6	6	BUS4	4	0.0	0.15	—	0.99
BUS2	2	—	0	0.0	5.0	—	—

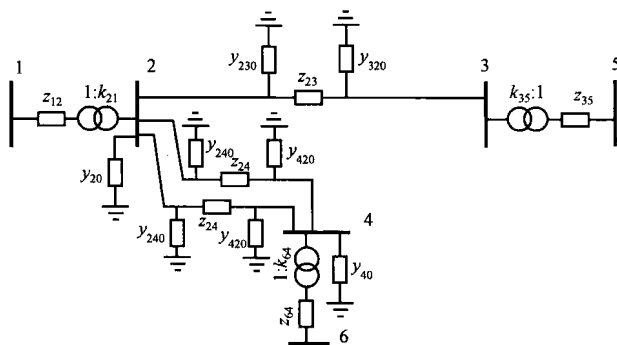


图 1-3 电力系统采用理想变压器的等值电路图