

电力系统 运行控制与调度

第二版

中国电力出版社

电力系统 运行控制与调度

韩肖清 编著
闫有朋 主审

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了电力系统运行控制与调度的基本理论,并介绍了计算机在电力系统运行和控制方面的应用问题。书中包括:电力系统模型;电力系统潮流计算;电力系统经济调度与优化潮流;电力系统负荷频率控制;电力系统无功功率与电压控制以及现代控制技术在电力系统中的应用等内容。

本书可供从事电力系统运行与调度以及电力系统自动化的科技人员和高等院校有关专业教师、研究生和高年级学生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统运行控制与调度/韩肖清编著. —北京:中国水利水电出版社, 1996
ISBN 7-80124-193-2

I. 电… II. 韩… III. ①电力系统运行-控制②电力系统调度 IV. TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 15061 号

书 名	电力系统运行控制与调度
作 者	韩肖清 编著 闫有朋 主审
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
经 售	全国各地新华书店
排 版	密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 6.75 印张 155 千字
版 次	1996 年 11 月第一版 1997 年 5 月北京第二次印刷
印 数	1071—3070 册
定 价	15.00 元

前 言

电力工业在任何国家都处于经济发展的首位,从目前来看,对电能的需求大约是为每十年翻一番,因此电力系统的规模在日益壮大。为了满足电力系统运行的基本要求,最好是将单一系统联合,组成联合电力系统。联合电力系统的规划、运行和控制会遇到许多问题,解决这些问题需要用到最优技术和控制理论,从而需要确定数学模型并从中找到控制措施。

第一章主要讲述综合负荷模型、调速装置模型、发电机模型等,这些知识在研究电力系统控制问题时都要用到。

第二章主要讲述潮流计算。根据发电容量大小、系统之间转换功率大小和其他一些条件,通过潮流计算可以确定不同运行方式下网络中各点的电压和支路功率的大小。

系统经济运行总的来说可以认为是在一定条件下对原始资源的有效利用。电力系统经济运行涉及到为满足负荷的需求,并达到最小运行费用所采用的方法和技术,本书第三章将主要讨论该方面的内容。

电力系统最优控制的目的是提供优质、可靠的电能。电能质量由频率和电压决定,而保证电能质量的先决条件是有功功率的平衡和无功功率的平衡。有功功率的平衡和频率调整在第四章中讨论;无功功率的平衡和电压调整在第五章中讨论。

电力系统根据所承受的扰动大小,可以大致划分为大扰动和小扰动。速度较慢且变化较小的扰动可以通过调速器和励磁机等有效地控制。利用调速器和辅助调节装置进行的频率控制问题在第四章中详细介绍。

电力系统电压控制的目的是无论在最大负荷时,还是在最小负荷都能得到满意的电压分布。为此所用的设备,如:有载调压变压器、可控无功功率电源等在第五章中讨论。

近代电力系统的特点是其运行管理上的高度自动化。如今,不仅组成电力系统的各环节都配备有日益数字化的测量、保护、控制装置,而且不少电力系统还配有以计算机为基础的现代能量管理系统。第六章将介绍有关这方面的主要知识。

在编写本书过程中,山西电力中心调度所高级工程师闫有朋同志给予大力的帮助,并承担主审工作;此外,还得到了太原工业大学电力教研室黄东惠教授、张东霞同志的指导和帮助。在此,作者谨向他们表示感谢。

编 著

1996年4月

目 录

前 言

第一章 电力系统模型	1
第一节 负荷模型	1
第二节 速度调节装置	4
第三节 汽轮发电机模型	8
第二章 电力系统潮流计算	10
第一节 概述	10
第二节 潮流分析的系统模型	10
第三节 用 Y_{bus} 的高斯—塞德尔法	11
第四节 牛顿—拉夫逊法	13
第五节 快速解耦法	18
第六节 用 Z_{bus} 的潮流计算	20
第七节 直角坐标形式的二阶潮流算法	22
第八节 有关潮流计算的一些问题	25
第三章 电力系统经济调度与优化潮流	29
第一节 火电厂燃料费用特性	29
第二节 火电厂机组经济调度经典方法	30
第三节 水火电联合运行	36
第四节 优化潮流问题	39
第四章 电力系统负荷频率控制	48
第一节 概述	48
第二节 有功功率的平衡与频率控制	49
第三节 互联系统的运行	50
第四节 负荷频率控制基本原理	58
第五节 现代控制理论的应用	65
第六节 负荷频率控制中的一些问题	76
第五章 无功功率和电压控制	79
第一节 概述	79
第二节 电压控制	80
第三节 无功功率及电压控制装置	81
第四节 无功功率补偿装置的模型	90
第五节 次同步振荡	93
第六章 电力系统现代控制技术	95
第一节 监控系统	95
第二节 能量管理系统	98

第一章 电力系统模型

第一节 负荷模型

一、综合负荷

系统负荷有多种类型，如电炉、照明、电焊机以及其他一些静态的电力设备。这些负荷的有功功率特性和无功功率特性也不一样。将各工业部门消费的功率与农业、交通运输业和市政生活消费的功率相加就可得到电力系统的综合负荷。当系统运行在准静态条件时，可以假设负荷的有功、无功功率只是电压的函数，因为频率基本上保持不变。但要对于动态运行状况来说，系统负荷不仅要与电压大小、频率有关，而且还与它们的微分有关。其数学表达式为

$$P = P(f, |U|)$$

$$Q = Q(f, |U|)$$

和

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P}{\partial |U|} \Delta |U|$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial |U|} \Delta |U|$$

对于稳态运行和本书中所考虑的相对缓慢的动态运行情况下，频率对负荷的影响不考虑。图 1-1、图 1-2 和图 1-3 是一些常用负荷在稳态情况的有功和无功功率随电压变化曲线。

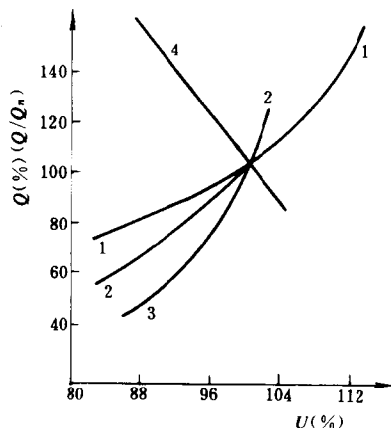


图 1-1 无功功率负荷特性

1—异步电动机（满负荷）；2—异步电动机
65% 满负荷；3—整流设备；4—碳化硅炉

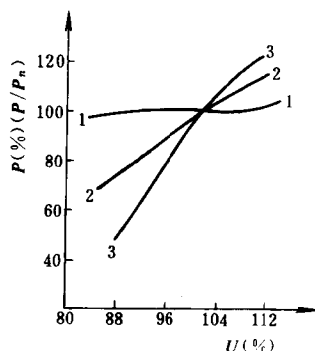


图 1-2 有功功率负荷特性

1—异步电动机；2—电炉；3—整流设备

因为综合负荷与电压的大小有关，而且不同种类的负荷其有功、无功损耗也不同，所以在电力系统研究中很难用某一种模型作为负荷的表达式。本章只考虑电压对负荷的影响。

一些负荷阻抗保持不变，而另一些负荷其电流保持不变。在网络分析中，当用恒定的阻抗模型来模拟系统时，电力系统稳态分析中所用到的计算机解法全部采用功率恒定的负

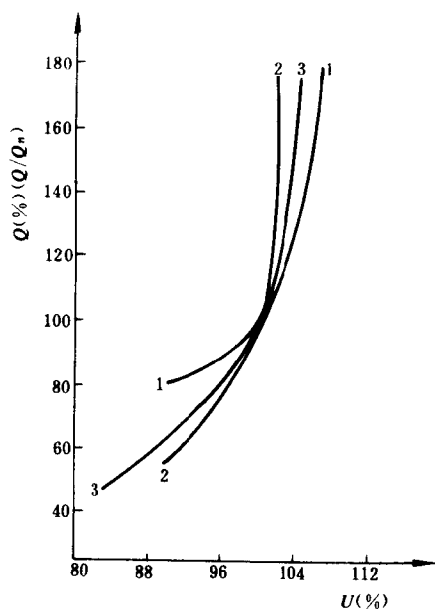


图 1-3 无功功率负荷特性

1—电焊机；2—变压器（空载运行）；
3—变压器（有载运行）

荷模型。

在稳态分析中，建议用指数型模型来表示综合负荷。当电压在额定电压的 80%~120% 范围变化时，电压对系统综合负荷的影响可用下列关系表示

$$P = \left(\frac{U}{U_n} \right)^a P_n \quad (1-1)$$

$$Q = \left(\frac{U}{U_n} \right)^b Q_n \quad (1-2)$$

这里下标 n 表示额定值。一些国家（如美国、波兰、瑞士、德国、前苏联）通过对网络的测试得出：指数 a 一般在 0.6~1.4 范围， b 在 1.5~3.2 范围取值。建议用 $a=1$ ， $b=2$ 的模型来表示综合负荷，也就是对这种综合负荷来说，有功功率损耗与电压直接成正比，而无功需求与电压平方有关。可以看出，当 $a=0$ ， $b=0$ 时，表示功率恒定的负荷模型。

二、电压对等值负荷的影响

对于一个大的相互联接的电力网络，在一些节点处，常用等值负荷表示系统负荷，这样可以减少系统的节点数。否则，从主干线接的上百个辐射线路必须分别当成一个独立支路处理，从而使计算中数组维数大大地增大。图 1-4 所示的为支路末端负荷 ($P+jQ$) 用主干线的等值负荷代替。这个等值负荷用 $\bar{P}+j\bar{Q}$ 表示。 R 和 X 是支路的电阻和电抗， X_c 是容性电抗，它包括了用于线路无功补偿的电容。

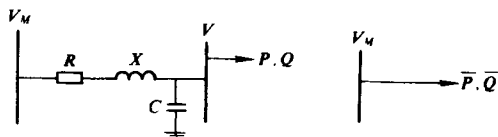


图 1-4 支路等值负荷

等值负荷 $\bar{P}$ 和 $\bar{Q}$ 可以表示为

$$\bar{P} = A_0 + A_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_1} + A_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_2} \quad (1-3)$$

$$\bar{Q} = B_0 + B_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_3} + B_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_4} \quad (1-4)$$

三、等值负荷功率的推导

对于功率恒定模型，以式 (1-3) 和式 (1-4) 所表示的等值功率可由下面的推导得出。

$$\begin{aligned} \bar{P} &= P + I^2 R \\ &= P + \left(\frac{P}{U} \right)^2 R + \left(\frac{Q}{U} - \frac{U}{X_c} \right)^2 R \\ &= P - \frac{2Q}{X_c} R + \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} R \left(\frac{U}{U_n} \right)^{-2} + \frac{U_n^2}{X_c} \times \frac{R}{X_c} \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \\ \bar{Q} &= Q + \left(\frac{P}{U} \right)^2 X + \left(\frac{Q}{U} - \frac{U}{X_c} \right)^2 X - \left(\frac{U}{X_c} \right)^2 X_c \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned}
&= Q - 2Q \frac{X}{X_c} + \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} X \left(\frac{U_n}{U} \right)^2 - \frac{U_n^2}{X_c} \left(1 - \frac{X}{X_c} \right) \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \\
&= \left(Q - 2Q \frac{X}{X_c} \right) + \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} X \left(\frac{U}{U_n} \right)^{-2} \\
&\quad - \frac{U_n^2}{X_c} \left(1 - \frac{X}{X_c} \right) \left(\frac{U}{U_n} \right)^2
\end{aligned} \tag{1-6}$$

如果用式 (1-1) 和式 (1-2) 所示的指数关系来表示负荷模型, 而且 $a=1$ 和 $b=2$, 那么等值功率的推导过程如下:

以 I_w 和 I_r 表示电流 I 的有功分量和无功分量

$$\begin{aligned}
\bar{P} &= P + I^2 R \\
&= P + (I_w^2 + I_r^2) R \\
&= I_w U + I_w^2 R + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_c} \right)^2 R \\
&= I_w^2 R + I_w U_n \left(\frac{U}{U_n} \right) + \left(\frac{U_n^2}{X_L} - \frac{U_n^2}{X_c} \right) \left(\frac{R}{X_L} - \frac{R}{X_c} \right) \left(\frac{U}{U_n} \right)^2
\end{aligned} \tag{1-7}$$

$$\begin{aligned}
\bar{Q} &= Q + I^2 X \\
&= I_r U + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_c} \right)^2 X + I_w^2 X \\
&= \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_c} \right) U + \left(\frac{U_n}{X_L} - \frac{U_n}{X_c} \right)^2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 X + I_w^2 X \\
&= \left(\frac{U_n^2}{X_L} - \frac{U_n^2}{X_c} \right) \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 - \left(\frac{U_n}{X_L} - \frac{U_n}{X_c} \right)^2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 X + I_w^2 X \\
&= I_w^2 X + \left(\frac{U_n^2}{X_L} - \frac{U_n^2}{X_c} \right) \left[1 + \left(\frac{X}{X_L} - \frac{X}{X_c} \right) \right] \left(\frac{U}{U_n} \right)^2
\end{aligned} \tag{1-8}$$

若把式 (1-1) 和式 (1-2) 用一种简单的指数形式可表示为

$$\bar{P} = (A_0 + A_1 + A_2) U_m^a \tag{1-9}$$

$$\bar{Q} = (B_0 + B_1 + B_2) U_m^b \tag{1-10}$$

其中

$$a = \frac{L_n \frac{A_0 + A_1 U_b^{K_1} + A_2 U_b^{K_2}}{A_0 + A_1 + A_2}}{L_n U_m} \tag{1-11}$$

$$b = \frac{L_n \frac{B_0 + B_1 U_b^{K_3} + B_2 U_b^{K_4}}{B_0 + B_1 + B_2}}{L_n U_m} \tag{1-12}$$

在实际电网中, 线路阻抗和并联电容的取值范围很大, 但是我们发现指数 a 和 b 各自非常接近于 1 和 2。

相应于不同的 a 、 b 值, 各系数的取值见表 1-1。

表 1-1

相应于 a 、 b 不同值时各系数的取值表

	$a=0; b=0$	$a=1; b=2$
A_0	$P - \frac{ZQ}{X_C} R$	$I_W^2 R$
A_1	$\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$	$I_W U$
A_2	$\frac{U_L^2}{X_C^2} R$	$\left(\frac{U_L^2}{X_L} - \frac{U_C^2}{X_C} \right) \left(\frac{R}{X_L} - \frac{R}{X_C} \right)$
B_0	$Q \left(1 - 2 \frac{X}{X_C} \right)$	$I_W^2 X$
B_1	$\frac{P^2 + Q^2}{U^2} X$	0
B_2	$-\frac{U_L^2}{X_C} \left(1 - \frac{X}{X_C} \right)$	$\left(\frac{U_L^2}{X_L} - \frac{U_C^2}{X_C} \right) \left[1 + \left(\frac{X}{X_L} - \frac{X}{X_C} \right) \right]$
K_1	-2	1
K_2	2	2
K_3	-2	—
K_4	2	2

但是,对于线路电抗完全被补偿的情况,指数是零。这样表示无功功率模型的指数 b 大于平均值 2,只有当线路功率因数达到 0.95 时,有 $b=2$ 。平均值 $a=1$ 和 $b=2$ 不仅适用于随电压变化的综合负荷,而且适用于等值负荷,这里等值负荷就是为了减少计算量,把综合负荷等值到主干线节点处的负荷。

值得考虑的是,在系统安全性研究中常用快速近似潮流,惯用的负荷表达式会带来计算误差,因为在这种情况下,如线路故障或发电机故障时,相关线路电压变化相当大,因此,这些线路上的三相负荷受电压的影响不能忽略。

四、潮流计算中负荷模型的作用

当一个大扰动出现时,所得到的次暂态潮流可以决定系统的状态。在损失了大部分发电能力以后,电力工程师们为了决定潮流值,需要按容量增大系统中其他发电机的发电量。但是,这是一种随机情况,因此为了得到次暂态时期的潮流值,根据预先选择的负荷值,得到的结论往往具有计算误差,而且有时甚至得不到结论。只有当我们把负荷视为随电压变化的有功和无功功率时才能得到接近实际情况的结论。

第二节 速度调节装置

速度调节装置包括如下部分:

(1) 调速器。在负荷频率控制中它是一个误差传感装置,它包括的所有元件都与速度直接有关,同时这些元件又影响系统中的其他元件,起到调节速度的作用。

(2) 调节器控制阀门。它由速度控制装置推动，控制着到汽轮机的输入口。

(3) 速度控制装置。它由如下设备组成：控制杆、联动装置、传动装置、放大装置以及放在调速器和调速器控制阀门之间的继电器。

(4) 调频器。可以让速度调节系统去调节运行中的汽轮发电机组的速度。

一、汽轮发电机的调速器

图 1-5 是调速器的简单示意图。活塞 D 的上下运动控制着蒸汽进汽阀门，可以增大或减少蒸汽的进汽量。活塞 D 的位置变化可以调节 X_C 和 X_B 的位置；而蒸汽进汽量的多少与负荷大小相对应从而决定了 X_A 的位置。当活塞 a 、 b 关闭时， $X_C=0$ ， $X_B=0$ ，即蒸汽进汽阀门并没有完全关闭，因为发电机必须提供其空载损耗，则 ω_0 就是汽轮机空载调节速度。当负荷增加时，速度下降，联动装置带动调速器作用，使活塞 a 、 b 一起向下移动，活塞下口打开使油进入活塞 D 的下方，从而使活塞 D 上升，进汽量增加，速度加快。只有当速度达到原始速度时， A 又回到原来位置，然后活塞 D 停止运动。这样，我们就可以得到同步调速器原理图，如图 1-6 所示。

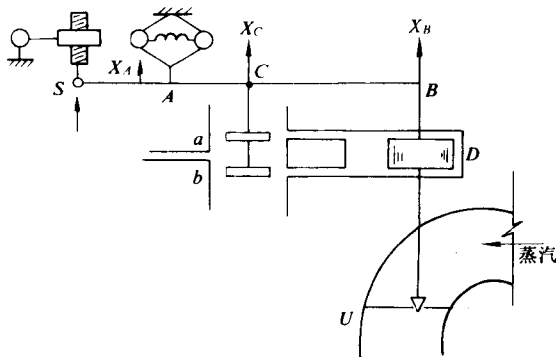


图 1-5 发电机的调速器系统

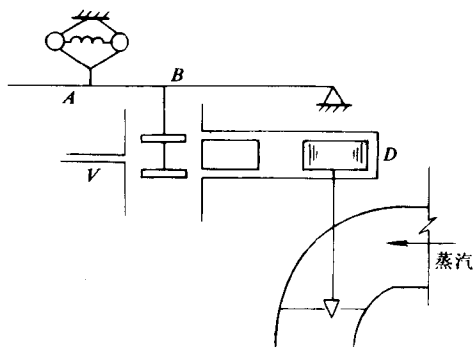


图 1-6 同步调速器系统

在图 1-5 中，在连杆 BC 的作用下，达到新的稳定的状态，不过这时的速度要比空载的速度略小些，从而得到调速系统的下降特性曲线，如图 1-7 所示，因此，可以得到稳态调速器调节速度的极限。

对于一定的速度变化值，单位稳态速度调节可以定义为

$$\text{单位稳态速度调节} = \frac{N_0 - N}{N_r} \quad (1-13)$$

式中： N_0 为空载时的速度； N_r 为额定速度； N 为额定负荷时的速度。

图 1-7 所示是同步特性和下降特性曲线。实际特性应该比直线稍微弯曲些。

二、负荷分配及调速器特性

从图 1-7 可以看出，由于同步特性（A），无论负荷有多大，汽轮机都可保持速度不变。但是，从负荷分配的观点来看，并不能这样运行。原

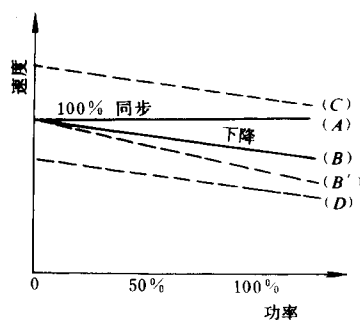


图 1-7 调速器特性

因如下：

(1) 当两台发电机并列运行，一台具有同步特性，另一台具有下降特性。具有下降特性的发电机在额定速度时只能带一定的负荷，而具有同步特性的发电机其所带负荷大小没有限制，如图 1-8 (a) 所示。

(2) 如果两台发电机都具有同步特性的话，所带负荷大小无法确定，如图 1-8 (b) 所示。

(3) 当两台发电机组都具有下降特性时，负荷的分配能够确定，通过适当地调节调速器，可以在两机组之间按照需要进行负荷分配，如图 1-8 (c) 所示。

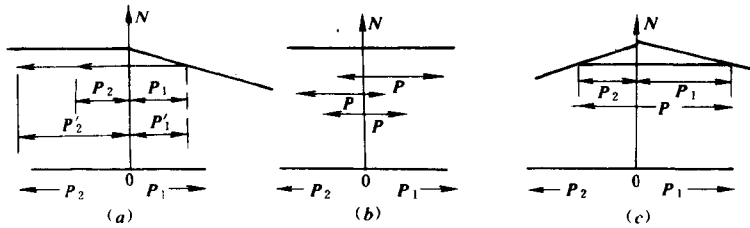


图 1-8 负荷分配和调速器特性

(a) 负荷大小没有限制时；(b) 所带负荷大小无法确定时；(c) 负荷分配能确定时

三、稳态速度调节

进汽阀的开口大小与发电机功率有直接关系，因此

$$\frac{P}{P_r} = \frac{X_B}{B} \quad (1-14)$$

这里 B 是与额定输出功率 P_r 相对应的进汽阀的开启大小；而 X_B 是汽轮机提供输出功率 P 时的进汽阀开口大小。 X_A 的位移量与速度变化成正比，因此

$$\begin{aligned} X_A &= K(N_0 - N) \\ &= K\Delta N \end{aligned} \quad (1-15)$$

连杆比例如下

$$\frac{AC}{CB} = L_1, \frac{CB}{AB} = L_2, \frac{AC}{AB} = L_3$$

因此
$$\frac{X_A}{X_B} = \frac{AC}{CB} = L_1$$

则
$$X_A = L_1 X_B = L_1 \frac{P}{P_r} B \quad [\text{由式(1-14)得}]$$

$$\Delta N = \frac{BL_1}{K} \frac{P}{P_r} \quad [\text{由式(1-15)得}]$$

则稳态速度调节为

$$R = \frac{N_0 - N}{P_r} = \left(\frac{BL_1}{K} \times \frac{1}{P_r N_r} \right) P \quad (1-16)$$

四、调速器特性的调节

对于给定的调速器，可以通过改变连杆比率 L_1 和空载速度 N_0 来改变 R 的大小。如图

1-7 所示, 通过改变连杆比率 L_1 可以改变调速器的下降特性曲线, 从曲线 B 变为曲线 B' 。正如前面所述, 调速器的下降特性关系到负荷的分配问题。这样, 为了使某一台发电机与系统中其余发电机组互相协调配合, 就可以调节 L_1 , 但是这种调节只有在停机状态下进行, 而且很少这样调节。

在系统运行之中, 可以调节空载速度 N_0 , 这是通过改变调频器的蜗轮、蜗杆使 S 点位置变化完成的。因此, 可以平行移动特性曲线, 如图 1-7 中的曲线 C 和曲线 D 。这种调节是通过调频器完成的。

五、速度控制装置的传递函数

由式 (1-15) 可以得到

$$X_A = K(\omega_0 - \omega) = K\Delta\omega \quad (1-17)$$

如果点 B 固定, 那么

$$\frac{X_C}{X_A} = \frac{CB}{AB} = L_2 \text{ 或 } X_C = L_2 X_A \quad (1-18)$$

但是, 由于负荷增加, B 点在 X_B 作用下向上有个位移, 因此 C 点的实际位移量是

$$X_C = L_2 X_A - L_3 X_B \quad (1-19)$$

活塞阀门开启程度, 决定了流入传动装置油量的多少。进汽阀 X_B 与活塞 D 下面总油量成正比, 因此

$$X_B = K \int X_C dt \quad (1-20)$$

等式两边同时进行拉普拉斯变换, 则

$$X_B(S) = \frac{K}{S} X_C(S) \quad (1-21)$$

对式 (1-19) 进行拉普拉斯变换, 同时利用式 (1-21) 得

$$\begin{aligned} X_C(S) &= L_2 X_A(S) - L_3 X_B(S) \\ \frac{S X_B(S)}{K} &= L_2 X_A(S) - L_3 X_B(S) \\ X_B(S) &= \frac{(L_2/L_3)}{\left(1 + \frac{S}{KL_3}\right)} X_A(S) = \frac{K_s}{1 + T_s S} X_A(S) \end{aligned}$$

时间常数 T_s 一般是几毫秒。

G_{sc} = 速度控制装置的传递函数

$$= \frac{X_B(S)}{X_A(S)} = \frac{K_s}{1 + T_s S} \quad (1-22)$$

六、调速器的传递函数

设 M 是飞摆的质量, C_f 是摩擦调节, C_s 是调速系统旋转调节, 则调速器运动方程式为

$$M \frac{d^2 X_A}{dt^2} + C_f \frac{dX_A}{dt} + C_s X_A = K_s \Delta\omega \quad (1-23)$$

等式两边进行拉普拉斯变换

$$(MS^2 + C_f S + C_s) X_A(S) = K_s \Delta\omega(S)$$

变形得

$$\frac{X_A(S)}{\Delta\omega(S)} = \frac{K_S}{MS^2 + C_f S + C_S} = \frac{K_S/M}{S^2 + 2\xi\gamma S + \gamma^2} = G_r(S) \quad (1-24)$$

$$X_A(S) = G_r(S) \Delta\omega(S) \quad (1-25)$$

式中 $G_r(S)$ ——调速器的传递函数；

γ ——无阻尼飞摆振荡的自然频率， $\gamma = \sqrt{\frac{C_S}{M}}$ ；

ξ ——阻尼系数， $\xi = \frac{C_f}{2\sqrt{C_S M}}$ 。

图 1-9 所示是调速系统方框图。

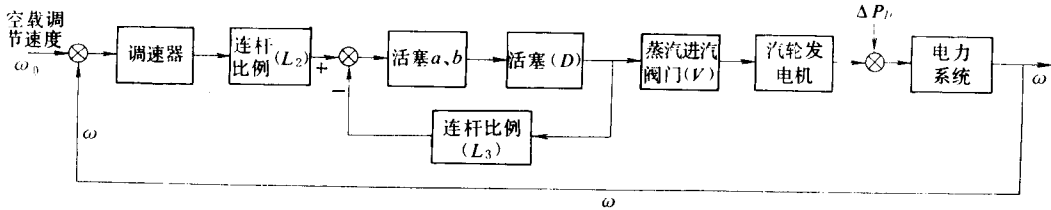


图 1-9 调速系统框图

第三节 汽轮发电机模型

在动态研究中，我们仅关心随着输入阀门位置的变化 ΔX_B ，发电功率变化 ΔP_G 这一关系。为此，具有单一增益的一阶模型可以满足要求。汽轮发电机传递函数可表示为

$$G_{TG} = \frac{\Delta P_G(S)}{\Delta X_B(S)} = \frac{K_G}{1 + ST_G} \quad (1-26)$$

时间常数变化范围在几分之一秒到几分之几秒。

为了理解复式汽轮机系统的时间延时，进行了如下分析。

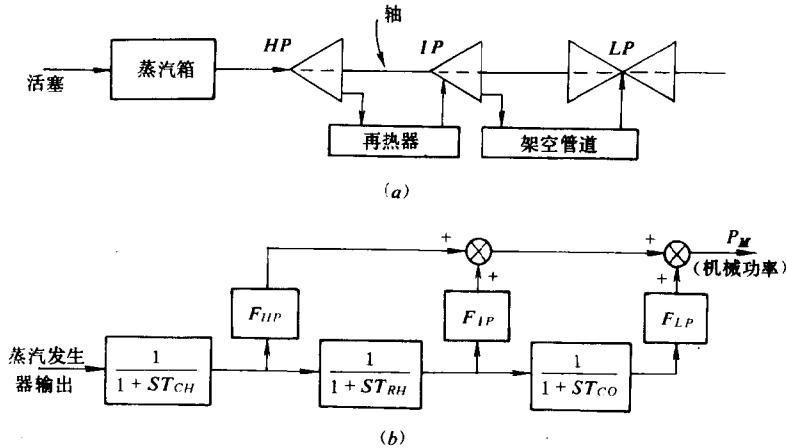


图 1-10 级联复式单一再热器汽轮机
(a) 模型；(b) 框图

被控制的调速器阀门放在进高压汽轮机的入口处以控制汽流量。复式可以是交叉的或者级联着的一个或两个再热器。图 1-10 是级联复式单加热系统。蒸汽允许从蒸汽箱的入口管进入高压缸做功。从高压缸排出的蒸汽进入再热锅炉，过热蒸汽再次允许进入到中压缸做功。从这级排出的汽体通过低压缸的架空管被利用。最终，排出的蒸汽进入冷凝器中。如此就导致了阀门运动和汽流变化之间的时间延时。

对于图 1-11 所示的蒸汽器，当阀门活塞变化时，其动态特性可表示为

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1-27)$$

式中 W ——蒸汽重量，kg；

t ——时间，s；

Q_{in} 、 Q_{out} ——蒸汽器入口和出口处各自的汽流速度，kg/s。

假设汽流与压力成正比，则

$$Q_{out} = \frac{P}{P_0} Q_0 \quad (1-28)$$

这里 P_0 和 Q_0 是蒸汽器内稳态压力和汽流速度。对上式微分得

$$\frac{dQ_{out}}{dt} = \frac{Q_0}{P_0} \times \frac{dP}{dt} \quad (1-29)$$

假设蒸汽器中的温度恒定，则

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dP} \times \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dP} \left(\frac{V}{\gamma} \right) \times \frac{dP}{dt} \quad (1-30)$$

这里 γ 是蒸汽密度 (m^3/kg)，因此，有

$$\begin{aligned} Q_{in} - Q_{out} &= \frac{dW}{dt} = V \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\gamma} \right) \times \frac{dP}{dt} \\ &= V \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\gamma} \right) \times \frac{dQ_{out}}{dt} \times \frac{P_0}{Q_0} \\ &= V \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\gamma} \right) \times \frac{P_0}{Q_0} \times \frac{dQ_{out}}{dt} \end{aligned} \quad (1-31)$$

令

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_0}{Q_0} V \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\gamma} \right) \\ Q_{in} - Q_{out} &= T \frac{dQ_{out}}{dt} \end{aligned} \quad (1-32)$$

进行拉普拉斯变换得

$$\begin{aligned} Q_{in}(S) - Q_{out}(S) &= TS Q_{out}(S) \\ Q_{out}(S) [1 + TS] &= Q_{in}(S) \end{aligned}$$

则

$$\frac{Q_{out}(S)}{Q_{in}(S)} = \frac{1}{1 + TS} \quad (1-33)$$

现在考虑图 1-10 所示的级联复式单一再热汽轮机模型。 T_{CH} 、 T_{RH} 和 T_{CO} 是时间常数，表示蒸汽箱、再热器和架空管各自的延时。 F_{HP} 、 F_{IP} 和 F_{LP} 表示汽轮机在各级的功率。

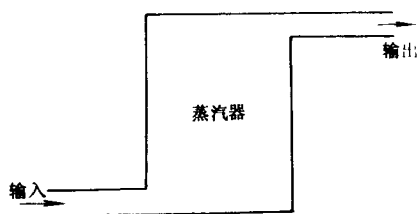


图 1-11 蒸汽器模型

第二章 电力系统潮流计算

第一节 概 述

潮流计算是寻找电力系统稳态运行条件的计算,同时也是各个电力系统部门在计算机上对现有系统最经常作的计算和分析。潮流计算可以提供给定运行条件下网络中功率分布和节点电压的有关信息。这样的研究是电力系统扩展、规划、运行计划、实际运行和控制等工作所需要的。

随着数字式电子计算机大规模、高速度的发展,潮流研究方法已经从过去的物理模拟转变为数字模拟。大量的数学方法可用于求解电力系统潮流问题。本章讨论一些常用方法,这些方法的主要区别在于收敛速度、内存占有量和计算速度方面,而负荷通常以恒定功率表示。

网络中每个节点有四个变量,即①电压大小;②电压相位;③有功功率;④无功功率。这四个变量中给定两个量,余下两个量由潮流计算结果确定。为了计算在潮流计算完成前还不知道的线路有功和无功功率的损耗,我们选一个发电机节点作为松弛节点,也称为平衡节点,该节点的电压大小和其相位是给定的,因此,未知的功率损耗可以归算至该节点从而保证任何时候功率的平衡。一般地,多数节点的有功、无功功率的需求量是给定的,其余节点的电压大小和有功功率是给定的。按照节点给定变量和待求变量的关系,节点可分为三类,如表 2-1 所示。

表 2-1 潮流计算中节点的类型

节 点 类 型	已 知 量	待 求 量	约占系统节点总数的百分数
负荷节点 (PQ 节点)	P_{Gi}, Q_{Gi}	$ U_i , \delta_i$	85%
电压可控节点 (PV 节点)	$P_{Gi}, U_i $	Q_{Gi}, δ_i	15%
平衡节点	$ U_1 , \delta_1 = 0$	P_{G1}, Q_{G1}	1 个

通常我们认为每个节点的负荷功率 P_{Li}, Q_{Li} 是已知的,当发电机功率 P_{Gi}, Q_{Gi} 给定后,则实际上也就给定了 PQ 节点的注入有功 P_i 和注入无功 Q_i 。

第二节 潮流分析的系统模型

节点 i 和其相邻节点 K 之间的参数和变量关系可以用下面式子表示。

节点电压 $\dot{U}_i$

$$|\dot{U}_i| \exp(j\delta_i) = U_i (\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \quad (2-1)$$

节点导纳 Y_{ik}

$$|Y_{ik}| \exp(j\theta_{ik}) = |Y_{ik}| (\cos\theta_{ik} + j\sin\theta_{ik}) \quad (2-2)$$

复功率 $\tilde{S}_i$

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i \dot{I}_i^* \quad (2-3)$$

用下标 G 和 L 表示发电机和负荷

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \operatorname{Re}[\dot{U}_i \dot{I}_i^*] \quad (2-4)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = \operatorname{Im}[\dot{U}_i \dot{I}_i^*] \quad (2-5)$$

节点电流可由下式得到

$$\dot{I}_{bus} = Y_{bus} \dot{U}_{bus} \quad (2-6)$$

因此, 由式 (2-3) 和式 (2-6) 可知对于几个节点的系, 则

$$\dot{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^*} = Y_{ii} \dot{U}_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} \dot{U}_k \quad (2-7)$$

由式 (2-7) 得

$$\dot{U}_i = -\frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} \dot{U}_k \right] \quad (2-8)$$

进一步可得

$$P_i + jQ_i = \dot{U}_i \sum_{k=1}^n \dot{Y}_{ik}^* \dot{U}_k \quad (2-9)$$

以极坐标形式表示得

$$P_i + jQ_i = \sum_{k=1}^n |U_i U_k Y_{ik}| \exp(j(\delta_i - \delta_k - Q_{ik})) \quad (2-10)$$

因此

$$P_i = \sum_{k=1}^n |U_i U_k Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - Q_{ik}) \quad (2-11)$$

和

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |U_i U_k Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - Q_{ik}) \quad (2-12)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n$ ($i \neq$ 平衡节点)。

功率方程式 (2-11) 和式 (2-12) 是非线性的, 对于每个节点 i , 为了得到潮流结果, 要求解 $2(n-1)$ 个这样的方程式, 其中 $|U_i|$ 、 δ_i 、 P_i 和 Q_i 是节点 i 的变量。最后, 平衡节点的功率 $\tilde{S}_1$ 可由下式得到

$$\tilde{S}_1 = \dot{U}_1 \sum_{k=1}^n \dot{Y}_{1k}^* \dot{U}_k = P_1 + jQ_1 \quad (2-13)$$

第三节 用 Y_{bus} 的高斯—塞德尔法

这种方法的求解过程是首先假设除平衡节点的外的所有节点电压值, 平衡节点电压值被指定, 而且在整个计算过程中保持不变。其余 $(n-1)$ 个节点电压关系为

$$\dot{U}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} \dot{U}_k \right] \quad (2-14)$$

可以用迭代法同时求解这 $(n-1)$ 个方程式。为了加速求解, 式 (2-14) 中所有新计算的电压值都标有上标, 则第 $(m+1)$ 次迭代方程可以写为

$$\dot{U}_i^{(m+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^{(m)*}} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{i-1} Y_{ik} \dot{U}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n Y_{ik} \dot{U}_k^{(m)} \right] \quad (2-15)$$

这种方法收敛慢, 因为节点之间的数学耦合关系较弱。一个节点电压值的改善只影响与它有直接联系的节点。采用加速因子可使迭代过程变快。最普遍的方法是在每次迭代后将各 PQ 节点的电压修正量乘以加速因子后, 再修正该节点电压。采用加速因子后, 第 $(m+1)$ 次迭代节点电压为

$$U_i^{(m+1)} = U_i^{(m)} + \alpha (U_{i\text{计算值}}^{(m+1)} - U_i^{(m)}) \quad (2-16)$$

式中 α 称作加速因子, 其值通常为 $1 \sim 2$ (通常选用 1.4 或 1.6)。也可以采用复数的加速因子, 或者节点电压的实、虚部采用不同的实加速因子 α 和 β 。加速因子必须谨慎选择, 以免由于错误的选取造成不收敛。

处理 P 、 U 节点需要电压用直角坐标表示, 设

$$\dot{U}_i = U_i' + jU_i'' \quad (2-17)$$

这里 U_i' 和 U_i'' 是电压 U_i 的实部和虚部, 下列关系

$$U_i'^2 + U_i''^2 = |U_i|_{\text{给定}}^2 \quad (2-18)$$

必须满足。因此经过 m 次迭代后, 电压计算值 $U_i'^{(m)}$ 和 $U_i''^{(m)}$ 必须被调整, 以满足式 (2-18)。计算的电压相角是

$$\delta_i^{(m)} = \arctg \left[\frac{U_i''^{(m)}}{U_i'^{(m)}} \right] \quad (2-19)$$

假定相角保持不变, 那么调整 $U_i'^{(m)}$ 和 $U_i''^{(m)}$ 的方法是

$$U_{i\text{新}}'^{(m)} = |\dot{U}_i|_{\text{给定}} \cos \delta_i^{(m)} \quad (2-20)$$

和

$$U_{i\text{新}}''^{(m)} = |\dot{U}_i|_{\text{给定}} \sin \delta_i^{(m)} \quad (2-21)$$

这些新计算的电压值可以用来计算节点无功功率 $Q_i^{(m)}$ 。用 $Q_i^{(m)}$ 和 $\dot{U}_{i\text{新}}^{(m)}$ 可以计算出新的电压值 $\dot{U}_i^{(m+1)}$ 。无功功率计算公式如下

$$Q_i^{(m)} = -I_m \left\{ \dot{U}_i^{(m-1)*} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{i-1} Y_{ik} \dot{U}_k^{(m)} + \dot{U}_i^{(m-1)*} \sum_{k=i+1}^n Y_{ik} U_k^{(m-1)} \right\} \quad (2-22)$$

在计算无功功率的时候, 必须考虑对无功功率的约束条件。如果计算值超出了这一限制值的话, 那么这个无功功率应取为这一限制值, 并保持不变, 同时也不再要求保证电压大小不变, 则此节点就转变为 PQ 节点, 也就是负荷节点。如果在随后的迭代计算过程中, 计算