

## 第四部分 电力系统运行管理

随着我国经济的发展以及国家电网的迅速有序发展,人们生活水平大大提高,各类生产生活需要不断增加,对于电力企业的稳定性、安全性及供电质量等也提出了更多更高的要求。在这种形势下,电力企业需要优化配电网,提高运行管理水平。电力系统运行是一个复杂的系统,它是由许多发电厂提供电能,通过输电、变电、配电,最后由供电网络向广大用户供电,只有保证各个环节安全、可靠并且有效的运行,才能保证整个电力系统的安全运行。同时要求管辖范围内的每个部门都要在完成各自任务的同时,还要保持发电与负荷之间的平衡。所以,我国电力企业的运行管理就要兼顾自身经营方式,协调各方经济关系,并且在利益分配上也要平衡处理,同时要求我国电力系统明确各自的任务和职责,制定切实可行的电网运行管理办法。

在电力系统中,电能不易存储,电流在电网中按照基尔霍夫定律进行流动。为了满足电网安全高效地运行,并了解电网的运行情况和存在的问题,需要对电网的工作运行进行一系列分析计算。考虑到输电网和配电网的功能与网架结构的差异,其计算也有所不同。对于配电网来说,其网架主要为放射形电网,不存在暂态问题,一般主要进行潮流计算、短路计算、 $N-1$ 校核等常规稳态计算;对于输电网来说,除了进行上述常规计算以外,通常也要对其进行暂态稳定分析、电压稳定分析及过电压计算等。

通过相关计算分析电力网络的相关运行方式,为调度机构的指挥决策提供技术支持,它是整个调度指挥的参谋部,同时也为电力公司其他职能部位提供有关电网运行、规划等面的技术支持,对电网的安全、稳定、经济运行及合理发展起举足轻重的作用。

电力系统的运行管理的职能主要分为:预测用电负荷、制订发电任务、进行安全监控和安全分析、突发事件处理几个部分。

预测用电负荷是指根据负荷变化的历史记录、天气预报、分析用电生产情况和人民生活规律,对未来 24 小时或 48 小时进行全系统负荷预测,编制预计负荷曲线备好相适应的发电容量。

制订发电任务是根据预测的负荷曲线,按经济运行原则,对水能和燃料进行合理规划和安排,分配各发电厂发电任务,包括水电站、火电厂的负荷分配,提出各发电厂的日发电计划;指定调频电厂和调频容量,并安排发电机组的起停和备用,批准系统内发、输、变电设备的检修计划;对系统继电保护及安全自动装置进行统一整定和考核,进行系统潮流和稳定计算等工作,合理安排运行方式。

进行安全监控和安全分析是通过收集全系统主要运行信息,监视运行情况,保证正常的安全经济运行。通过安全分析,采用状态估计和实时潮流计算等应用技术进行事故预想和提出反事故措施,防患于未然。

突发事件处理是对所辖厂、站和网络的重要运行操作进行指挥和监督。在发生系统性事故时,采取有力措施及时处理,迅速恢复系统至正常运行状态。

由于电力系统运行的自身结构组成的复杂性和运行环境复杂性,影响电力系统安全性的影响因素比较多,大致可以分为两大类。内部影响因素主要有:①电力系统元件的故障;②电力市场竞争环境的因素;③电力系统的不稳定;④计算机软、硬件系统的故障;⑤控制和保护系统的故

障；⑥信息系统或通信系统的故障。外部因素主要考虑两个方面，一方面是自然灾害和气候因素的影响。另一方面是由于人为破坏、运行人员误操作、控制与保护系统的参数误整定等造成的。

为了加强电力系统运行管理需要确保电网安全运行、合理满足负荷需要、合理利用能源、加强电能质量监督。

电能不易储存，电网停止供电将造成损失。电网要对电力用户连续不断地供电，首先就必须保证整个电网安全可靠运行。一旦发生事故，造成大面积停电，就会引起社会的混乱，因此从这个意义上说，电网事故是社会的灾难。随着国民经济各部门和人民生活用电更加广泛，对供电的可靠性要求越来越高，停电造成的损失和影响也越来越大。这时，运行机构就要采取措施，首先，不要影响供电；其次，若影响了供电，影响面不要扩大；最后，即使不可避免地要扩大影响面，也要把影响范围尽可能缩小，并尽早恢复供电。

电网经济运行是在保证安全、可靠运行和满足电能质量、用电需要的前提下，根据经济运行的基本原理，制定各厂(站)之间或机组之间的最优负荷分配方案，使整个电网的能耗或运行费用最少，从而获得最大的经济效益。电网运行管理需要综合考虑发电机组的经济性，自然能源的分布性以及电网输电方式等因素，合理安排发电机组的开、停等，以获得电网的最大效益。

电网调度机构在完成电网调度、运行方式、继电保护和通信自动化职能后保证电力系统的可靠、优质、经济运行。具体来说就是保证系统可靠持续运行、保证良好的电能质量和保证系统运行的经济性。

## 第 6 章 电力网络相关计算

### 6.1 电力系统各元件数学模型

数学模型是对系统进行分析的重要手段，在电力系统中主要包括发电机、变压器、电力线路等电力元件，接下来我们会分别给出这几种电力元件的数学模型。

#### 6.1.1 发电机组的数学模型

##### 1. 隐级式发电机数学模型

发电机组的运行总会受到一定条件，如定子绕组温升、励磁绕组温升、原动机功率等的约束。这些约束条件决定了发电机组发出的有功、无功功率有一定的限额。图 6-1 是隐级式发电机的运行极限图。

图中  $OB$  的长度代表发电机的额定视在功率、圆弧  $S$  表示定子绕组温升约束、圆弧  $F$  代表励磁绕组温升约束、直线  $BC$  为原动机功率约束、虚线  $T$  代表其他约束条件。隐极式发电机的运行极限就体现为图 6.1 中曲线段  $OA$ 、 $AB$ 、 $BC$  和虚线  $T$  所包围的面积。发电机发出有功、无功功率所对应的运行点位于这一面积内时，发电机组可保证安全运行。

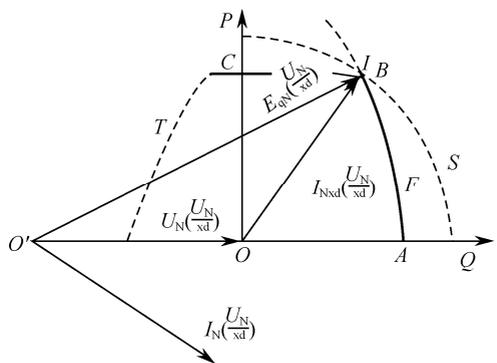


图 6-1 隐级式发电机的运行极限图

作为电力系统中最重要元件——发电机组在稳态运行时的数学模型却极其简单,通常就以两个变量表示,即发出的有功功率  $P$  和端电压  $U$  的大小,或发出的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的大小。而以第一种方式表示时,往往还需伴随给出相应的无功功率限额,即允许发的最大、最小无功功率。这两个数值无非是通过与给定  $P$  相对应的点作直线平行于图 6-1 中横轴时,该直线与线段  $AB$ 、虚线  $T$  相交的交点对应的无功功率。

## 2. 凸极式发电机组的运行限额和数学模型

和隐极式发电机相似,凸极式发电机组的运行极限就体现为图 6-2 中由线段  $OA$ 、 $AB$ 、 $BC$  和虚线  $T$  所包围的面积。其中直线和圆弧所表示的意义和图 6-1 相同。作出运行极限图后,其数学模型的建立也与隐极式相同。

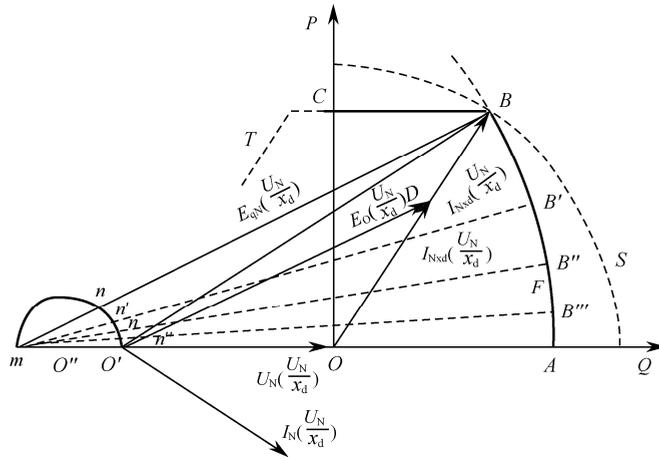


图 6-2 凸极式发电机组的运行极限

## 6.1.2 变压器数学模型

### 1. 双绕组变压器的参数和数学模型

#### (1) 阻抗

① 电阻: 变压器短路损耗  $P_k$  近似等于电流流过变压器时高低压绕组中的总铜耗, 即

$$P_k \approx P_{Cu} = 3I_N^2 R_T = 3 \left( \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T = \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T \quad (6-1)$$

式中,  $U_N$  单位为 V;  $S_N$  单位为 V·A,  $P_k$  单位为 W。改变单位可得

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} \quad (6-2)$$

式中,  $R_T$  为变压器高低压绕组的总电阻 ( $\Omega$ );  $P_k$  为变压器的短路损耗 (kW);

$S_N$  为变压器的额定容量 (MVA);  $U_N$  为变压器的额定电压 (kV)。

② 电抗: 可近似认为, 变压器的短路电压百分值  $U_k\%$  与变压器的电抗  $X_N$  有如下关系:

$$U_k \% \approx \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100$$

故

$$X_T \approx \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{U_k \%}{100} = \frac{U_k \% U_N^2}{1000 S_N} \quad (6-3)$$

式中,  $X_T$  为变压器高低压绕组的总电抗 ( $\Omega$ );  $U_k\%$  为变压器的短路电压百分值。

## (2) 导纳

① 电导: 变压器支路以导纳表示时, 电导可与空载损耗相对应。即

$$G_T = \frac{P_0}{1000U_N^2} \quad (6-4)$$

式中,  $G_T$  为变压器的电导 (S);  $P_0$  为变压器的空载损耗 (kW);  $U_N$  为变压器的额定电压 (kV)。

② 电纳: 变压器空载电流中流经电纳的部分  $I_b$  占很大的比重, 从而它和空载电流  $I_0$  在数值上接近相等, 可以  $I_0$  代替  $I_b$  求取变压器的电纳。

$$B_T = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_N^2}$$

式中,  $B_T$  为变压器的电纳 (S);  $I_0\%$  为变压器的空载电流百分值;

## 2. 三绕组变压器的参数和数学模型

### (1) 电阻

三绕组变压器按三个绕组容量比的不同有三种不同的类型。第 I 种为 100/100/100, 即三个绕组的容量都等于变压器的额定容量; 第 II 种为 100/100/50, 即第三绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%; 第 III 种为 100/50/100, 即第二绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%。

① 如变压器属于第 I 种类型, 可由提供的短路损耗  $P_{k(1-2)}$ 、 $P_{k(2-3)}$ 、 $P_{k(3-1)}$  直接按下式求取各绕组的短路损耗:

$$\begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2}(P_{k(1-2)} + P_{k(3-1)} - P_{k(2-3)}) \\ P_{k2} &= \frac{1}{2}(P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(3-1)}) \\ P_{k3} &= \frac{1}{2}(P_{k(2-3)} + P_{k(3-1)} - P_{k(1-2)}) \end{aligned} \quad (6-5)$$

然后按与双绕组变压器相似的公式计算各绕组电阻:

$$R_{T1} = \frac{P_{k1}U_N^2}{1000S_N^2}, \quad R_{T2} = \frac{P_{k2}U_N^2}{1000S_N^2}, \quad R_{T3} = \frac{P_{k3}U_N^2}{1000S_N^2} \quad (6-6)$$

② 如该变压器属第 II 或者第 III 种类型, 则制造厂提供的短路损耗数据是一对绕组中容量较小的一方达到它本身的额定电流, 即  $I_N/2$  时的值。这时, 应首先将各绕组间的短路损耗数据归算为额定电流下的值, 再运用上列公式求取各绕组的短路损耗和电阻。

### (2) 电抗

各绕组两两间的短路电压  $U_{k(1-2)}\%$ 、 $U_{k(2-3)}\%$ 、 $U_{k(3-1)}\%$  为:

$$\begin{aligned} U_{k1}\% &= \frac{1}{2}(U_{k(1-2)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(2-3)}\%) \\ U_{k2}\% &= \frac{1}{2}(U_{k(1-2)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(3-1)}\%) \\ U_{k3}\% &= \frac{1}{2}(U_{k(2-3)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(1-2)}\%) \end{aligned} \quad (6-7)$$

从而求出各绕组的电抗

$$X_{T1} = \frac{U_{k1}\%U_N^2}{100S_N}, \quad X_{T2} = \frac{U_{k2}\%U_N^2}{100S_N}, \quad X_{T3} = \frac{U_{k3}\%U_N^2}{100S_N} \quad (6-8)$$

### 6.1.3 电力线路数学模型

#### 1. 电力线路的阻抗

(1) 有色金属导线架空线路的电阻

$$r_1 = \frac{\rho}{S} \quad (6-9)$$

式中,  $r_1$  为导线单位长度的电阻 ( $\Omega/\text{km}$ );  $\rho$  为导线材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ );  $S$  为导线的额定截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

(2) 有色金属导线单相架空线路的电抗

$$x_1 = 2\pi f \left( 4.6 \lg \frac{D_{ab}}{r} + \frac{\mu_r}{2} \right) \times 10^{-4} \quad (6-10)$$

式中,  $D_{ab}$  为 a,b 的距离(m);  $\mu_r$  为相对导磁系数。

(3) 有色金属导线三相架空线路的电抗

$$x_1 = 2\pi f \left( 4.6 \lg \frac{D_m}{r} + 0.5u_r \right) \times 10^{-4} \quad (6-11)$$

式中,  $x_1$  为导线单位长度的电抗 ( $\Omega/\text{km}$ );  $r$  为导线的半径 (mm 或 cm);  $u_r$  为导线材料的相对导磁系数, 对铝铜等,  $u_r=1$ ;  $f$  为交流电的频率 (Hz);  $D_m$  为几何均距 (mm 或 cm), 其单位应于  $r$  的单位相同。

(4) 分裂导线三相架空线路的电抗

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \quad (6-12)$$

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13}\cdots d_{1n})} = \sqrt[n]{rd_m^{(n-1)}}$$

式中,  $r$  为每根导体的半径;  $d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}$  为某根导体与其余  $n-1$  根导体间的距离;  $d_m$  为各根导体之间的几何均距。

#### 2. 电力线路的导纳

(1) 单相架空线路的电纳

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{ab}}{r}} \times 10^{-6} \quad (6-13)$$

(2) 三相架空线路的电纳

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (6-14)$$

#### 3. 电力线路的数学模型

在电力系统稳态分析中的电力线路数学模型就是以电阻、电抗、电纳、电导表示它们的等值电路。

### (1) 一般线路的等值电路

所谓一般线路，指中等及中等以下长度线路。对架空线路，长度大约为 300km；对电缆线路，大约为 100km。线路长度不超过这些数值时，可不考虑它们的分布参数特性，而只用将线路参数简单地集中起来的电路来表示。一般线路中，又有短线路和中等长度线路之分。所谓短线路，是指长度不超过 100km 的架空线路。线路电压不高时，这种线路电纳  $B$  的影响一般不大，可略去。从而，这种线路的等值电路最简单，只有一串联的总阻抗  $Z=R+jX$ ，如图 6-3 所示。

由图可得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (6-15)$$

所谓中等长度线路，是指长度在 100~300km 之间的架空线路和不超过 100km 的电缆线路。这种线路的电纳  $B$  一般不能略去。这种线路的等值电路有  $\Pi$  形等值电路和 T 形等值电路，如图 6-4(a)、(b) 所示。其中，常用的是  $\Pi$  形等值电路。

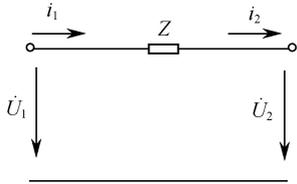


图 6-3 短线路的等值电路

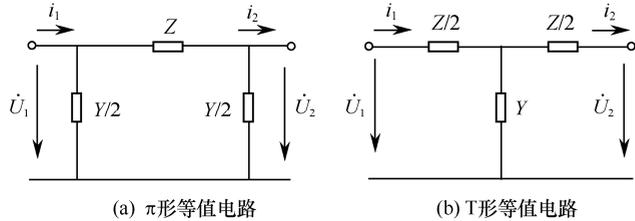


图 6-4 中等长度线路的等值电路

在  $\Pi$  形等值电路中

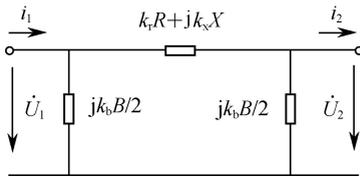


图 6-5 长线路的简化等值电路

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y(\frac{ZY}{4} + 1) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (6-16)$$

### (2) 长线路的等值电路

长线路指长度超过 300km 的架空线路和超过 100km 的电缆线路。当近似考虑线路的分布参数特性时，图 6-5 所示为长线路的简化等值电路。

$$k_r = 1 - x_1 b_1 \frac{l^2}{3}, \quad k_x = 1 - \left( x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right) \frac{l^2}{6}, \quad k_b = 1 + x_1 b_1 \frac{l^2}{12} \quad (6-17)$$

## 6.2 电力系统潮流

电力系统潮流是描述电力系统运行的一般术语。它可以分为电力系统的静态潮流和动态潮流等。电力系统潮流是指系统中所有运行变量或者参数的总体，包括各个节点（母线）电压的大小和相位、各个发电机和负荷的功率及电流，以及各个线路和变压器等元件所通过的功率、电流和其中的损耗。电力系统潮流计算是电力系统规划、设计和运行中最基本和最经常的计算，其任务是根据给定的有功负荷、无功负荷，发电机发出的有功功率及发电机节点电压有效值，

计算出系统中其他节点的电压、各条支路中的功率以及功率损耗等。

潮流计算的主要目的如下：

- (1) 判断系统中所有的母线（或节点）电压是否在允许的范围；
- (2) 判断系统中所有元件（如线路、变压器等）有没有出现过负荷？甚至当系统接线发生改变（如因为元件检修等原因）时，有无过负荷现象；
- (3) 作为电力系统其他计算的基础。

## 6.2.1 简单电力系统潮流计算

### 1. 电力线路运行状况的计算

(1) 电力线路上的电压降落和功率损耗

如图 6-6 所示，设末端电压为  $\dot{U}_2$ ，末端功率为  $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，则末端导纳支路的功率为

$$\Delta \tilde{S}_{y_2} = \left( \frac{Y}{2} \dot{U}_2 \right)^* \dot{U}_2 = \frac{1}{2} G U_2^2 - \frac{1}{2} j B U_2^2 = \Delta P_{y_2} - j \Delta Q_{y_2} \quad (6-18)$$

阻抗支路中损耗的功率为  $\tilde{S}'_z$

$$\tilde{S}'_z = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S}_{y_2} = (P'_2 + \Delta P_{y_2}) + j(Q_2 - \Delta Q_{y_2}) = P'_2 + jQ'_2$$

阻抗支路中损耗的功率  $\tilde{S}'_z$

$$\Delta \tilde{S}'_z = \left( \frac{S'_2}{U_2} \right)^2 Z = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R + jX) = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} R + j \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} X = \Delta P_z + j \Delta Q_z \quad (6-19)$$

阻抗支路始端的功率  $\tilde{S}'_1$  为

$$\tilde{S}'_1 = \tilde{S}'_z + \Delta \tilde{S}'_z = (P'_2 + \Delta P_z) + j(Q'_2 + \Delta Q_z) = P'_1 + jQ'_1$$

始端导纳支路的功率  $\Delta \tilde{S}_{y_1}$  为

$$\Delta \tilde{S}_{y_1} = \left( \frac{Y}{2} \dot{U}_1 \right)^* \dot{U}_1 = \frac{1}{2} G U_1^2 - \frac{1}{2} j B U_1^2 = \Delta P_{y_1} - j \Delta Q_{y_1} \quad (6-20)$$

始端功率  $\tilde{S}_1$  为

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta \tilde{S}_{y_1} = (P'_1 + \Delta P_{y_1}) + j(Q'_1 - \Delta Q_{y_1}) = P_1 + jQ_1 \quad (6-21)$$

当知道电路末端电压和功率，求取始端电压与端功率的方法如下。

取与实轴重合，如图 6-7 所示。则由

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \left( \frac{\tilde{S}'_2}{U_2} \right)^* Z$$

可得

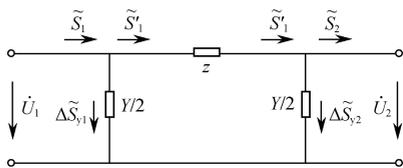


图 6-6 电力线路运行状况

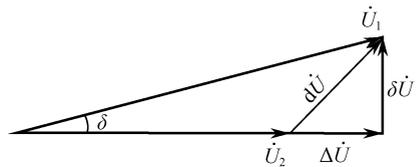


图 6-7 电压和功率矢量图

再令 
$$\frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2} = \Delta U ; \quad \frac{P'_2 X - Q'_2 R}{U_2} = \delta U \quad (6-22)$$

则

$$\dot{U}_1 = (U_2 + \Delta U) + j\delta U$$

可得

$$\dot{U}_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\delta U)^2} \quad (6-23)$$

图 6-7 中的相位角为

$$\dot{U}_1 = (U_2 + \Delta U) + j\delta U \quad (6-24)$$

由于一般情况下, 则式 (6-23) 可简化为

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_2 = U_2 + \frac{P_2' R + Q_2' X}{U_2} \quad (6-25)$$

类似这种推导, 还可以获得始端电压、始端功率求取末端电压和末端功率的计算公式。其中, 计算功率的部分与式 (5-18) ~ 式 (5-20) 没有区别, 计算电压的部分则改写为

$$\dot{U}_2 = (U_1 - \Delta U') - j\delta U'$$

$$\Delta U' = \frac{P_1' R + Q_1' X}{U_1}; \quad \delta U' = \frac{P_1' X - Q_1' R}{U_1} \quad (6-26)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U')^2 + (\delta U')^2} \quad (6-27)$$

$$\delta = \arctan \frac{-\delta U'}{U_1 - \Delta U'} \quad (6-28)$$

还应指出, 所有这些计算公式都是在  $S_2' = P_2 + jQ_2$ , 即线路末端负荷以滞后功率因数运行的假设下导出。如负荷以超前功率因数运行, 则有关公式中的无功功率应变号。

求得线路两端电压后, 就可计算某些标志电压质量的指标, 如电压降落、电压损耗、电压偏移、电压调整等。

所谓电压损耗是指线路始末端电压的数值差, 在有名值中, 用百分数表示为

$$\text{电压损耗}\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\%$$

式中,  $U_N$  为线路额定电压。

所谓电压偏移是指线路始端或末端电压与线路额定电压的数值差, 电压偏移也常以百分值表示, 即

$$\text{始端电压偏移}\% = \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

$$\text{末端电压偏移}\% = \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

所谓电压调整是指线路末端空载与负载时电压的数值差, 电压调整也常以百分值表示, 即

$$\text{电压调整}\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

## (2) 电力线路上的电能损耗

功率损耗由某一时间流过的功率引起, 而供电部门更关心电能损耗。电力线路上的电能损耗是指一定时间段内线路的功率损耗所引起的电能消耗。一般而言, 线路上的电能损耗可以表示为

$$\Delta A_l = \int_0^T \Delta P_l(t) dt \quad (6-29)$$

式(6-29)虽然严格, 但计算十分复杂, 工程上常常采用简化的方法。下面简介一种方法,

即电能损耗的最大负荷时间法。

最大负荷损耗时间法计算电能的公式为

$$\Delta A = \Delta P_{\max} \tau_{\max} \quad (6-30)$$

式中,  $\Delta P_{\max}$  为最大负荷时的功率;  $\tau_{\max}$  为最大负荷损耗时间, 可根据最大负荷利用小时数和功率因数查表求得。其中最大负荷利用小时数指一年内负荷消耗的电能  $A$  除以最大负荷。

## 2. 变压器上的电压降落、功率损耗和电能损耗

### (1) 变压器上的电压降落、功率损耗

得到线路的功率和电压计算公式后, 就可将它们套用于变压器的功率计算和电压计算。如图 6-8 所示, 在已知末端电压  $\dot{U}_2$  和末端功率  $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$  的情况下, 计算步骤如下:

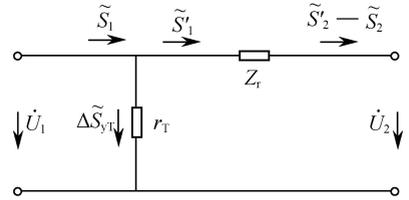


图 6-8

计算变压器串联支路的功率损耗

$$\Delta S'_{zT} = \left( \frac{S'_2}{U_2} \right)^2 Z_T = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R_T + jX_T) = \Delta P_{zT} + j\Delta Q_{zT} \quad (6-31)$$

计算变压器始端的电压  $\dot{U}_1$  (以  $\dot{U}_2$  为参考相量)

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{P_2' R_T + Q_2' X_T}{U_2} + j \frac{P_2' X_T - Q_2' R_T}{U_2} \quad (6-33)$$

变压器阻抗中电压降落的纵分量、横分量分别为

$$\Delta U_T = \frac{P_2' R_T + Q_2' X_T}{U_2}; \quad \delta U_T = \frac{P_2' X_T - Q_2' R_T}{U_2} \quad (6-34)$$

变压器并联支路中的功率损耗

$$\Delta \tilde{S}_{yT} = \Delta P_{yT} + j\Delta Q_{yT} = \dot{U}_1 \left( Y_T \dot{U}_1 \right)^* = G_T U_1^2 + jB_T U_1^2 \quad (6-35)$$

变压器始端的功率

$$\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S}_{zT} + \Delta \tilde{S}_{yT} \quad (6-36)$$

### (2) 变压器上的电能损耗

变压器中的电能损耗包括两个部分: 负载电能损耗和空载电能损耗。在给定的时间  $T$  内, 变压器电能损耗可表示为

$$\Delta A_T = \Delta P_0 T + \int_0^T \Delta P_T(t) dt \quad (6-37)$$

式中,  $\Delta P_0$  为空载功率损耗;  $\Delta P_0(t)$  为负载功率损耗。

## 6.2.2 复杂电力系统潮流的计算机算法

电力系统是一个复杂大系统, 实际系统的变量成百上千, 显然上一节介绍的人工计算方法已无法胜任。运用计算机计算潮流一般要完成以下几个步骤: 建立数学模型、确定解算方法、制订计算流程、编制计算程序。本节主要阐述两个问题, 即复杂电力网络的数学模型, 复杂电力系统潮流分布的计算方法。

电力系统计算潮流的方法主要有: 高斯—赛德尔法、牛顿—拉夫逊法、快速解耦法 (或称 P-Q 分解法)、直流潮流法、最优乘子法和优化潮流。其中, 牛顿—拉夫逊法是最基本的, 也

是最重要的方法。

### 1. 电力网络方程

电力网络方程指的是将网络的有关参数和变量及其相互关系归纳起来所组成的、可反映网络性能的数学方程式组。不难想象,符合这种要求的方程式组有节点电压方程、回路电流方程、割集电压方程等。但由于割集电压方程不常用于电力系统计算,同时实际系统中节点电压方程数少于回路电流方程数,而且因为知道了节点电压,很容易算出节点功率、支路功率和电流。所以下面仅介绍节点电压方程。

#### (1) 节点电压方程

在电路理论课程中,已导出了运用节点导纳矩阵的节点电压方程

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{U}_B \quad (6-38)$$

它可展开为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (6-39)$$

这些方程式中,  $\mathbf{I}_B$  是节点注入电流的列向量。在电力系统计算中,节点注入电流可理解为各节点电源电流与负荷电流之和,并规定电源流向网络的注入电流为正。因此,仅有负荷的负荷节点注入电流就具有负值。某些仅起联络作用的联络节点注入电流就为零,  $\mathbf{U}_B$  是节点电压的列向量。因通常以大地作参考节点,网络中有接地支路时,节点电压通常就指该节点的对地电压。网络中没有接地支路时,各节点电压可指各该节点与某一个被选定作参考节点之间的电压差。本书中一般都以大地作参考节点,并规定其编号为零。  $Y_{ij}$  是一个阶节点导纳矩阵,其阶数  $n$  就等于网络中除参考节点外的节点数。

节点导纳矩阵的对角元  $Y_{ii} (i=1,2,\dots,n)$  称为自导纳。  $Y_{ii}$  数值上就等于在节点施加单位电压,其他节点全部接地时,经节点  $i$  注入网络的电流。因此,它也可定义为

$$Y_{ii} = \left( \frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_i} \right)_{(\dot{U}_j=0, j \neq i)} \quad (6-40)$$

可见节点  $i$  的自导  $Y_{ii}$  数值上就等于与该节点直接连接的所有支路导纳的总和。

节点导纳矩阵的非对角元称为互导纳。互导纳  $Y_{ji}$  数值上就等于在节点  $i$  施加单位电压,其他节点全部接地时,经节点  $j$  注入网络的电流。因此,它也可定义为

$$Y_{ji} = \left( \frac{\dot{I}_j}{\dot{U}_i} \right)_{(\dot{U}_j=0, j \neq i)} \quad (6-41)$$

由此又可见,节点  $j$ 、 $i$  之间的互导纳  $Y_{ji}$  数值上就等于连接节点  $j$ 、 $i$  支路导纳的负值。显然,  $Y_{ji}$  恒等于  $Y_{ij}$ 。而且,如节点之间没有直接联系,也不计两支路之间之间的互感时,  $Y_{ji} = Y_{ij} = 0$ 。

#### (2) 节点导纳矩阵的形成和修改

节点导纳矩阵可根据自导纳和互导纳的定义直接求取:

① 节点导纳矩阵是方阵，其阶数就等于网络中除参考节点外的节点数  $n$ 。如前所述，参考节点一般取大地，编号为零；

② 节点导纳矩阵是稀疏矩阵，其各行非零非对角元素就等于与该行相对应节点所连接的不接地支路数；

③ 节点导纳矩阵的对角元素就等于各该节点所连接导纳的总和。没有接地支路的节点对应的行或列中，对角元素为非对角元素之和的负值；

④ 节点导纳矩阵的非对角元素等于连接节点  $i$ 、 $j$  支路导纳的负值。一般情况下，节点导纳矩阵的对角元素往往大于非对角元的负值；

⑤ 节点导纳矩阵一般是对称矩阵，这是网络的互易特性所决定的。从而，一般只要求取这个矩阵的上三角或下三角部分；

⑥ 网络中的变压器，运用变压器等值电路表示，仍可按上述原则计算。

在实际电力系统中，系统运行方式经常发生变化，如电力线路或变压器的投入或退出。运行方式改变以后，导纳矩阵不需要重新形成，而需要少量修改即可。

下面介绍几种典型的修改方法，网络接线的改变如图 6-9 所示。

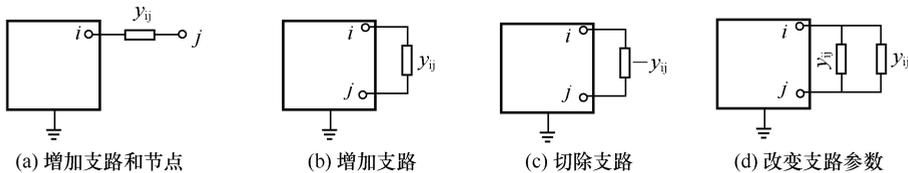


图 6-9 电力网络接线的改变

① 从原有网络引出一支路，同时增加一节点，如图 6-9 (a)所示。设  $i$  为原有网络节点， $j$  为新增加节点，新增加支路导纳为  $y_{ij}$ 。因新增一节点，节点导纳矩阵将增加一阶。

新增的对角元  $Y_{jj}$ ，由于在节点  $j$  只有一个支路  $y_{ij}$ ，将为  $Y_{jj} = y_{ij}$ 。新增的非对角元则为  $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$ ；原有矩阵中的对角元  $Y_{ii}$  将增加  $\Delta Y_{ii} = y_{ij}$ 。

② 在原有网络的节点  $i$ 、 $j$  之间增加一支路，如图 6-9 (b)所示。

这时由于仅增加支路不增加节点，节点导纳矩阵阶数不变，但与节点  $i$ 、 $j$  有关元素应作如下修改：

$$\Delta Y_{ii} = y_{ij}; \Delta Y_{jj} = y_{ij}; \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = -y_{ij}$$

③ 在原有网络的节点  $i$ 、 $j$  之间切除一支路，如图 6-9 (c)所示。

切除一导纳为  $y_{ij}$  的支路相当于增加一导纳为  $-y_{ij}$  的支路，从而与节点  $i$ 、 $j$  有关元素应作如下修改：

$$\Delta Y_{ii} = -y_{ij}; \Delta Y_{jj} = -y_{ij}; \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = y_{ij}$$

④ 原有网络节点  $i$ 、 $j$  之间的导纳由  $y_{ij}$  改变为  $y'_{ij}$ ，如图 6-9 (d)所示。

这情况相当于切除一导纳为  $y_{ij}$  的支路并增加一导纳为  $y'_{ij}$  的支路，从而与节点  $i$ 、 $j$  有关元素应作如下修改：

$$\Delta Y_{ii} = y'_{ij} - y_{ij}; \Delta Y_{jj} = y'_{ij} - y_{ij}; \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = y_{ij} - y'_{ij}$$

⑤ 原有网络节点  $i$ 、 $j$  之间变压器的变比由  $k$  改变为  $k'$ 。该变压器变比的改变将要求  $i$ 、 $j$  的有关节点作如下修改：

$$\Delta Y_{ii} = \left( \frac{1}{k'^2} - \frac{1}{k^2} \right) Y_T; \Delta Y_{jj} = 0; \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = - \left( \frac{1}{k'^2} - \frac{1}{k^2} \right) Y_T$$

### (3) 功率方程及其迭代解法

建立了节点导纳矩阵,就可进行潮流分布计算。无疑,如已知的是各节点电压直接解线性的节点电压方程  $Y_B U_B = I_B$  相当简捷。但由于工程实践中通常已知的既不是节点电压也不是节点电流,而是各节点的功率,实际计算时,几乎无例外地要迭代解非线性的节点电压方程

$$Y_B U_B = \left[ \frac{S}{U_B} \right]_B^*$$

## 2. 节点功率方程

对  $n$  个节点的电力系统,节点  $i$  的注入功率  $S_i$ 、注入电流  $I_i$  及节点电压  $\dot{U}_i$  之间的关系为

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i I_i^* = \dot{U}_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* U_j^* \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6-42)$$

上式通常称为功率方程。视方程中的节点电压向量表示形式的不同,可以得到不同形式的功率方程。

若节点电压向量以直角坐标表示:

$$\dot{U}_i = e_i + jf_i \quad (i=1,2,\dots,n)$$

导纳矩阵中的元素用相应的电导和电纳表示为

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (i,j=1,2,\dots,n)$$

将上两个关系式代入式(6-42)的功率方程中,展开后再将功率的实部和虚部分别写成两个式子,即的得到有功、无功功率分离方程:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i &= f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6-43)$$

如果节点电压以极坐标表示:

$$\dot{U}_i = U_i e^{j\delta_i} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

将其与导纳一起代入式(6-42)的功率方程中,经整理后得到有功功率、无功功率分离方程:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= U_i \sum_{j=1}^n U_j \left[ G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \\ Q_i &= -U_i \sum_{j=1}^n U_j \left[ B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6-44)$$

显然,节点注入有功功率、无功功率可以用发电功率和负荷率表示:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li}, \quad Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

### (1) 节点的分类

一个实际的电力系统,有许多节点,在潮流计算中,给定了负荷吸收的功率、发电机发出的功率或者发电机机端的电压。按电源运行的方式以及计算的要求,可将节点分为三类:

第一类称为 PQ 节点。对这类节点,等值负荷功率  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  和等值电源功率  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  是给

定的, 从而注入功率  $P_i$ 、 $Q_i$  是给定的, 待求的则是节点电压的大小  $U_i$  和相位角  $\delta_i$ 。属于这一类节点的有按给定有功、无功功率发电的发电厂母线和没有其他电源的变电所母线。

第二类称为 PV 节点。对这类节点, 等值负荷和等值电源的有功功率  $P_{Li}$ 、 $P_{Gi}$  是给定的, 从而注入有功功率  $P_i$  是给定的。等值负荷的无功功率  $Q_{Li}$  和节点电压的大小  $U_i$  也是给定的。待求的则是等值电源的无功功率  $Q_{Gi}$ , 注入无功功率  $Q_i$  和节点电压的相位角  $\delta_i$ 。有一定无功功率储备的发电厂和有一定无功功率电源的变电所母线都可选作为 PV 节点。

第三类称为平衡节点。潮流计算时, 一般只设一个平衡节点。对这节点, 等值负荷功率  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  是给定的, 节点电压的大小和相位角  $U_\delta$ 、 $\delta_\delta$  也是给定的。担负调整系统频率任务的发电厂母线往往被选作为平衡节点。

从工程角度考虑, 各节点相应的电压、功率都不能是任意值, 必须符合工程实际, 所以要对方程的解进行检查, 根据系统的技术经济条件确定的检查条件称为约束条件。常用的约束条件有:

① 电压数值约束。为保证电压质量符合标准, 系统中各节点的电压应该在上限值  $U_{i\max}$  与最小值  $U_{i\min}$  之间运行, 即

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-45)$$

② 发电机输出约束。发电设备都有额定功率和最小运行功率的限制, 运行中其发出有功功率和无功功率应保持在这一范围内, 即

$$\left. \begin{aligned} P_{i\min} &\leq P_i \leq P_{i\max} \\ Q_{i\min} &\leq Q_i \leq Q_{i\max} \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-46)$$

③ 电压相位角约束。为保证系统稳定运行, 系统中两个节点之间的电压相位角应小于某个值, 即

$$|\delta_{ij}| = |\delta_i - \delta_j| \leq |\delta_i - \delta_j|_{\max} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-47)$$

### 3. 牛顿—拉夫逊迭代法

#### (1) 牛顿—拉夫逊迭代原理

牛顿—拉夫逊法是常用的解非线性方程组的方法, 也是当前广泛采用的计算潮流的方法, 其标准模式如下。

设有非线性方程组

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (6-48)$$

设变量的初值为  $x_1^{(0)}$ ,  $x_2^{(0)}$ ,  $\dots$ ,  $x_n^{(0)}$ , 并令  $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0$  为对应各变量的修正量, 则有

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^0, x_2^{(0)} + \Delta x_2^0, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^0) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^0, x_2^{(0)} + \Delta x_2^0, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^0) &= y_2 \\ &\dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^0, x_2^{(0)} + \Delta x_2^0, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^0) &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (6-49)$$

将式 (6-49) 在初值附近展开成泰勒级数, 并略去含有修正量的二次方及以上的高次方, 得

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^0 \right] &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left[ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^0 \right] &= y_2 \\ &\dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left[ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^0 \right] &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (6-50)$$

式中,  $\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0$  为函数  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  对自变量  $x_j$  的偏导数在初值处的值。

将式 (6-50) 写成矩阵, 得

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots\dots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \dots\dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (6-51)$$

式 (6-51) 称为修正方程, 显然, 其为一次线性方程组, 从中可以解出  $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0$  的值, 进一步可以求得修正后的  $x$  值

$$\left. \begin{aligned} x_1^1 &= x_1^0 + \Delta x_1^0 \\ x_2^1 &= x_2^0 + \Delta x_2^0 \\ &\dots\dots \\ x_n^1 &= x_n^0 + \Delta x_n^0 \end{aligned} \right\} \quad (6-52)$$

然后, 以  $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}$  作为新的值, 重新形成并求解新的修正方程式, 便可得到新的修正量  $\Delta x_1^{(1)}, \Delta x_2^{(1)}, \dots, \Delta x_n^{(1)}$ 。以此类推。

其中迭代的收敛判据为

$$\left. \begin{aligned} \max_i |f_i(x^k)| &\leq \varepsilon_1 \\ \max_i |\Delta x_i| &\leq \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (6-53)$$

式中,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  是根据计算精度要求, 预先给定的小正数。

## (2) 牛顿—拉夫逊法潮流计算

从 PQ 节点功率方程式 (6-42) 可知, 节点  $i$  的注入功率是电压的函数, 若节点电压的解已知, 由式 (6-42) 可求出节点  $i$  的有功功率  $P_i$  和无功功率  $Q_i$ , 它们与已知的 PQ 节点的注入功率  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$  的差应满足如下方程:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6-54)$$

对 PV 节点, 已给出节点注入有功功率  $P_{is}$ , 其节点有功功率满足如下平衡方程:

$$\Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad (6-55a)$$

对 PV 节点, 给定的电压值为  $U_{is}$ , 计算得到电压  $U_i = e_i + \mathbf{j}f_i$  的数值二次方值为

$$U_i^2 = e_i^2 + f_i^2$$

计算值与给定值应满足如下平衡方程:

$$\Delta U_i^2 = U_{is}^2 - U_i^2 = U_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \quad (6-55b)$$

上述式 (6-54) 与式 (6-55) 是针对 PQ 节点和 PV 节点的功率平衡方程及电压平衡方程。

对  $n$  个节点的系统, 设有  $m$  个 PQ 节点,  $n-(m-1)$  个 PV 节点, 因此总的有功功率方程数  $n-1$  个, 无功平衡方程数有  $m$  个, 电压平衡方程数应有  $n-(m+1)$  个。总的方程为  $2(n-1)$  个, 因为平衡节点电压已知, 平衡节点不必参加迭代计算。

将上述  $2(n-1)$  个方程在初值附近展开成泰勒级数, 并略去  $\Delta e_i$ 、 $\Delta f_i$  的二次方项和更高次方项后, 可得修正方程如式 (6-56) 所示。该修正方程中雅克比矩阵的各元素可将式 (6-54) 和式 (6-55) 对电压实部  $e_i$  和虚部  $f_i$  求偏导数可得

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{m+1} \\ \Delta U_{m+1}^2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta U_{n-1}^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_{m+1}}{\partial e_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta U_{m+1}^2}{\partial e_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_{m+1}} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_{n-1}} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta f_m \\ \Delta e_m \\ \Delta f_{m+1} \\ \Delta e_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \\ \Delta e_{n-1} \end{bmatrix}$$

式 (6-56) 非对角元素 ( $i \neq j$ )

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} = B_{ij} e_i - G_{ij} f_i \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} &= -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i} = -(G_{ij} e_i + B_{ij} f_i) \\ \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_i} &= \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_i} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6-57)$$

对角元素 ( $i = j$ )

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - G_{ii} e_i - B_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + G_{ii} e_i + B_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} &= \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_i} &= -2f_i \\ \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_i} &= -2e_i \end{aligned} \right\} \quad (6-58)$$

牛顿潮流计算的主要步骤如下:

- ① 形成节点导纳矩阵。
- ② 设各节点电压的初值  $e_i^{(0)}$ 、 $f_i^{(0)}$ 。
- ③ 将各节点电压的初值代入式 (6-54)、式 (6-55), 求修正方程式中的不平衡量  $\Delta P_i^{(0)}$ 、 $\Delta Q_i^{(0)}$ 、 $\Delta U_i^{(0)2}$ 。
- ④ 将各节点电压的初值代入式 (6-57)、式 (6-58), 求雅克比矩阵。
- ⑤ 解修正方程式, 求各节点电压的变化量, 即修正量  $\Delta e_i^{(0)}$ 、 $\Delta f_i^{(0)}$ 。
- ⑥ 计算各节点电压的新值, 即修正后值

$$\left. \begin{aligned} e_i^{(1)} &= e_i^{(0)} + \Delta e_i^{(0)} \\ f_i^{(1)} &= f_i^{(0)} + \Delta f_i^{(0)} \end{aligned} \right\}$$

- ⑦ 运用各节点电压的新值自第三步开始进入下一次迭代。
- ⑧ 判断计算是否收敛。可用如下公式进行:

$$\left| f_i(x)^{(k)} \right|_{\max} = \left| \Delta P^{(k)}, \Delta Q^{(k)}, \Delta U^{2k} \right|_{\max} \leq \varepsilon$$

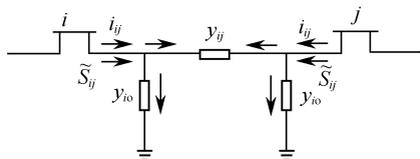
式中, 是预先给定的小数。若不收敛返回到第 (4) 步重新迭代, 若收敛转下一步。

- ⑨ 计算平衡节点的功率和线路功率, 最后打印出结果。

其中, 平衡节点功率为

$$S_n = U_n^* \sum_{j=1}^n Y_{nj} U_j = P_n + jQ_n \quad (6-59)$$

如图 (6-10) 所示, 节点  $i$ 、 $j$  之间的线路功率为



图(6-10)

$$S_{ij} = \dot{U}_i I_{ij}^* = \dot{U}_i \left[ U_j^* y_{i0} + (U_i^* - U_j^*) y_{ij} \right] = P_{ij} + jQ_{ij} \quad (6-60a)$$

$$S_{ji} = \dot{U}_j I_{ji}^* = \dot{U}_j \left[ U_i^* y_{j0} + (U_j^* - U_i^*) y_{ij} \right] = P_{ji} + jQ_{ji} \quad (6-60b)$$

则线路上损耗的功率为

$$\Delta S_{ij} = S_{ij} + S_{ji} = \Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} \quad (6-61)$$

## 6.3 短路电流计算

### 6.3.1 概述

短路是电力系统中最常见和最严重的一种故障。所谓短路，是指电力系统正常情况以外的一切相与相之间或相与地之间发生通路的情况。

引起短路的主要原因是电气设备载流部分绝缘损坏。引起绝缘损坏的原因有：各种形式的过电压（如遭到雷击）、绝缘材料的自然老化、遭受机械损伤以及设备运行维护不良等。其外运行人员的不规范操作也会引起系统短路。

电力系统发生短路时，由于系统的总阻抗大幅度减小，因此伴随短路所产生的基本现象是：电流急剧增加，从而导致系统设备因过热而损坏甚至烧毁；设备机械变形、扭曲甚至损坏；影响电气设备的正常运行；破坏系统的稳定性；造成电磁干扰等。

由此可见，对短路过程的研究具有十分重要的意义。实际上，在电力系统设计和运行的许多工作中，都必须有短路计算的结果为依据。在三相系统中，可能发生的短路有：三相短路、两相短路、单相短路、单相接地短路、两相接地短路。

当实际系统发生短路故障时，若无其他特殊因素影响，短路电流通常随着时间的推移而衰减，同时往往含有大量高次谐波。为了分析和应用方便，一般将短路电流分为短路电流周期分量初始值  $i_k''$ ，也称为起始次态电流、短路峰值电流  $i_p$ 、持续短路电流  $i_k$  等不同的量值进行计算。

目前，我国电力系统广泛采用的各种电力系统短路计算程序通常都是计算  $i_k''$ 。这是因为  $i_k''$  是短路瞬间的周期分量值，在该时刻系统内各种可变化的条件均未来得及改变，因此在计算时可采用故障前系统参数，并不考虑各种调节作用，其计算结果具有更高的准确性。

电网故障计算的算法可以分为：理论算法和工程算法两大类，前者基于对称分量法和复合序网，给出了各类故障的基本计算公式；后者则在工程应用时，在计算条件的设定方面给出了具体规定。本书会简单介绍一下理论算法，对于工程算法会介绍基于 PSASP 的短路电流计算程序。

### 6.3.2 短路故障的基本算法

#### 1. 三相短路故障计算

电力系统三相短路故障分为三相相间短路和三相接地短路两种形式，如图 6-11 所示。

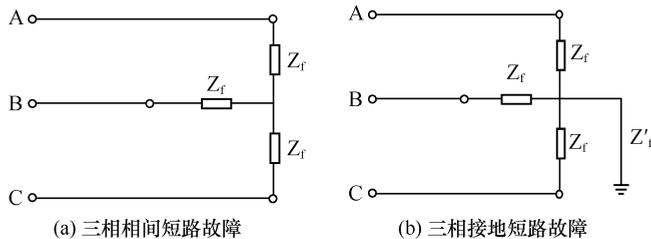


图 6-11 三相短路故障

图中， $Z_f$  为相间过渡阻抗， $Z'_f$  为接地阻抗。过渡阻抗和接地阻抗可统称为故障接入阻抗。

在三相短路中  $Z_f$  不为零，且各相的  $Z_f$  必须相等，否则系统将会失去对称性，不能按照一般的三相短路故障进行计算。

对于单一故障而言，三相短路计算仅涉及正序网， $\dot{I}_k''$  的计算公式为

$$\dot{I}_k'' = \frac{\dot{U}_0}{Z_1 + Z_f} \quad (6-62)$$

式中： $\dot{U}_0$  为系统开路电压； $Z_1$  为故障点与大地间看进去的系统正序等值阻抗。

## 2. 短路容量

短路容量是指短路电流有效值与故障点处正常工作电压的乘积。由于母线的正常工作电压是一个范围量，因此在计算时一般将“正常工作电压”取 1.0 p.u.，也就是认为正常工作电压等于母线基准电压。由于在计算数据中一般取母线的平均额定电压为基准电压，因此，短路容量也可以看作是短路电流有效值与故障点处平均额定电压的乘积。三相短路后，短路容量的计算公式为

$$S_k = \sqrt{3} I_{kval}'' \times U_B = \sqrt{3} I_{kval}'' \times U_{av} \quad (6-63)$$

式中， $S_k$  为故障点短路容量，单位 MAV； $I_{kval}''$  为  $\dot{I}_k''$  有名值，单位 kA； $U_B$  为故障点基准电压有名值，单位 kV； $U_{av}$  为故障点平均额定电压有名值，单位 kV。若以标么值表示，有

$$S_k^* = I_k'' \quad (6-64)$$

$$S_k = I_k'' \times S_B \quad (6-65)$$

式中， $S_k^*$  为故障点短路容量标么值； $S_B$  为系统基准容量，单位 MVA。

## 3. 单相接地短路故障计算

单相接地短路是指 A 相、B 相或者 C 相中的一相发生接地短路，是电力系统中最常见的一种短路故障。若 A 相发生单相接地短路，其故障情况如图 6-12 所示。图中， $Z_f$  为接地阻抗。

为方便计算，设 A 相发生金属性接地故障，取 A 相为特殊相，则故障点可列写下述方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= 0 \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_c = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6-66)$$

式中， $\dot{U}_a$  为故障点 A 相电压； $\dot{I}_b$  为故障点 B 相对地电流； $\dot{I}_c$  为故障点 C 相对地电流。

单相短路计算边界条件示意图如图 6-13 所示。

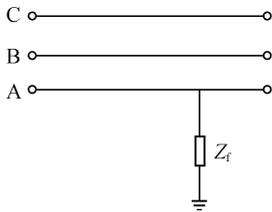


图 6-12 单相接地故障示意图

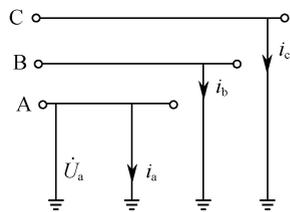


图 6-13 单相短路计算边界条件示意图

使用对称分量法对式 (6-66) 进行变化并绘制出其复合序网后可得到

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{U}_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (6-67)$$

式中， $\dot{I}_{a1}$  为相正序电流； $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  分别为 A 相正、负、零序阻抗。