ELECTRIC POWER ENGINEERING

电力工程

鞠平　　主编

第三章 电力负荷

第3章 电力负荷

3.1 负荷曲线

- 负荷：电力系统中用电设备的总称，习惯上也指所耗用的功率。
- 单位：MW/Mvar/MV·A，我国习惯上采用“万kV”，即10kV
- 电量：消耗的电能量，单位为“千瓦时”、“度”

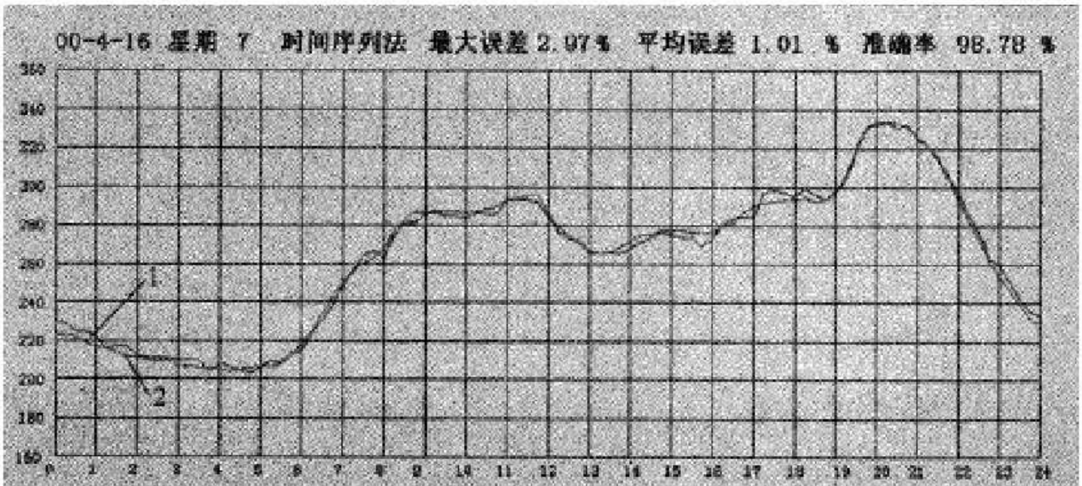
3.1 负荷曲线

❖ 负荷曲线

负荷所耗用的功率随时间变化的曲线。

日负荷曲线：将一天的负荷按照一定的时间间隔描成一条曲线

- 以往24点曲线（每小时一点）
- 目前采用96点曲线（每一刻钟一点）



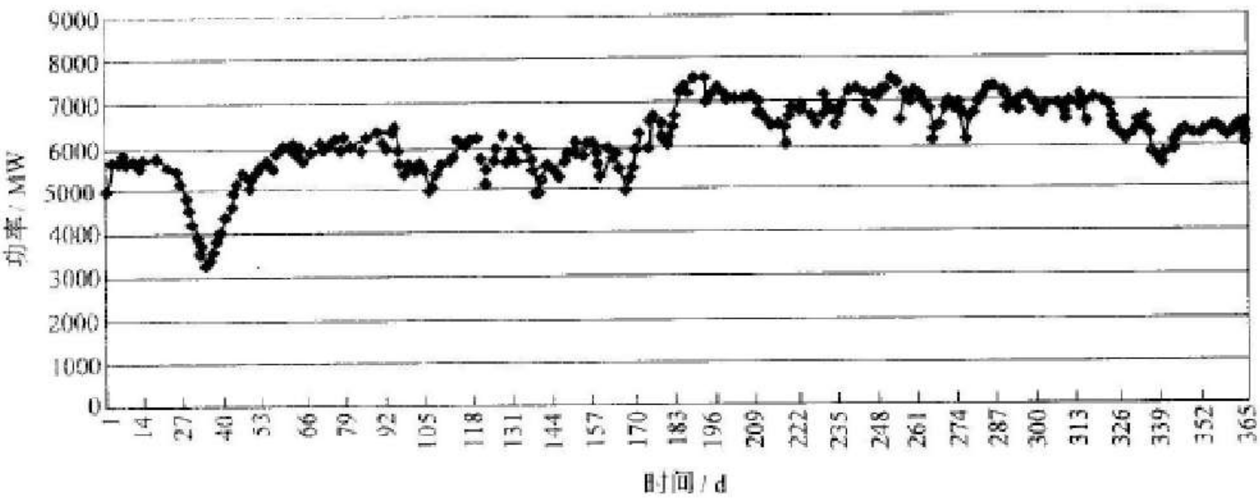
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
0	229	216	211	210	207	209	224	256	275	287	287	294	277	266	272	274	281	297	300	304	333	321	286	251	实测
	223	216	210	207	204	207	225	257	278	288	288	294	279	266	276	278	280	292	295	307	334	321	283	247	预测
15	225	217	211	210	205	209	231	264	281	285	286	294	273	266	274	274	284	299	296	319	331	315	277	242	实测
	222	214	209	206	205	208	234	260	283	288	289	296	275	266	276	277	282	293	293	321	333	314	273	239	预测
30	225	217	211	204	203	214	238	267	282	285	286	292	273	266	277	269	285	297	294	331	332	306	263	236	实测
	219	212	210	206	206	212	243	263	287	288	290	296	271	269	278	277	287	294	294	331	331	304	261	232	预测
45	222	213	210	208	206	215	249	263	286	284	294	285	266	268	276	274	285	295	298	332	325	297	260	233	实测
	217	211	207	205	207	219	230	268	287	287	294	286	267	272	278	277	290	294	297	334	326	294	254	227	预测

日负荷曲线

1—实际负荷曲线 2—预测负荷曲线

3.1 负荷曲线

年最大负荷曲线：将一年中每一天的日最大负荷连成一条曲线。



某市2003年峰值负荷曲线

3.1 负荷曲线

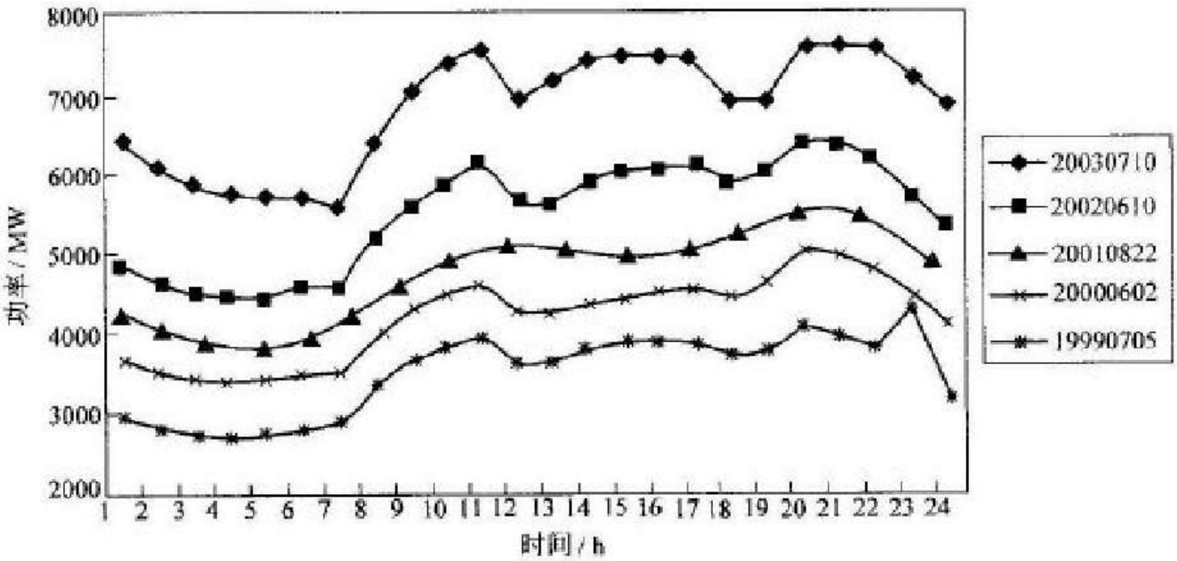
负荷特性

- 时间特性：负荷随时间变化呈现出的规律
- 电压或频率特性：负荷与电压频率之间的关系

负荷特性指标分类

描述类	比较类	曲线类
1、日最大负荷 2、日最小负荷 3、日平均负荷 4、日峰谷差 5、年最大负荷 6、年最小负荷 7、年平均负荷	1、日负荷率 2、日最小负荷率 3、日峰谷差率 4、季负荷率（季不均衡系数）	1、日负荷曲线 2、周负荷曲线 3、年负荷曲线

3.1 负荷曲线



某市5年夏季典型日负荷曲线

3.1 负荷曲线

❖ 负荷预测

- 周期性
- 相似性
- 增长性
- 随机性

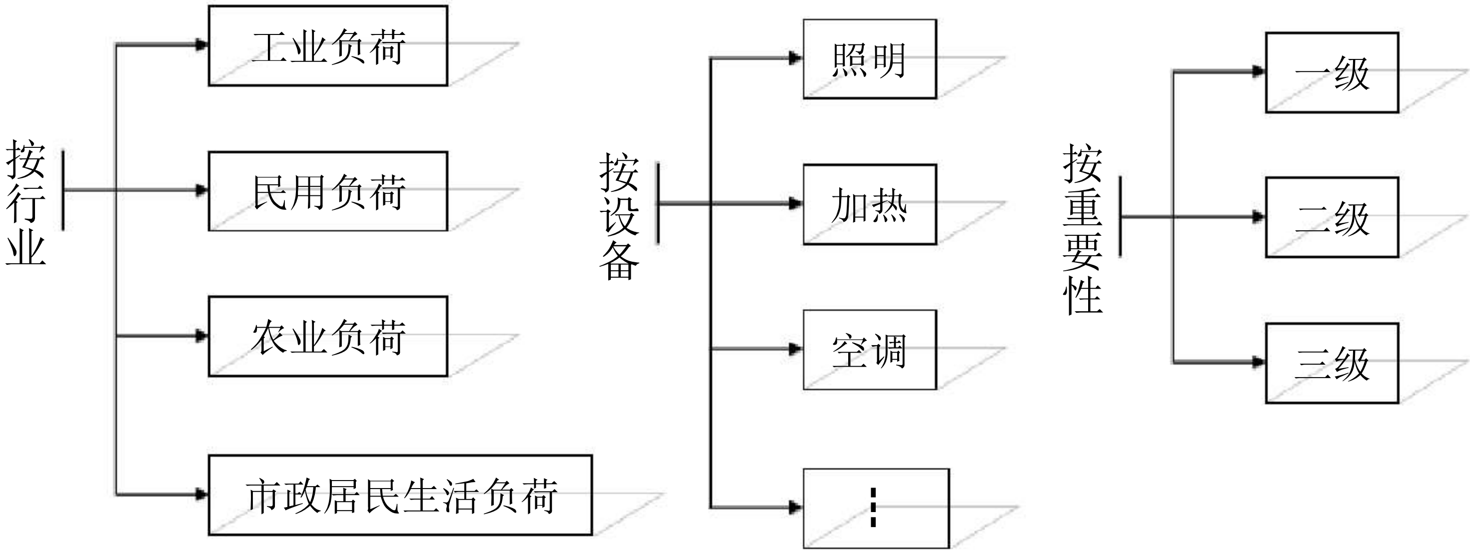
负荷预测

3.1 负荷曲线

按照预测时间的长短，可分为

- 超短期负荷预测（分钟级）
- 短期负荷预测（日级）
- 中长期负荷预测（年级）

3.2 负荷分类



3.2 负荷分类

❖按照行业分

工业负荷：负荷量大，负荷曲线比较平稳；

农业负荷：季节性强，年最大负荷利用小时数低，负荷密度小，功率因数低，复合机构变化大；

商业负荷：很强的实践性和季节性，电网峰荷的主要组成部分；

市政及居民生活负荷：负荷变化大，负荷率跨度大，负荷同时率高，负荷功率因数低。

3.2 负荷分类

❖按重要性分类

一级负荷：若中断供电，可能造成生命危险、重大经济损失或社会混乱；

二级负荷：若中断供电，可能造成大量减产、交通停顿、生活受到影响；

三级负荷：其他负荷。

3.3 负荷模型

3.3.1 负荷模型概述

3.3.2 静态负荷模型

3.3.3 电动机负荷模型

3.3.1 负荷模型概述

❖ 负荷模型

描述负荷吸收的有功功率（P）及无功功率（Q）随着负荷母线电压（U）和频率（f）变化的数学方程式。

❖ 建立负荷模型的意义

负荷作为能量消耗者，在电力系统的设计、分析与控制中有重要影响。

❖ 如何建立负荷模型

例：某负荷由R、L串联而成，如图所示，其端口电压是频率为的交流电压源。推导其静态和动态模型。

解：(1)静态模型

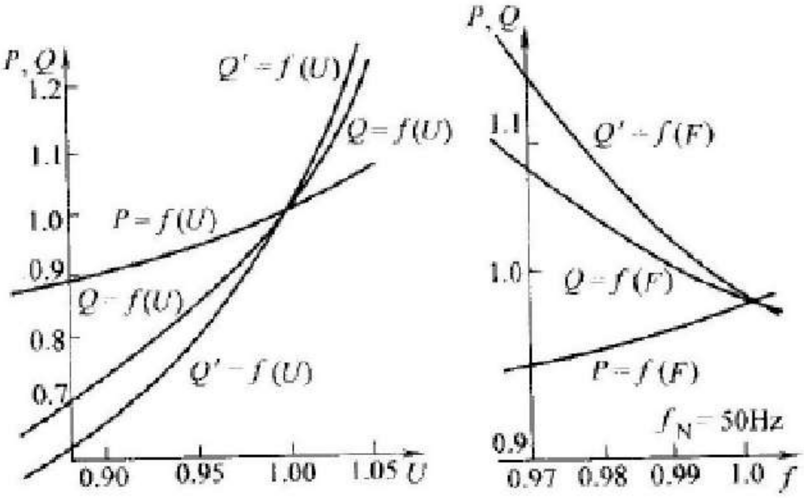
$$P = U^2 \frac{R}{R^2 + (2\pi fL)^2}$$

$$Q = U^2 \frac{2\pi fL}{R^2 + (2\pi fL)^2}$$

(2)动态模型 $u = Ri + L\frac{di}{dt}$

3.3.2 静态负荷模型

稳态条件下，负荷功率与电压及频率之间的非线性函数关系称为负荷的静态模型。



a) b)

综合负荷的静态特性

a)综合负荷的电压静特性曲线 b) 综合负荷的频率静特性曲线

3.3.2静态负荷模型

1、多项式模型

$$P/P_0=\left[P_Z(U/U_0)^2+P_I(U/U_0)+P_P\right](1+L_{DP}\Delta f/f_0)$$

$$Q/Q_0=\left[Q_Z(U/U_0)^2+Q_I(U/U_0)+Q_P\right](1+L_{DQ}\Delta f/f_0)$$

式中多项式

$$P_Z+P_I+P_P=1$$

$$Q_Z+Q_I+Q_P=1$$

2、幂函数模型

$$P/P_0=(U/U_0)^{n_{pu}}(f/f_0)^{n_{pf}}$$
$$Q/Q_0=(U/U_0)^{n_{qu}}(f/f_0)^{n_{qf}}$$

3、静态特征系数

静态特征系数：负荷的功率、电压、及频率均取相对值时，功率对电压及频率的变化率。

$$p_u=\frac{\mathrm{d}(P/P_0)}{\mathrm{d}(U/U_0)},\quad p_f=\frac{\mathrm{d}(P/P_0)}{\mathrm{d}(f/f_0)}$$
$$q_u=\frac{\mathrm{d}(Q/Q_0)}{\mathrm{d}(U/U_0)},\quad q_f=\frac{\mathrm{d}(Q/Q_0)}{\mathrm{d}(f/f_0)}$$

3.3.2静态负荷模型

静态特征系数与幂函数模型中幂指数的关系：

$$\left.\begin{aligned} P &= P_0 (U/U_0)^{p_u} (f/f_0)^{p_f} \\ Q &= Q_0 (U/U_0)^{q_u} (f/f_0)^{q_f} \end{aligned}\right\}$$

由多项式模型获取幂函数模型：

$$\left.\begin{aligned} p_u &= 2P_Z + P_I，\ p_f = L_{DP} \\ q_u &= 2Q_Z + Q_I，\ q_f = L_{DQ} \end{aligned}\right\}$$

3.3.2静态负荷模型

由幂函数获取多项式模型：

$$\left.\begin{array}{l} P_Z = \dfrac{p_u(p_u - 1)}{2}, \quad P_L = p_u(2 - p_u), \quad P_P = \dfrac{2 - 3p_u + p_u^2}{2} \\ Q_Z = \dfrac{q_u(q_u - 1)}{2}, \quad Q_L = q_u(2 - q_u), \quad Q_P = \dfrac{2 - 3q_u + q_u^2}{2} \end{array}\right\}$$

3.3.2静态负荷模型

例：对于RL电路，已知其功率因数为0.8，计算其静态特征系数，并写出多项式模型和幂函数模型方程。

解：该负荷的电压特性系数为2，

即 $p_u = 2,\ q_u = 2$

$$p_f = \frac{d(P/P_0)}{d(f/f_0)} = \frac{d(P/P_0)}{d(\omega/\omega_0)} = -2\frac{(\omega_0 L)^2}{z^2} = -2\sin^2\varphi = 2(\cos^2\varphi - 1)$$

$$q_f = \cos 2\varphi = 2\cos^2\varphi - 1$$

将 $\cos\varphi = 0.8$ 代入，可得 $p_f = -0.72,\ q_u = 0.28$

幂函数模型为
$$\left.\begin{aligned} P &= P_0(U/U_0)^2(f/f_0)^{-0.72} \\ Q &= Q_0(U/U_0)^2(f/f_0)^{0.28} \end{aligned}\right\}$$

3.3.2静态负荷模型

计算可得

$$\left.\begin{aligned} P_Z &= 1, \; P_L = 0, \; P_P = 0, \; L_{DP} = -0.72 \\ Q_Z &= 1, \; Q_L = 0, \; Q_P = 0, \; L_{DQ} = 0.28 \end{aligned}\right\}$$

多项式模型为

$$\left.\begin{aligned} P/P_0 &= (U/U_0)^2(1 - 0.72\,\Delta f/f_0) \\ Q/Q_0 &= (U/U_0)^2(1 + 0.28\,\Delta f/f_0) \end{aligned}\right\}$$

机电暂态模型

端口电压方程 $\dot{U} = \dot{E}' + (R_s + jfX')\dot{I}$

电动势方程 $T'_{d0}\frac{d\dot{E}'_q}{dt} = -\dot{E}' + jf(X - X')\dot{I} + j(\omega_r - f)\dot{E}'T'_{d0}$

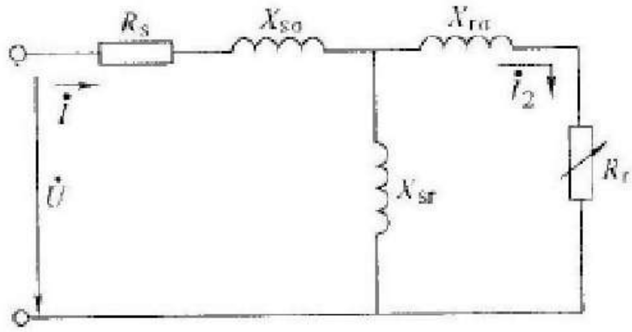
转子运动方程 $\frac{d\omega_r}{dt} = [T_E - T\ \ ]/T_j$

电磁转矩和机械转矩

$$T_E = (P - I^2\ \ )/f$$

$$T_M = T_{M0}(\omega_r/\ \ )^{\beta}$$

机械暂态模型



根据T形等效电路，可得

$$P = \frac{U^2}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} R_\Sigma = U^2 G_\Sigma$$

G_Σ从电动机端口看进去的电导

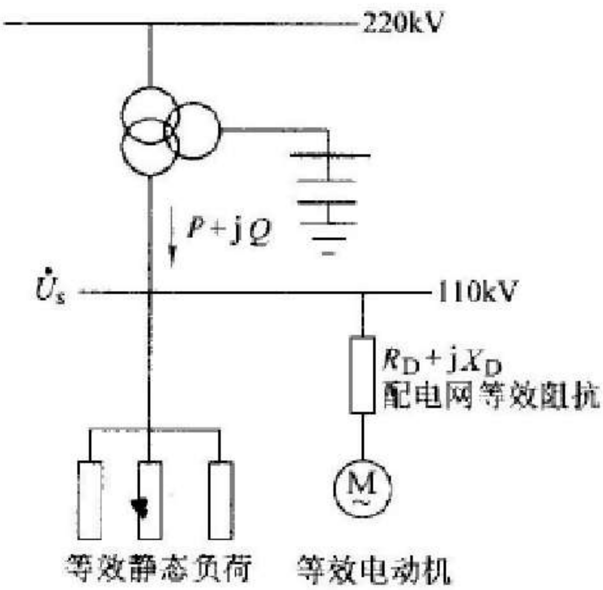
转差率s：$s = (\omega_s - \omega_r)/\omega_s = 1 - \omega_r/f$

转子运动方程 $\frac{ds}{dt} = (T_M - T_E)/(T_j\ f)$

电磁转矩和机械转矩 $T_E = \left[U^2 G_\Sigma - I^2 R_s\right]/f = \frac{U^2(R_\Sigma - R_s)}{(R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2)f}$

$$T_M = T'_{M0}((1 - s)f)^\beta$$

3.3.4 综合负荷模型



综合负荷模型结构