第七章 电力系统暂态稳定

第一节 概述

暂态稳定是指电力系统在某个正常运行方式下，突然受到某种大的干扰后，经过一段暂态过程，所有发电机能否恢复到相同速度下运行，能恢复则称系统在这种运行方式下是暂态稳定的。

暂态稳定与运行方式和扰动量有关。因此不能够泛泛地说电力系统是暂态稳定或不稳定的，只能说在某种运行方式和某种干扰下系统是暂态稳定或不稳定的。在某种运行方式下和某种扰动下是稳定的，在另一种运行方式和另一种扰动下可能就是不稳定的。

所谓的运行方式，对系统而言，就是系统的负荷功率的大小，或发电功率的大小；对输电线路而言，就是输送功率的大小。功率越大，暂态稳定性问题越严重。

所谓大干扰一般指短路故障、切除大容量发电机、切除输变电设备、切除或投入大负荷。一般短路最为严重，多数情况研究短路故障干扰。短路故障扰动量的大小与短路地点、短路类型、短路切除时间有关。短路可能发生在输电线路上，也可能发生在母线或变压器上。一般发生在母线上较为严重。短路发生在输电线路上，一般靠近电源侧的较为严重。短路分为单相接地短路、两相短路、两相接地短路、三相短路。一般三相短路较为严重，次之两相接地短路，单相接地短路最轻。这里所说的短路是单重故障，如果有多种故障，一般多重故障较为严重。发生短路后，借助断路器断开，将故障的线路、或母线或变压器隔离，保证非故障部分继续运行。短路切除时间越短，对暂态稳定越有利。短路切除时间包括继电保护装置和断路器动作的时间。装有自动重合闸的输电线路，被隔离的输电线路会重新投入运行，如果是瞬时性故障，重合就成功，电网恢复原有状态；如果是永久性故障，重合不成功，故障线路再次被隔离。重合成功对暂态稳定有利，重合不成功对暂态稳定更不利。

一般用短路故障来检验系统是否暂态稳定。我国颁布的《电力系统安全稳定导则》规定：①发生单相接地故障时，要保证电力系统安全稳定运行，不允许失负荷；②发生三相短路故障时，要保证电力系统稳定运行，允许损失少量负荷；③发生严重故障时，系统可能失稳，允许损失负荷，但不允许系统瓦解和大面积停电，应尽快恢复正常运行。

大扰动后的暂态过程大致分为三阶段：（1）起始阶段：故障后 1 秒钟内，调节装置还来不及起作用。（2）中间阶段：大约 5 秒钟，调节装置起作用。（3）后期阶段：几十秒～几分钟，热力设备动作过程也起作用。本课程主要介绍前两个阶段。

暂态稳定分析的基本假设：（1）不计定子绕阻电磁暂态过程中的非周期分量电

流。因为 ①衰减快；②非同期分量电流产生的磁场在空间不动，在转子绕组产生同步频率电流，其产生的平均功率接近于零。（2）不计零、负序电流产生的功率。因为负序电流产生的转矩很小，而零序电流不产生转矩。（3）不计网络电磁暂态过程，即网络方程用代数方程描述。（4）根据计算的不同要求，负荷、发电机可以采用不同模型。

第二节 简单电力系统的暂态稳定

以一典型实例引出简单电力系统暂态稳定的概念。

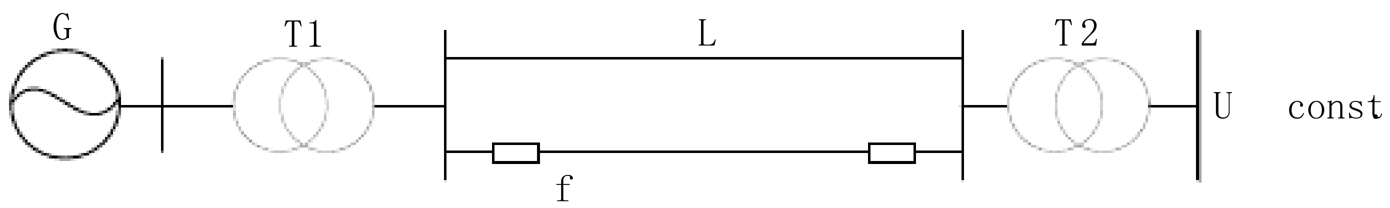


图 7-1 典型实例的简单电力系统接线图

发电机采用 E 、 X_d 模型。

一、物理过程分析

1. 正常运行方式

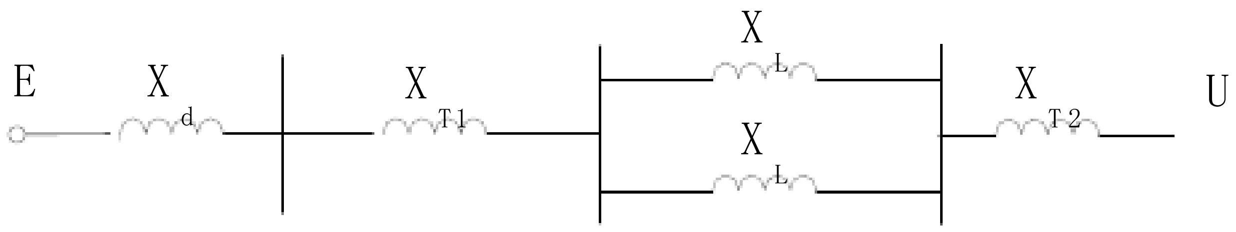


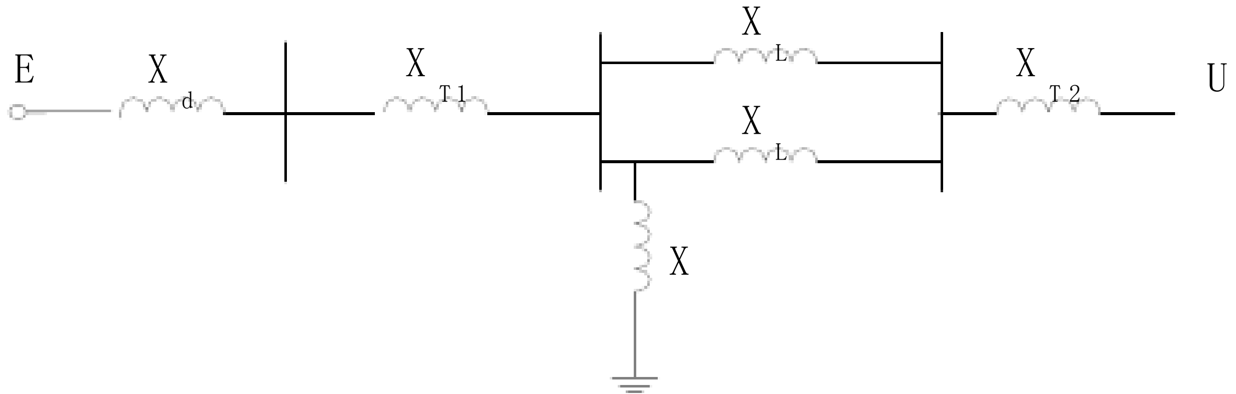
图 7-2 正常运行方式的等值电路

$$X_I = X_d + X_{T1} + X_L/2 + X_{T2} \tag{7-1}$$

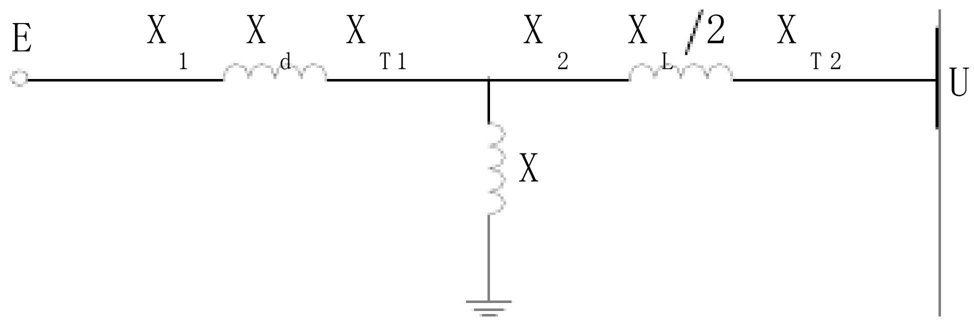
$$P_I = \frac{EU}{X_I}\sin\delta = P_{IM}\sin\delta \tag{7-2}$$

$$P_{IM} = \frac{EU}{X_I} \tag{7-3}$$

2.故障时



(a)



(b)

图 7-3 故障时的等值电路及其化简电路

(a)等值电路；(b)化简电路

采用正序增广网络定则：求正序功率时，在故障点接入一个附加电抗 X 。X 由故障类型决定

①三相短路：　$X \quad 0$

②两相短路：　$X \quad X_{(2)}$

③单相接地短路：　$X \quad X_{(2)} \quad x_{(0)}$

④两相短路接地：　$X \quad \frac{X_{(2)} \; X_{(0)}}{X_{(2)} \; X_{(0)}}$

Y→ 变换

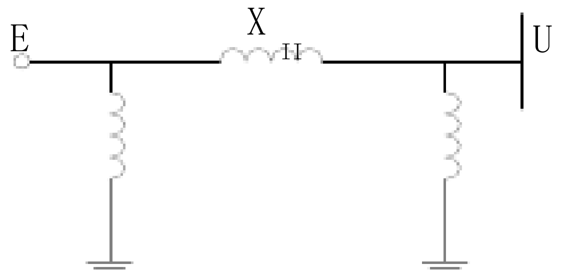


图 7-4 星形—三角形变换

$$X_{II} \quad X_1 \quad X_2 \quad \frac{X_1 X_2}{X} \tag{7-4}$$

$$P_{II} \quad \frac{E\,U}{X_{II}} \sin \quad P_{IIM} \sin \tag{7-5}$$

$$P_{IIM} \quad \frac{E\,U}{X_{II}} \tag{7-6}$$

3.故障切除后

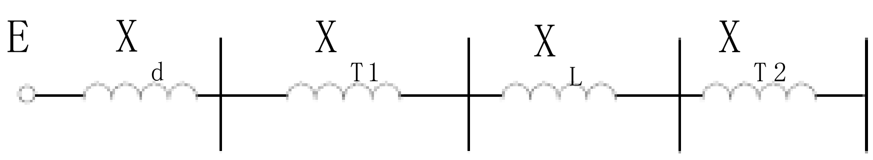


图 7-5 故障切除后的等值电路

$$X_{III} \quad X_d \quad X_{T1} \quad X_L \quad X_{T2} \tag{7-7}$$

$$P_{III} \quad \frac{EU}{X_{III}}\sin \quad P_{IIIM}\ \sin \qquad (7\text{-}8)$$

$$P_{IIIM} \quad \frac{EU}{X_{III}} \qquad (7\text{-}9)$$

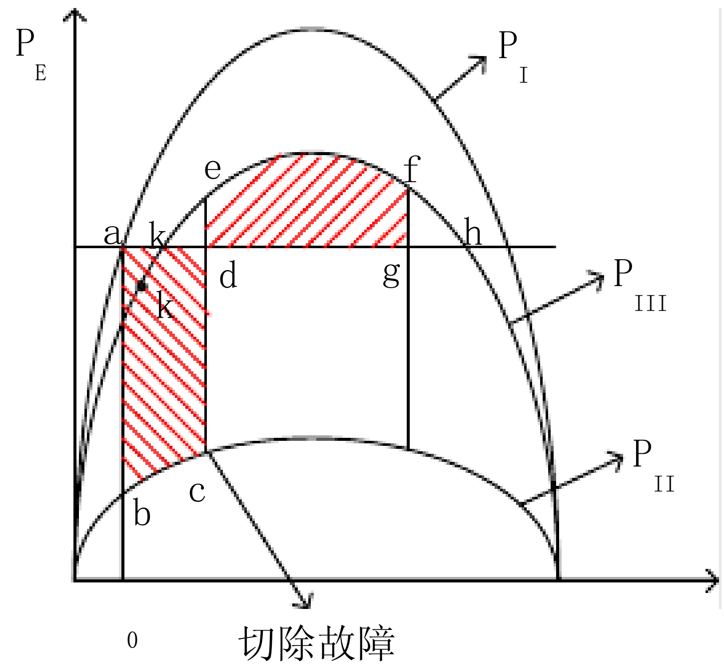


图 7-6 简单电力系统正常运行、故障和故障切除后的功角特性曲线

正常运行在 a 点，故障时由 a　b 点、P_T 不变→P_T ＞P_E （P_{II}） 加速。 ↑、↑ c 点时故障切除，运行点由 c　e 点 P_T ＜P_E (P_{III})→减速。 ↓但仍大于 $_0$，所以 继续增大 f 点时 ＝ $_0$，由于 P_T ＜P_E，加速度为负、 ↓、 ↓ k 点加速度为 0，但 ＜ $_0$ 进一步减少 k 点、由于 P_T ＞P_E (P_{III})、加速度为正， ↑、↑ 最终返回 k 点稳定运行。

面积 abcda 称为加速面积；面积 defgd称为减速面积。

切除时间越早，加速面积越小，越容易稳定；切除时间越长，加速面积越大，对稳定越不利；若运行点到 h 点仍不能使 ＝ $_0$，那么系统将失去稳定。为此，必有一个极限切除角 $_{cm}$，使加速面积等于减速面积，这称为等面积定则。

二、等面积定则

$$\underbrace{{}^{cm}_{0}(P_T \quad P_{II})d}_{加速面积} \qquad \underbrace{{}^{h}_{cm}(P_{III} \quad P_T)d}_{减速面积} \qquad (7\text{-}10)$$

$${}^{cm}_{0}(P_T \quad P_{IM}\ \sin\ )d \qquad {}^{0}_{cm}(P_{IIIM}\ \sin \quad P_T)d$$

$$P_T(\ _{cm} \quad _0) \quad P_{IIM}(\cos\ _{cm} \quad \cos\ _0) \quad P_{IIIM}(\cos\ _{cm} \quad \cos\ _h) \quad P_T(\ _h \quad _{cm})$$

整理得

$$(P_{IIIM} \quad P_{IIM})\cos\ _{cm} \quad P_T(\ _h \quad _0) \quad P_{IIIM}\ \cos\ _h \quad P_{IIM}\ \cos\ _0$$

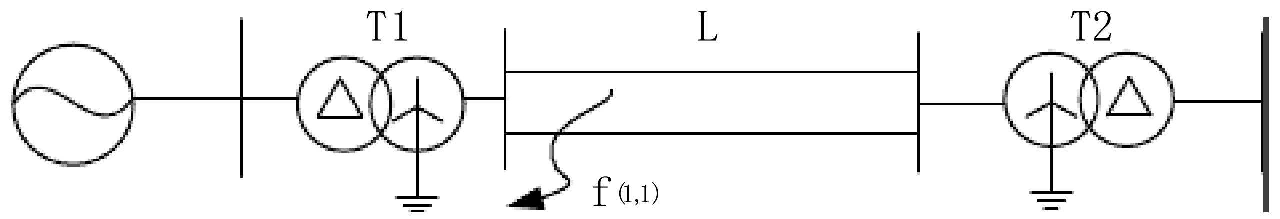
$$\cos\delta_{cm}=\frac{P_T(\delta_h-\delta_0)+P_{IIIM}\cos\delta_h-P_{IIM}\cos\delta_0}{P_{IIIM}-P_{IIM}} \tag{7-11}$$

式中，δ_0、δ_h应用弧度表示，且有

$$\delta_0=\sin^{-1}\frac{P_T}{P_{IM}};\quad \delta_h=180°-\sin^{-1}\frac{P_T}{P_{IIIM}} \tag{7-12}$$

由此可求得极根切除角δ_{cm}。

【例 7-1】



240MW	300MVA	$l=230km$	280MVA
10.5kV	$U_s(\%)=14$	$x_1=x_2=0.42\ \Omega/km$	$U_s(\%)=14$
$\cos\varphi=0.8$	10.5/242kV	$x_0=4x_1$	220/121kV
$X_d'=0.30$			
$X_2=0.44$			
$T_J=6s$			

图 7-7 例 7-1图

求f点发生两相短路接地时极限切除角。

解：取$S_B=220MVA$，$U_{B(110kV)}=115kV$。则

$$U_{B(220kV)}=115\times\frac{220}{121}=209.091kV$$

$$U_{B(10kV)}=209.091\times\frac{10.5}{242}=9.072kV$$

发电机G：$$X_d'=0.30\times\left(\frac{10.5}{9.072}\right)^2\times\frac{220}{240/0.8}=0.295$$

$$X_2=0.44\times\left(\frac{10.5}{9.072}\right)^2\times\frac{220}{240/0.8}=0.432$$

$$T_J=6\times\frac{240/0.8}{220}=8.18\ s$$

变压器T1：$$X_{T1}=\frac{14}{100}\times\left(\frac{242}{209.091}\right)^2\times\frac{220}{300}=0.138$$

变压器T2：$$X_{T2}=\frac{14}{100}\times\left(\frac{121}{115}\right)^2\times\frac{220}{280}=0.122$$

线路L： $X_L \quad 0.42 \quad 230 \quad \frac{220}{209.091^2} \quad 0.486$ ； $X_L/2 \quad 0.243$

$$X_{L(0)} \quad 4X_L \quad 4 \quad 0.486 \quad 1.944；\quad X_{L(0)}/2 \quad 0.972$$

（1）正常运行

令 $\quad U \quad 1 \quad 0^0$

$$X_I \quad 0.295 \quad 0.138 \quad 0.243 \quad 0.122 \quad 0.798$$

$$\cos_0 \quad 0.98 \quad {}_0 \quad 11.48 \quad Q_0 \quad P_0 tg_0 \quad 220tg11.48 \quad 44.67Mvar$$

$$S_0 \quad \frac{P_0 \quad jQ_0}{S_B} \quad 1 \quad j0.203$$

$$I \quad \frac{\overset{*}{S}_0}{\overset{*}{U}} \quad 1 \quad j0.203$$

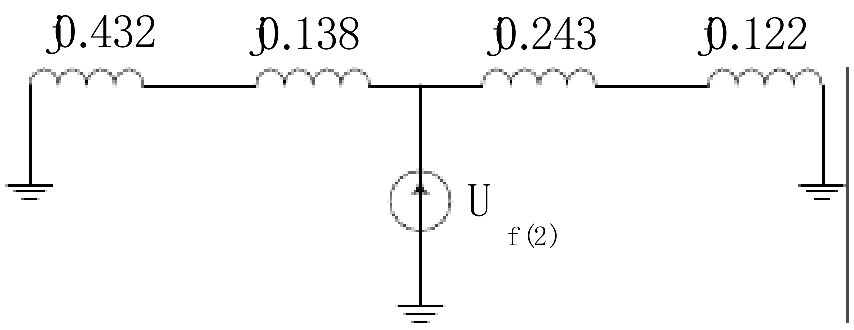
$$E \quad U \quad jX_d I \quad 1 \quad 0^0 \quad j0.798(1 \quad j0.203) \quad 1.162 \quad j0.798 \quad 1.41 \quad 34.53$$

$$E \quad 1.41；\quad {}_0 \quad 34.53$$

$$P_I \quad \frac{1.41 \quad 1}{0.798} \sin \quad 1.7669\sin$$

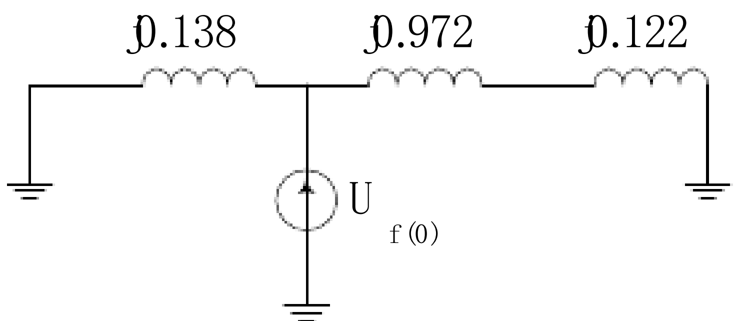
（2）故障时

负序网：



$$X_{(2)} \quad \frac{(0.432 \quad 0.138)(0.243 \quad 0.122)}{0.432 \quad 0.138 \quad 0.243 \quad 0.122} \quad 0.222$$

零序网：



则

$$X_{(0)} \quad \frac{0.138 \quad (0.972 \quad 0.122)}{0.138 \quad 0.972 \quad 0.122} \quad 0.123$$

$$X_{\Delta}=\frac{X_{(2)}X_{(0)}}{X_{(2)}+X_{(0)}}=\frac{0.222\times 0.123}{0.222+0.123}=0.079$$

$$X_{II}=(0.295+0.138)+(0.243+0.122)+\frac{(0.295+0.138)(0.243+0.122)}{0.079}=2.8$$

$$P_{II}=\frac{1.41\times 1}{2.8}\sin\delta=0.504\sin\delta$$

(3)故障切除后

$$X_{III}=0.295+0.138+0.486+0.122=1.041$$

$$P_{III}=\frac{1.41\times 1}{1.041}\sin\delta=1.35\sin\delta$$

$$\delta_{h}=180^{\circ}-\sin^{-1}\frac{1}{1.35}=132.2^{\circ}$$

$$\cos\delta_{cm}=\frac{P_{T}(\delta_{h}-\delta_{0})+P_{IIIM}\cos\delta_{h}-P_{IIM}\cos\delta_{0}}{P_{IIIM}-P_{IIM}}$$

$$=\frac{1\times\frac{\pi}{180}(132.2-34.53)+1.35\cos 132.2-0.504\cos 34.53}{1.35-0.504}$$

$$=0.458$$

$$\delta_{cm}=62.70^{0}$$

除了短路故障引起的扰动外，等面积定则还可用于分析简单电力系统在其他大扰动下的暂态稳定问题。举例说明如下。

【例 7-2】发电机（或三相线路）因故障突然断开，短时又重新合上。

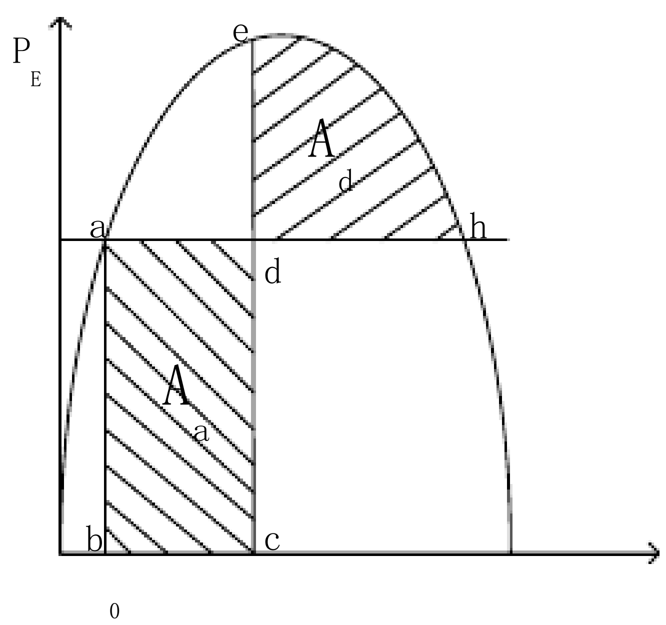


图 7-8 例 7-2图

【例 7-3】原动机输出功率 P_T 突然增加 50% 。

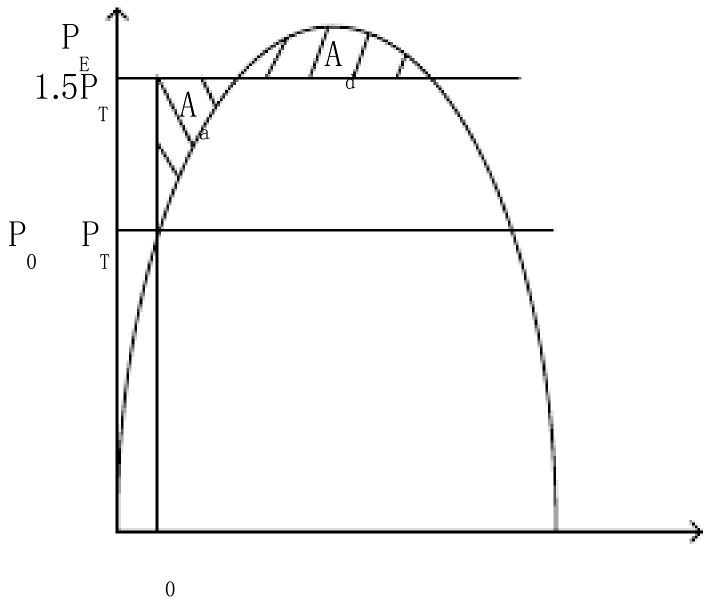


图 7-9 例 7-3图

【例 7-4】线路电容串联补偿突然退出。

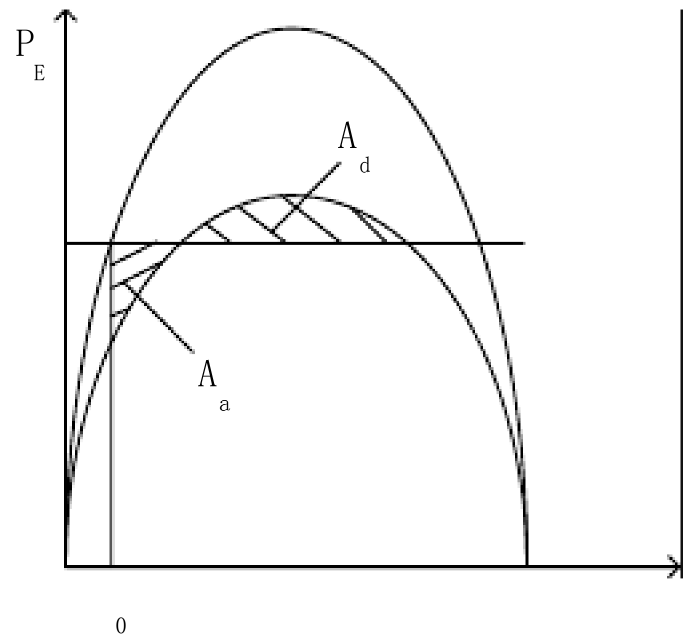


图 7-10 例 7-4图

三、摇摆曲线 (t)的求解

对继电保护来说，一般已知切除时间t_z而非切除角，因此需要知道极限切除时间t_{cm}。若t_z t_{cm}，系统将失去稳定。那么如何求极限切除时间呢？方法是

$$_{cm} \quad (t) \quad t_{cm}\text{。}$$

即：先求得发电机转子的摇摆曲线 (t)，再由 $_{cm}$ 求得t_{cm}。下面讨论 (t)的求解问题。

转子运行方程

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt} \quad _0(\quad 1) \\ &\frac{d}{dt} \quad \frac{1}{T_J}(P_T \quad P_E) \end{aligned} \qquad (7\text{-}13)$$

正常运行时： $P_E \quad P_{IM} \sin$ （7-14 ）

故障时： $P_E \quad P_{IIM} \sin$ （7-15 ）

故障切除后： $P_E \quad P_{IIIM} \sin$ （7-16 ）

初始条件： $_0 \quad \sin^{1}\frac{P_T}{P_{IM}}; \qquad 1$ （7-17）

采用数值方法求解转子运动方程（微分方程）。下面介绍两种方法

1. 分段计算法

转子运动方程

$$\frac{d}{dt} \quad 360 f_0 \qquad (7\text{-}18)$$

$$\frac{d}{dt} \quad \frac{1}{T_J} \quad P \qquad (7\text{-}19)$$

式中，　　1；　P　P_T　P_E 称过剩功率。

小贴士：

用度数表示时，有：$\frac{d}{dt}$　　$_0$　　$2\pi f_0$　　$360 f_0$

分段计算法基本思想：将转子运动过程细分成小时段　t，小时段　t内线性化。

t一般取 0.05～0.1s。

假设条件

（1）从一个时段的中点到下一时段中点的一段时间内，过剩功率　P 保持不变，并等于下一时段开始时的过剩功率。

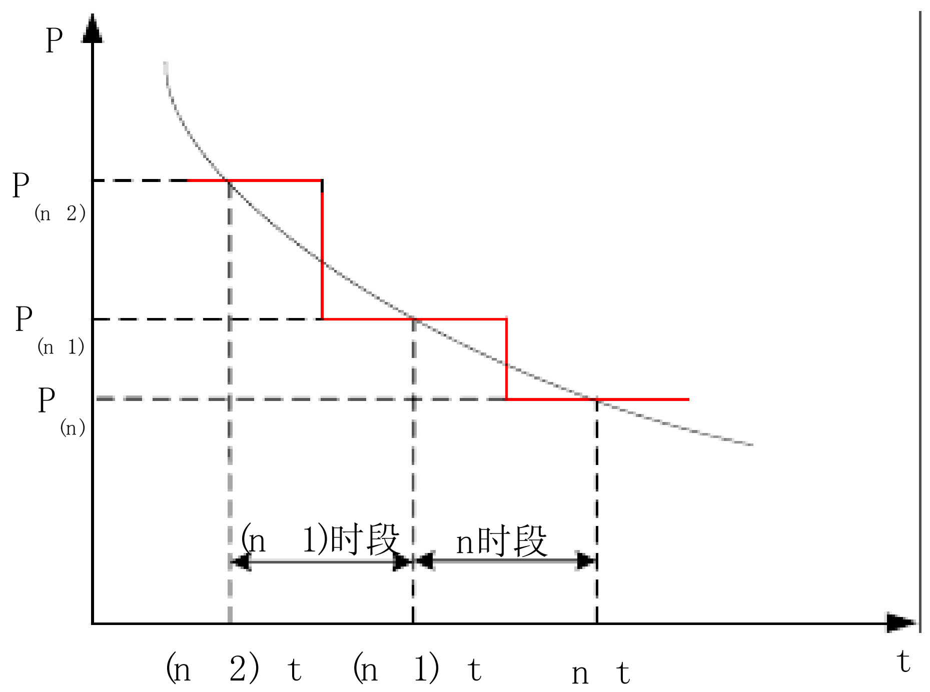


图 7-11 分段计算法的　P 分段

（2）每个时段内的相对角速度　　不变，且等于该时段中点的相对角速度。

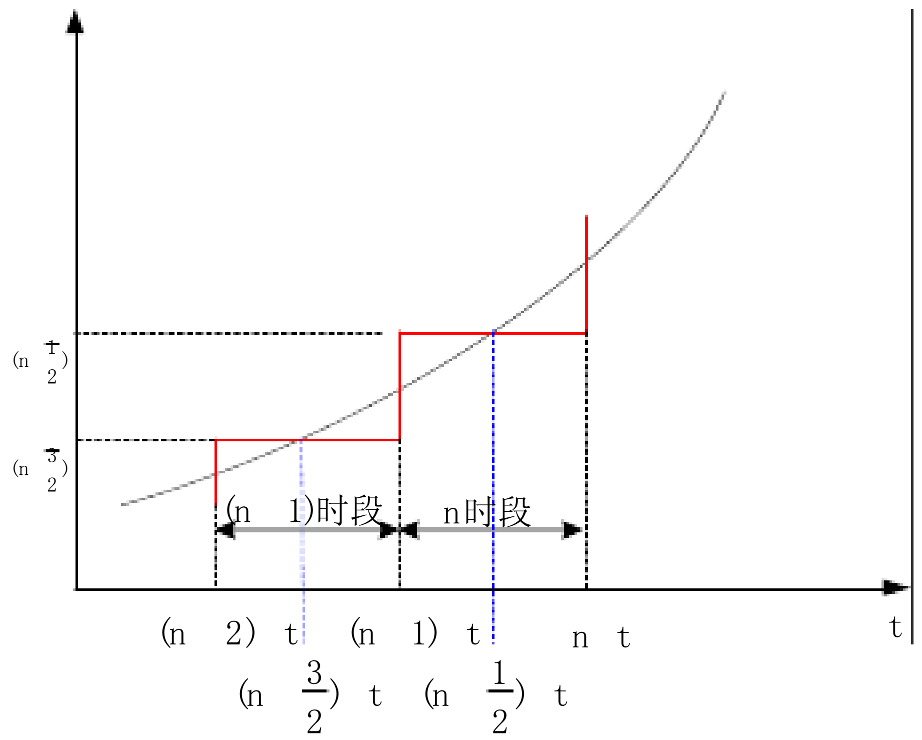


图 7-12 分段计算法的　　分段

若已知 (n　1)时段结束时的角度，则

$$_{(n\ 1)}\ ^{P(\ )}P_{(n\ 1)}\quad P_{(n\ 1)}\quad P_{T}\quad P_{(n\ 1)}\qquad _{(n\ 1)}\ \frac{1}{T_J}\ P_{(n\ 1)}\quad t$$

即

$$_{(n\ \frac{1}{2})}\qquad _{(n\ \frac{3}{2})}\ \frac{1}{T_J}\ P_{(n\ 1)}\quad t \tag{7-20}$$

由 $\frac{d}{dt}$　$360\ f_0$　可得

$$_{(n\ 1)}\quad _{(n\ 1)}\quad _{(n\ 2)}\quad 360f_0\quad _{(n\ \frac{3}{2})}\ t \tag{7-21}$$

$$_{(n)}\quad _{(n)}\quad _{(n\ 1)}\quad 360f_0\quad _{(n\ \frac{1}{2})}\ t \tag{7-22}$$

两式相减，得

$$_{(n)}\quad _{(n\ 1)}\quad 360f_0\quad _{(n\ \frac{1}{2})}\quad _{(n\ \frac{3}{2})}\quad t$$

$$360f_0\ \frac{1}{T_J}\ P_{(n\ 1)}\quad t^2$$

$$\frac{360f_0\ t^2}{T_J}\ P_{(n\ 1)} \tag{7-23}$$

改写成迭代公式

$$_{(n)}\quad _{(n\ 1)}\quad 360f_0\ \frac{t^2}{T_J}\ P_{(n\ 1)}\quad ^{令K\ \ 360\ f_0\ \frac{t^2}{T_J}}\quad _{(n\ 1)}\quad K\ \ P_{(n\ 1)} \tag{7-24}$$

$$_{n}\quad _{(n\ 1)}\quad _{(n)}$$

在发生短路瞬间与故障切除瞬间，功率要发生突变，这时求 $P_{(n\ 1)}$ 应由下式求得

$$P_{(n\ 1)} \quad \frac{1}{2}(\,P_{(n\ 1)} \qquad P_{(n\ 1)}\,) \tag{7-25}$$

式中，$P_{(n\ 1)}$ 是第 n 1 时段末突变前的过剩功率；$P_{(n\ 1)}$ 是第 n 1 时段末突变后的过剩功率。

【例 7-5】续例 7-1，应用分段计算法求解：（1）极限切除时间 t_{cm}；（2）在 0.15s 切除故障时的 (t) 曲线。

解：

$$P_{I} \quad 1.7669\sin$$

$$P_{II} \quad 0.504\sin$$

$$P_{III} \quad 1.35\sin$$

取 t 0.05s，则

$$K \quad \frac{360 f_0 \quad t^2}{T_J} \quad \frac{360 \quad 50 \quad 0.05^2}{8.18} \quad 5.5$$

(1) t 0 时发生短路：$_0 \quad 34.53^0$

第一时段 (0 ~ 0.05s)：

$$P_{(0)} \quad 0 \text{ (短路前)}$$

$$P_{(0)} \quad 1 \quad 0.504\sin 34.53^0 \quad 0.715 \text{ (短路瞬间)}$$

$$P_{(0)} \quad \frac{1}{2}(\,P_{(0)} \qquad P_{(0)}\,) \quad \frac{1}{2}(0 \quad 0.715) \quad 0.3575$$

$$_{(1)} \qquad _{(0)} \quad K \quad P_{(0)} \quad 0 \quad 5.5 \quad 0.3575 \quad 1.97^0$$

$$_{(1)} \qquad _0 \qquad _{(1)} \quad 34.53^0 \quad 1.97^0 \quad 36.50^0$$

第二时段 (0.05 ~ 0.10s)：

$$P_{(1)} \quad 1 \quad 0.504\sin 36.50^0 \quad 0.7$$

$$_{(2)} \qquad _{(1)} \quad K \quad P_{(1)} \quad 1.97 \quad 5.5 \quad 0.7 \quad 5.82^0$$

$$_{(2)} \qquad _{(1)} \qquad _{(2)} \quad 36.50^0 \quad 5.82^0 \quad 42.32^0$$

第三时段 (0.10 ~ 0.15s)：

$$P_{(2)} \quad 1 \quad 0.504\sin 42.32^0 \quad 0.661$$

$$_{(3)} \qquad _{(2)} \quad K \quad P_{(2)} \quad 5.82^0 \quad 5.5 \quad 0.661 \quad 9.46^0$$

$$_{(3)} \qquad _{(2)} \qquad _{(3)} \quad 42.32^0 \quad 9.46^0 \quad 51.78^0$$

第四时段(0.15 ~ 0.20s)：

$$P_{(3)} \quad 1 \quad 0.504\sin 51.78^0 \quad 0.604$$

$$_{(4)} \quad _{(3)} \quad K \quad P_{(3)} \quad 9.46^0 \quad 5.5 \quad 0.604 \quad 12.78^0$$

$$_{(4)} \quad 51.78^0 \quad 12.78^0 \quad 64.56^0 \quad _{cm} \quad 62.70^0$$

显然，$_{cm}$ 必在第四时段内，即0.15 ~ 0.20s之间。

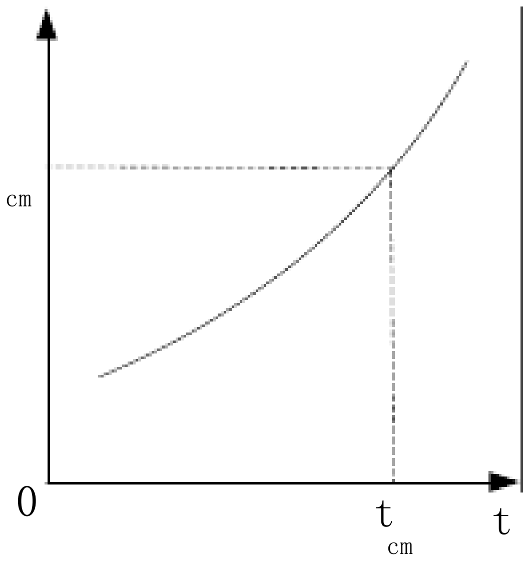


图 7-13 例 7-5的求极限切除角 t_{cm} 对应的 (t) 曲线

采用线性插值方法求t_{cm}

$$t_{cm} \quad 0.15 \quad \frac{62.7^0 \quad 51.78^0}{64.56^0 \quad 51.78^0} \quad 0.05$$

$$0.15 \quad 0.0427$$

$$0.1927\ s$$

即：如果实际切除时间大于 0.1927s，在该运行条件下系统是不稳定的。

（2） t 0.15 秒时切除故障

第四时段 (0.15 ~ 0.20s)：

$$P_{(3)} \quad 1 \quad 0.504\sin 51.78^0 \quad 0.604$$

$$P_{(3)} \quad 1 \quad 1.35\sin 51.78^0 \quad 0.06$$

$$P_{(3)} \quad \frac{1}{2}(\ P_{(3)} \quad P_{(3)}\ ) \quad \frac{1}{2}(0.604 \quad 0.06) \quad 0.272$$

$$_{(4)} \quad _{(3)} \quad K \quad P_{(3)} \quad 9.46 \quad 5.5 \quad 0.272 \quad 10.96$$

$$_{(4)} \quad _{(3)} \quad _{(4)} \quad 51.78^0 \quad 10.96^0 \quad 62.74^0$$

第五时段(0.20 ~ 0.25s)：

$$P_{(4)} \quad 1 \quad 1.35\sin 62.74^0 \quad 0.2$$

$$_{(5)} \quad _{(4)} \quad K\ P_{(4)} \quad 10.96 \quad 5.5 \quad (\ 0.2) \quad 9.86$$

$$_{(5)} \quad _{(4)} \quad _{(5)} \quad 62.74^0 \quad 9.86^0 \quad 72.60^0$$

依此类推，求出 (t) 曲线：

t	
0	34.53°
0.05	6.50°
0.10	42.32°
0.15	51.78°
0.20	62.74°
0.25	72.60°
0.30	80.88°
0.35	87.33°
0.40	91.87°
0.41	94.50°
0.42	95.23
0.55	94.07
0.60	91.01
…	…

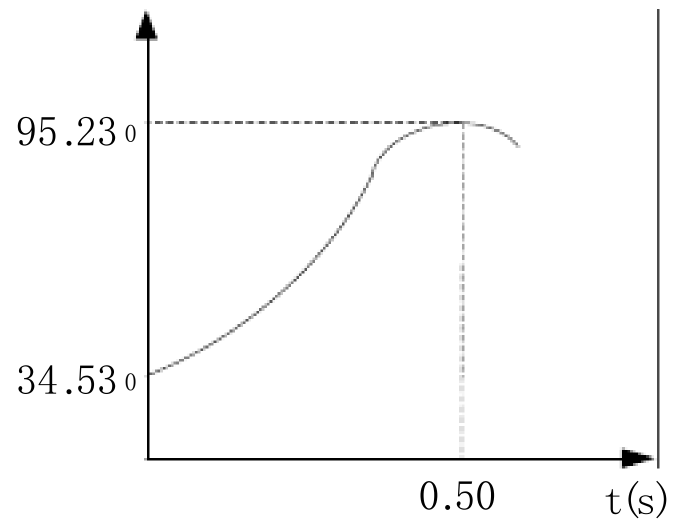


图 7-14 例 7-5的在 0.15s 切除故障时的 (t) 曲线

可见， t 0.5 时， 达到最大，之后开始减小，最后趋于某一定值。

2. 改进欧拉法

对于一阶微分方程式

$$X \quad \frac{dX}{dt} \quad f(X) \qquad (7\text{-}26)$$

对 X (t$_n$ t)进行泰勒级数展开，得

$$X(t_n \quad t) \quad X(t_n) \quad \left.\frac{dX}{dt}\right|_n \quad t \quad \left.\frac{d^2X}{dt^2}\right|_n \quad \frac{t^2}{2!} \qquad (7\text{-}27)$$

忽略 t^3 及以后项