

文章编号:1007-6492(1999)01-0019-05

多机电力系统暂态稳定性的快速计算 突变理论模型

厉 励

(郑州工业大学电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要: 根据 Thom 提出的突变理论,将研究等值双机系统暂态稳定用的数学模型转换成相应的突变理论模型,避开费时的非线性微分方程组的数值求解,即可快速算出在经历大干扰后的电力系统能否保持暂态稳定.该方法可提高计算速度,并能保证计算的准确性,为整个电力系统实现综合稳定控制和快速在线动态安全分析预报提供了可能性.

关键词: 电力系统; 暂态稳定; 快速计算; 突变理论模型

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

目前还没有一种十分理想的暂态稳定分析的快速计算方法能完全满足对电力系统暂态稳定的在线监视和预报的要求,这是因为现在使用的分析方法的计算量及所编计算程序的规模仍较大,耗费的机时仍较长.本文在研究电力系统暂态稳定过程中引入了突变理论这一新兴理论.应用该理论研究电力系统的暂态稳定,目前尚处于起步阶段,本文讨论的是研究暂稳的简化突变论模型的建立.其基本思路是:将一个多机电力系统按照大干扰后发电机的初加速度,把发电机分为两组,分别用等值临界机组和等值非临界机组表示.推导出这两台等值发电机电势间的相对电气角与故障时网络参数、故障后网络参数间的关系式,通过一系列数学变换,将上述关系式转换成标准的突变形式之一——燕尾突变,然后根据计算点与燕尾突变分叉集的位置关系,即可判明故障切除后电力系统能否保持暂态稳定.如果在计算机上配以绘制曲线的程序,那么我们就可以从计算机屏幕上直接观察到系统运行点的变化情况,从而可直观地判断出系统的暂态稳定状况.

1 多机系统暂态稳定的动态等值—等值双机系统暂态稳定数学模型^[1,2]

具有 n 台发电机的电力系统中,第 i 台发电机的转子运动方程可用非线性微分方程表示:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=1}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1 \leq i \leq n) \quad (1)$$

式(1)中: M_i 表示第 i 台发电机转子惯性常数; P_{mi} 表示第 i 台发电机输入的机械功率; E_i, E_j 分别表示节点 i, j 处第 i 台和第 j 台发电机电势; δ_{ij} 表示 E_i 和 E_j 间夹角; G_{ij}, B_{ij} 分别表示 E_i 和 E_j 间导纳的实部与虚部.

通常当一大型电力系统中发生某一故障时,按照各台发电机获得的初始加速度大小和相对故障点距离的远近,可将全部发电机划分成两个组.第一组发电机或由于与故障点之间的电气距离较短;或由于发电机组转动部分的惯性常数较小,因此当电力系统出现故障后在不平衡的机械功率和电气功率的作用下,这些发电机获得较其它发电机有明显区别的转子加速度,将会产生明显的振荡摇摆.本文将这组受故障影响较大并产生明显振荡摇摆的机组称为临界机组;而其它受故障影响较小的那部分机组称为非临界机组.电力系统长期运行经验表明:一般系统故障只导致为数极少的发电机组获得明显的加速度,而绝大部分发电机只受到轻微的扰动,所以我们可近似认为等值非临界机组的转子按同步速度旋转.

设有 n 台发电机的系统,其中 n_k 台为临界机组, $(n - n_k)$ 台为非临界机组,那么这 n_k 台临

收稿日期:1998-09-20;修订日期:1998-10-30

作者简介:厉 励(1973-),男,浙江省东阳市人,郑州工业大学助教,硕士,主要从事电力系统稳定分析和城市电网规划方面的研究.

界机组和 $(n - n_k)$ 台非临界机组分别可以用一台等值机组来表示. 等值机组的惯性常数和转子“绝对角”可分别写成如下形式:

$$\begin{cases} M_k = \sum_{j=1}^{n_k} M_j, \\ \delta_k = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{n_k} M_j \delta_j, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_0 = \sum_{i=n_k+1}^n M_i, \\ \delta_0 = \frac{1}{M_0} \sum_{i=n_k+1}^n M_i \delta_i. \end{cases} \quad (3)$$

电力系统作为上述等值双机系统处理时, 经过适当的代数变换, 其等值临界发电机组的转子运动方程可写成如下形式:

$$M_k \frac{d^2 \psi_k}{dt^2} = P_k - T_k \sin(\psi_k - \alpha_k), \quad (4)$$

式(4)中: $\psi_k \triangleq \delta_k - \delta_0,$ (5)

$$\begin{aligned} P_k &\triangleq \sum_{j=1}^{n_k} P_{nj} - \frac{M_k}{M_0} \sum_{j=n_k+1}^n P_{mj} - \sum_{j=1}^{n_k} E_j^2 G_{jj} + \\ &\frac{M_k}{M_0} \sum_{i=n_k+1}^n \sum_{m=n_k+1}^n E_i E_m (G_{im} \cos \delta_m + \\ &B_{im} \sin \delta_m), \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_k \triangleq \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a &\triangleq \sum_{m=1, m \neq j}^n \sum_{j=1}^{n_k} E_j E_m [B_{jm} \sin(\delta_{nj} + \psi_k) - \\ &G_{jm} \cos(\delta_{nj} + \psi_k)] + \\ &\frac{M_k}{M_0} \sum_{m=n_k+1}^n \sum_{j=1}^{n_k} E_m E_j [B_{mj} \sin(\delta_{nj} + \psi_k) + \\ &G_{mj} \cos(\delta_{nj} + \psi_k)], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} b &\triangleq \sum_{m=1, m \neq j}^n \sum_{j=1}^{n_k} E_j E_m [G_{jm} \sin(\delta_{nj} + \psi_k) + \\ &B_{jm} \cos(\delta_{nj} + \psi_k)] - \\ &\frac{M_k}{M_0} \sum_{m=n_k+1}^n \sum_{j=1}^{n_k} E_m E_j [G_{mj} \sin(\delta_{nj} + \psi_k) - \\ &B_{mj} \cos(\delta_{nj} + \psi_k)], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\alpha_k \triangleq \arctan \frac{a}{b}. \quad \text{成立} \quad (10)$$

2 燕尾突变理论模型的建立^[3, 4]

应用突变论研究电力系统暂态稳定问题时, 应把等值双机电力系统数学模型转换成 Thom 分

类定理中所提出的标准突变形式之一, 从而形成研究电力系统暂态稳定的突变论模型.

正常运行条件下两等值发电机电势间夹角不

变, 由式(4), 将 $\frac{d^2 \psi_k}{dt^2} = 0$ 代入得

$$P_k - T_k \sin(\psi_k - \alpha_k) = 0, \quad (11)$$

解式(11)得稳定运行时两等值发电机电势间夹角(即稳定夹角):

$$\psi_k^0 = \arcsin \frac{P_k}{T_k} + \alpha_k, \quad (12)$$

由此可得稳定运行时两等值发电机电势间的不稳定夹角 ψ_k^* :

$$\psi_k^* \approx \pi - \psi_k^0, \quad (13)$$

根据所研究的故障条件, 可得到故障时电力网络的导纳阵, 应用式(6)~(9)就可算出故障时 P_k^f, T_k^f 及 α_k^f ; 同理再根据故障切除后的条件, 可算出故障切除后的 P_k^p, T_k^p 和 α_k^p .

以故障发生瞬间作为计时起点, 故障期间等值临界发电机转子累积的动能为

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_c} M_k \frac{d^2 \psi_k}{dt^2} \frac{d \psi_k}{dt} dt = \\ &\int_0^{t_c} [P_k^f - T_k^f \sin(\psi_k - \alpha_k^f)] \frac{d \psi_k}{dt} dt. \end{aligned} \quad (14)$$

式中 t_c 为故障切除时间; ψ_k^0 为 $t = 0$ 时, 两等值发电机电势间夹角; ψ_k^* 为 $t = t_c$ 时, 两等值发电机电势间夹角.

记 $\psi_k = \frac{d^2 \psi_k}{dt^2}, \dot{\psi}_k = \frac{d \psi_k}{dt}$, 由式(14)得:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} M_k \dot{\psi}_k^2 - 0 = P_k^f (\psi_k - \psi_k^0) + \\ &T_k^f [\cos(\psi_k - \alpha_k^f) - \cos(\psi_k^0 - \alpha_k^f)]. \end{aligned} \quad (15)$$

该式就是故障系统转子累积动能表达式, 从式(4)同理可得系统故障切除后机组势能表达式:

$$\begin{aligned} &\int_{t_c}^{t_u} M_k \dot{\psi}_k \psi_k dt = \\ &\int_{t_c}^{t_u} M_k [P_k^p - T_k^p \sin(\psi_k - \alpha_k^p)] \dot{\psi}_k dt, \end{aligned} \quad (16)$$

式中 t_u 为失稳时间.

由式(16)可得, 故障切除后发电机势能表达式:

$$\begin{aligned} &0 - \frac{1}{2} M_k \dot{\psi}_k^2 = P_k^p (\psi_k - \psi_k^*) + \\ &T_k^p [\cos(\psi_k - \alpha_k^p) - \cos(\psi_k^* - \alpha_k^p)], \end{aligned} \quad (17)$$

令故障恰在极限切除时间切除, 建立使系统暂态稳定成立的条件:

$$\frac{1}{2} M_k \dot{\psi}_k^2 - P_k^p \psi_k -$$

$T_k^p \cos(\psi_k - \varphi_k) + K^u = 0,$ (18)

其中: $K^u \triangleq P_k^p \psi_k^u + T_k^p \cos(\psi_k - \varphi_k),$ (19)

令 $P_k \triangleq \frac{1}{M_k} [P_{mk} - M_{ek}^f(t_{0+})]$ 作为故障出现后瞬间 t_{0+} 时转子的临界加速度. 而 P_{mk} 表示故障前发电机输入的原动机机械功率.

将 ψ_k 在平衡点 ψ_k^0 展开成泰勒级数 (取前两项), 然后求导变形得:

$\psi_k = \gamma + \varphi_k,$ (20)

$\psi_k^2 = 2 \gamma_k (\gamma - \beta),$ (21)

式中: $\gamma \triangleq \frac{1}{2} \gamma_k^2 + \beta,$ (22)

$\beta \triangleq \psi_k^0 - \varphi_k.$ (23)

再将式 (18) 中余弦函数展成泰勒级数, 则式 (18) 可写为:

$$\begin{aligned} &M_k \gamma_k (\gamma - \beta) - P_k^p (\gamma + \varphi_k) - \\ &T_k^p \left[n^1 - \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma^4}{4!} + k^u \right] = 0, \end{aligned}$$
 (24)

将上式整理、变形得

$$\begin{aligned} &\gamma^4 - 12 \gamma^2 + \frac{24}{T_k^p} (P_k^p - M_k \gamma_k) \gamma + \\ &\frac{24}{T_k^p} (M_k \gamma_k \beta + P_k^p \varphi_k + T_k^p - k^u) = 0. \end{aligned}$$
 (25)

式 (25) 正好是燕尾突变流形的方程形式, 即

$y^4 + uy^2 + vy + w = 0.$ (26)

比较式 (25) 和式 (26) 有

$u = -12,$ (27)

$v = \frac{24}{T_k^p} (P_k^p - M_k \gamma_k),$ (28)

$w = \frac{24}{T_k^p} (M_k \gamma_k \beta + P_k^p \varphi_k + T_k^p - k^u).$ (29)

式 (27) ~ 式 (29) 中 u, v, w 即为燕尾突变流形的 3 个控制变量, 它们亦是系统参数及状态变量的函数. 式 (26) ~ 式 (29) 即为本文所推得的研究电力系统暂稳的 (简化) 燕尾突变理论模型.

由突变论有关内容可知: 当 $u = -12 < 0$ 时, 燕尾突变流形分叉集截线应绘成如图 1 所示的形状. 将燕尾突变流形所划分的空间分成 3 块区域, 并将它们分别编号, 称为 1 区、2 区和 3 区.

由此可得利用电力系统燕尾突变理论暂态稳定模型进行暂稳分析的判别方法 (如图 1 所示):

(1) 若计算出的临界机组运行点在 1 区, 随着系统运行的变化:

① 运行点在 1 区内周游, 系统是暂态稳定的;

② 运行点由 1 区进入 3 区, 则系统可能失去

暂态稳定;

③ 运行点由 1 区进入 2 区, 则系统失去暂态稳定;

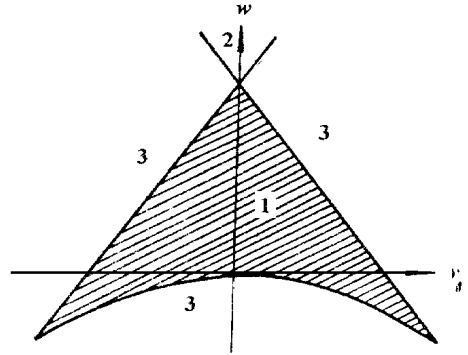


图 1 燕尾突变流形分叉集截线划分区域 $u = -12$

(2) 若计算出的临界机组运行点在 2 区, 则系统失去暂态稳定.

(3) 若计算出的临界机组运行点在 3 区, 随着系统运行的变化:

① 运行点在 3 区内周游或由 3 区进入 1 区, 则系统是暂态稳定的;

② 运行点由 3 区进入 2 区, 则系统失去暂态稳定.

3 燕尾突变理论模型在电力系统暂稳分析中的应用^[4]

本文利用燕尾突变论模型对一典型三机系统 WSCC (如图 2 所示) 进行了电力系统暂稳分析计算. 同时, 在相同条件下本文也用传统的时域分析法对 WSCC 系统进行了暂稳分析计算. 并在表 1 中列出了在 WSCC 系统不同位置发生同一故障 (三相短路) 时, 突变论分析方法和传统改进欧拉法的计算结果. 验算的基本前提是: 发电机 E_q' 不变; 不计发电机自动励磁调节和原动机调速系统

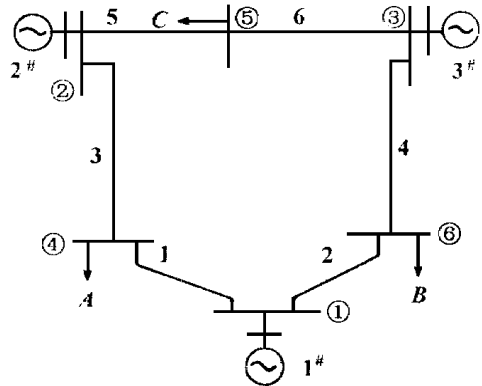


图 2 WSCC 三机系统图

的作用;不计系统失去暂稳后转入异步运行或再同步的可能性. 根据两种方法的暂稳计算结果可以分别绘制出发电机摇摆曲线和燕尾突变理论暂稳计算结果图,由两图得出的结论是一致的(图 3 给出了突变理论暂稳计算的程序原理框图). 图

4、图 5 分别为表 1 中事故 1 的发电机摇摆曲线(图中标“1”的曲线表示各发电机分开计算时有最大角度差的两台机组之间的角度摇摆曲线;标“2”的曲线为等值临界机组与等值非临界机组之间的摇摆曲线)及燕尾突变理论暂稳计算结果图.

表 1 WSCC(三机)系统验算结果

事故 编号	短路母 线编号	跳开线 路编号	临界发电 机编号	极限切除时间/s		燕尾突变理论有关计算结果			
				改进欧拉法结果	燕尾突变理论结果	v	w	稳定性	
1	1	1	2	0.345	0.3463	0.3220	28.5153	稳定	
2	2	5	1	0.175	0.1843	-1.1605	14.7400	稳定	
3	4	1	1	0.225	0.2189	2.0060	27.0270	稳定	
4	5	5	2	0.510	0.4982	1.4962	23.1437	稳定	
5	6	4	2	0.280	0.2791	3.8061	26.1001	稳定	

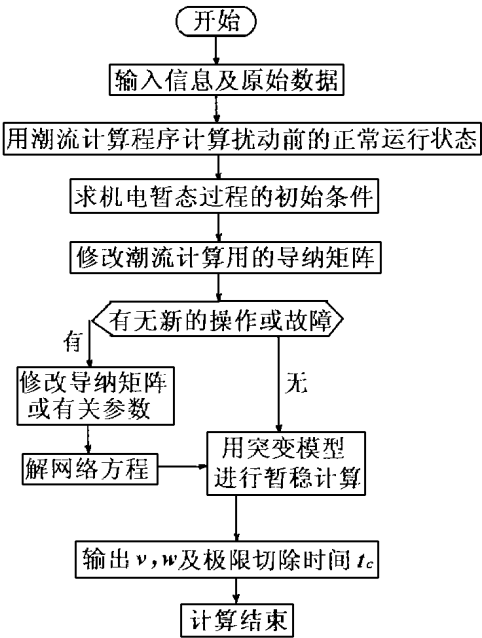


图 3 突变理论暂稳计算的程序原理框图

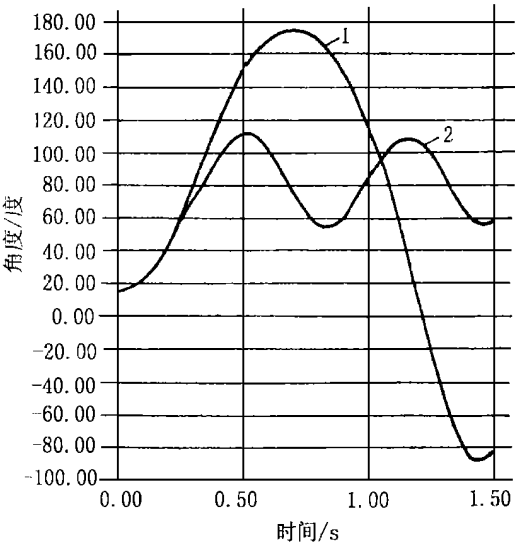


图 4 WSCC 三机系统事故 1 发电机摇摆曲线

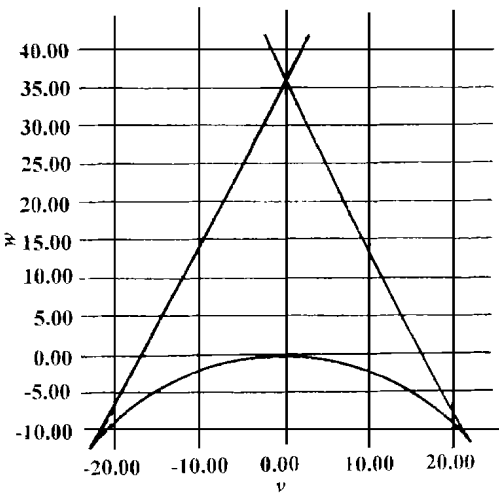


图 5 WSCC 三机系统事故燕尾突变论计算结果

4 结论、问题及展望

- (1) 由等值双机系统得到的暂态稳定的简化突变论模型——燕尾突变模型,在近似计算中得到令人满意的结果.对于典型的 WSCC 三机系统,对照经典的微分方程数值解法,获得极一致的结论.
- (2) 由于在整个求解过程中,不必进行高阶非线性微分方程组的数值求解,用燕尾突变论模型进行暂稳分析,其计算速度极快,是一种可用于在线动态分析计算中的快速暂稳计算方法.
- (3) 为了使突变论模型达到其最高的准确性,对于不同的电力系统或同一系统的不同故障,可以建立最适合该系统或该故障的突变理论模型进行暂态稳定性分析计算.
- (4) 用突变论模型进行电力系统暂稳分析尚处于起步阶段,还存在一些不成熟之处.例如:突变理论方法在实际电力系统中应用效果以及当原动机功率改变,发电机自动励磁调节作用后,如何建立突变理论模型等,都有待做进一步的研究工作.

参考文献

[1] ANNDERSON P P.FOUND A A.Power System Control and Stability[M].Iowa:Iowa State University Press ,1977.37—44.

[2] 孙祥林.电力系统暂态稳定的简化突变理论模型[J] . 郑州工学院学报,1993,14(2) :1—6.

[3] MIBING A M,WVONG M D.Transient stability analysis of multi machine power system by catastrophe theory [J] JEE Proceedings ,136,Part C July 1989.

[4] POSTON T,STEWART T.Catasphe Theory and Its Applications[M] [s 1.] :Pit man ,1978.176—178.

Quick — calculation Catastrophe Theory Method for the Transient Stability of Multi machine Power Systems

LI Li

(College of Electrical and Information Engineeing ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract :According to the catastrophe theory proposed by Thom the mathematical model for an equivalent two — machine power systems is transformed into an appropriate catastrophe theory model .Using this model judgement of whether a power system is stable after disturbance can be made by quick calculation and it do not need to take more time to solve the set of nonlinear differential equations .The catastrophe theory results compare favourably with the traditional time — solution results for the WSCC system for the same faults or disturbances .

Key words :power system ;transient stability ;quick — calculation method ;catastrophe theory

(上接 14 页)

参考文献

[1] YOKOYAMA A,KOMIYAMA H,LNOUE H.et al . The hydrogenation of carbon monoxide by amorphous ribbons[J] J Catal ,1981,68;355.

[2] PEUCKET M,BAIKER A.Hydrogenation of carbon mono — xide on amorphous $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$ [J] .J Chem Soc Faraday Trns ,1985,81(1) ;2797.

[3] 张国胜 .快速凝固 Ni — Al 基合金有机加氢催化剂的研究[D] . 郑州:郑州工业大学,1996.

[4] 闵恩泽 .工业催化剂的研制与开发[M] . 北京:中国石化出版社,1997.195

[5] 张海峰,李 杰,宋启洪等.急冷 Ni — Al 合金显微结构及催化性能[J] .材料科学进展,1993,7(3) :225.

Optimization of Reaction Conditions for Fatty Ntrile Hydrogenation to Pri mary Amine Catalyzed by Rapidly Solidified Ni AlSi FeCe Alloy

ZHANG Guo — sheng¹, SHEN Ning — fu², WANG Xi — ke², CHEN Hai — song³

(1.College of Materials Science and Engineering ,University of Science and Technology Beijing ,Beijing 100083,China ; 2. Research Center for Materials ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002,China ; 3.College of Electrical and Information Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract :A new kind of Raney Ni catalyst was prepared from rapidly solidified Ni AlSi FeCe alloy precursor . Cross experimentation was carried out to optimize the reaction conditions for fatty nitrile hydrogenation to pri mary amine catalyzed by this new catalyst . The results show that the new catalyst produces favourable catalytic properties under the conditions of $P_{H_2}=3.0\text{ MPa}$, $P_{NH_3}=0.9\text{ MPa}$, $T=428\text{ K}$, $t=1.50\text{ h}$, $Cat./RCN=0.5\%$ (wt . — wt . %) within the adjusting margin , the corresponding conversion ratio of fatty nitrile and selectivity of pri mary amine are up to 99.07% and 99.41% respectively .

Key words :rapid solidification ; Ni — Al alloy ; catalysis ; hydrogenation of fatty nitrile