

考虑群内运动和阻尼影响的系统模型研究

张力晨,周良松,代仕勇,吴 勇

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 基于二群失稳模式提出了一种新的系统模型,计及了群内发电机的相对运动,并考虑了阻尼因素。假设同一机群内任意 2 台发电机转子角度相对该群的摆动呈线性关系,并据此对模型中的电磁功率表达式进行了化简。利用短时域仿真数据作为输入,采用系统辨识法辨识模型参数,无需预先知道阻尼系数和机械惯性时间常数。对新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真计算验证了该方法的准确性。该模型可应用于在线稳定预测。

关键词: 二群失稳模式; 系统辨识; 暂态稳定预测

中图分类号: TM 712; TM 743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0047-04

0 引言

在线安全稳定分析对系统安全经济运行起着至关重要的作用,如能准确、快速地预测系统稳定性,则可有效保障系统安全。最常用的时域仿真法虽然准确可靠,但花费时间过长,达不到实时或准实时稳定分析的要求。因此,寻找一种能够减少对故障系统的仿真时间、提前判别系统稳定性的方法成为重要研究方向。文献[1]提出,如果暂态过程中发电机分成二群,同一机群内,机组转子角度同步变化,则可以简化系统模型,并根据简化模型进行第一摇摆的快速暂态稳定预测。文献[2]在惯性中心坐标下也得到了类似的模型。然而,实际上系统发生故障时,即使功角摇摆分为 2 群,也不可能严格同调,上述 2 种模型均存在误差。另一方面,以往稳定性分析中往往忽略阻尼。如果稳定计算采用高阶模型,如六阶发电机模型,电气阻尼已详细计入阻尼绕组,而仅机械阻尼又很小,故阻尼系数一般也可设为零。但是,对于低阶发电机模型,如果设置阻尼系数为零,则有可能出现故障后系统振荡不衰减的情况,甚至有可能将原本稳定的系统误判为不稳定。因此,很有必要分析低阶模型下,阻尼对系统稳定性的影响。本文在计及群内发电机相对运动的情况下,推导了新的系统模型,并且在模型中考虑了阻尼的影响,因而可提高暂态稳定预测的准确性。仿真结果显示该预测方法是准确、有效的。

1 考虑群内运动的系统模型

对于一个有 n 台发电机的系统,采用电力系统经典数学模型,发电机暂态电抗后电势和原动机功率均保持恒定,负荷用恒定阻抗模拟。在考虑阻尼的情况下,第 i 台发电机的转子运动方程可描述为^[3]

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i - \omega_s \\ M_i \frac{d\omega_i}{dt} &= P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

如果系统故障后为二群失稳模式,即分为加速机群 A 和剩余机群 S ,若发电机 $i \in S$,则其电磁功率表达式第 2 项可分为 2 部分:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) + \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in A}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3)$$

对于发电机 $i \in A$ 有类似表达式。

在不考虑群内发电机相对运动时可知:

$$\delta_i = \delta_{i0} - \delta_{S0} + \delta_S \quad i \in S$$

$$\delta_j = \delta_{j0} - \delta_{A0} + \delta_A \quad j \in A$$

若用 $\Delta\delta_{is}, \Delta\delta_{ja}$ 表示发电机转子角相对 S 群或 A 群的摆动,也即群内发电机相对运动,则有

$$\begin{aligned} \delta_i &= \delta_{i0} - \delta_{S0} + \delta_S + \Delta\delta_{is} \quad i \in S \\ \delta_j &= \delta_{j0} - \delta_{A0} + \delta_A + \Delta\delta_{ja} \quad j \in A \end{aligned} \quad (4)$$

当 $i \in S$,将式(4)代入式(3),下面对电磁功率表达式进行化简。

第 1 步:化简式(3)中第 2 项。

对于任意 $j \in S, j \neq i$,由于 $(\Delta\delta_{is} - \Delta\delta_{js})$ 很小,可以近似认为

$$\cos(\Delta\delta_{is} - \Delta\delta_{js}) \approx 1$$

$$\sin(\Delta\delta_{is} - \Delta\delta_{js}) \approx \Delta\delta_{is} - \Delta\delta_{js}$$

由此可简化式(3)中的第 2 项为

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \approx A_{i0} + \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} A_{ij} (\Delta\delta_{is} - \Delta\delta_{js}) \quad (5)$$

$$A_{i0} = \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} [C_{ij} \sin(\delta_{i0} - \delta_{j0}) + D_{ij} \cos(\delta_{i0} - \delta_{j0})]$$

$$A_{ij} = C_{ij} \cos(\delta_{i0} - \delta_{j0}) - D_{ij} \sin(\delta_{i0} - \delta_{j0})$$

由于 $\Delta\delta_{iS}$ 难以计算,因此有必要作适当假设。不稳定平衡点法(UEP)暂态稳定分析中为便于计算暂态能量常作“线性路径”假定^[4]。在求解故障切除时刻的系统暂态能量时,假定从故障切除时刻到稳定平衡点之间的积分路径上任一运行点之转子角为

$$\delta = \delta_s + \alpha(\delta_c - \delta_s) \quad \alpha \in [0, 1]$$

其中 δ_c 为故障切除时刻发电机转子角, δ_s 为稳定平衡点发电机转子角;在求解临界能量时同样有该假定。这样的假定将给稳定计算带来误差。在此讨论的群内摆动很小, $\Delta\delta_{iS}$ 比 δ 小得多,对 $\Delta\delta_{iS}$ 作线性假定对稳定分析造成的误差必然比 UEP 法小得多。因此,可作线性假设:在 S 群内任意 2 台发电机转子角度相对 S 的摆动是呈线性关系,也即

$$\Delta\delta_{jS} = K_{ij} \Delta\delta_{iS} \quad i, j \in S$$

其中 K_{ij} 为待定参数,则

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) = A_{i0} + A_{i1} \Delta\delta_{iS} \quad (6)$$

$$A_{i1} = \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} A_{ij} (1 - K_{ij})$$

为不失一般性,设另有 1 台发电机 $k \in S, k \neq i$ 。根据上述线性假定得:

$$\Delta\delta_{iS} = \delta_{ik} / (1 - K_{ik}) - (\delta_{i0} - \delta_{k0}) / (1 - K_{ik}) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可进一步简化为

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j \in S}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) = A'_{i0} + A'_{i1} \delta_{ik} \quad (8)$$

$$A'_{i0} = A_{i0} - A_{i1} (\delta_{i0} - \delta_{k0}) / (1 - K_{ik})$$

$$A'_{i1} = A_{i1} / (1 - K_{ik})$$

第 2 步:化简式(3)中第 3 项。

对于任意 $j \in A$, 通过类似第 1 步中的推导可化简式(3)中的第 3 项。

$$\sum_{\substack{j \neq i \\ j \in A}} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) = (B'_{i1} + B'_{i3} \delta_{ik} + B'_{i5} \delta_{jl}) \sin \delta_{ij} + (B'_{i2} + B'_{i4} \delta_{ik} + B'_{i6} \delta_{jl}) \cos \delta_{ij} \quad (9)$$

式中 发电机 k 在 S 群中选取, $k \in S, k \neq i$; 发电机 j , l 在 A 群中选取, $j, l \in A, j \neq l$ 。

在导出式(9)时运用了如下关系:

$$\delta_S - \delta_A = [\delta_{ij} - (\Delta\delta_{iS} - \Delta\delta_{iA})] - [(\delta_{i0} - \delta_{S0}) - (\delta_{j0} - \delta_{A0})]$$

$$\cos(\Delta\delta_{iS} - \Delta\delta_{iA}) \approx 1$$

$$\sin(\Delta\delta_{iS} - \Delta\delta_{iA}) \approx \Delta\delta_{iS} - \Delta\delta_{iA}$$

以及线性假设:

$$\Delta\delta_{jS} = K_{jl} \Delta\delta_{iS} \quad j, l \in A$$

并且在推导过程中略去了含有 $(\Delta\delta_{iS})^2, (\Delta\delta_{jA})^2, (\Delta\delta_{iS} \Delta\delta_{jA})$ 的二阶项。

第 3 步:建立新的系统模型。

将式(4)(9)及(3)代入式(1)后可得:

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} - A'_{i0} - A'_{i1} \delta_{ik} - (B'_{i1} + B'_{i3} \delta_{ik} + B'_{i5} \delta_{jl}) \sin \delta_{ij} - (B'_{i2} + B'_{i4} \delta_{ik} + B'_{i6} \delta_{jl}) \cos \delta_{ij} - D_i (\omega_i - 1) \quad (10)$$

由于 $P_{mi}, E_i^2 G_{ii}, D_i$ 为常数,可并入 A'_{i0} 中,并变换系数的正负号,即可得考虑群内运动和阻尼的系统模型为

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = A''_{i0} + A''_{i1} \delta_{ik} + (B''_{i1} + B''_{i3} \delta_{ik} + B''_{i5} \delta_{jl}) \sin \delta_{ij} + (B''_{i2} + B''_{i4} \delta_{ik} + B''_{i6} \delta_{jl}) \cos \delta_{ij} + D_i \omega_i \quad (11)$$

发电机 k 在 S 群中任取, $k \in S, k \neq i$, 发电机 j, l 在 A 群中任取, $j, l \in A, j \neq l$ 。对于机组 $j \in A$ 群同样有类似的式子:

$$M_j \frac{d\omega_j}{dt} = A''_{j0} + A''_{j1} \delta_{jl} + (B''_{j1} + B''_{j3} \delta_{ik} + B''_{j5} \delta_{jl}) \sin \delta_{ij} + (B''_{j2} + B''_{j4} \delta_{ik} + B''_{j6} \delta_{jl}) \cos \delta_{ij} + D_j \omega_j \quad (12)$$

由式(11)(12)可以看出,一台发电机的转子运动特性用 S 群和 A 群内很少几台发电机的转子角和转速就可以描述清楚。由于模型简单而且是线性的,就可使用以往稳定分析中常采用的系统辨识法^[1,5]辨识模型参数。同时,由于考虑了群内运动和阻尼,系统模型更为准确,用该模型进行稳定性预测,其准确性也可提高。

特别值得指出的是:待定参数 K_{ik}, K_{jl} 实际上是时变参数。对于它的取值非常关键,若 K_{ik}, K_{jl} 取值不当,一系列隐含有 K_{ik}, K_{jl} 的系统模型参数 $A''_{i0}, A''_{i1}, B''_{i0}, \dots, B''_{i6}$ 等也将不准确。模型不准确将造成稳定预测有极大误差,甚至错误。

对于判别第一摇摆稳定性,即故障后 1~2 s 的短过程稳定分析,上述参数变化缓慢,可近似看成常数。在下一节当中,将通过系统辨识的方法,利用短时时域仿真的数据作为辨识的输入,辨识这些模型参数。为提高模型参数的准确性,可适当加长观察窗口,增加时域仿真时间。仿真结果证明系统辨识的方法能准确、有效地辨识出系统模型参数。

2 基于系统辨识求取模型参数

由于在电力系统中,机械惯性时间常数、阻尼系数很难获得,并且系统模型参数也是待定参数。采用系统辨识法可解决上述参数难以求取的问题。对于判别第一摇摆稳定性,式(11)(12)中的系统模型参数 $A''_{i0}, A''_{i1}, B''_{i0}, \dots, B''_{i6}$ 等可以近似认为是常数,这种假设对于系统辨识而言是非常有意义的。将式(11)两边同时除以 M_i 可得:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \alpha_{i0} + \alpha_{i1} \delta_{ik} + (\beta_{i1} + \beta_{i3} \delta_{ik} + \beta_{i5} \delta_{jl}) \sin \delta_{ij} + (\beta_{i2} + \beta_{i4} \delta_{ik} + \beta_{i6} \delta_{jl}) \cos \delta_{ij} + D_i' \omega_i \quad (13)$$

对式(13)进行参数识别,根据暂态电力系统稳定预测的特点,采用渐消记忆辨识法^[1,5]比较合适,它避免了数据饱和现象的发生。令系统辨识输入为

$$u_{i0} = 1, u_{i1} = \delta_{ik}, u_{i2} = \sin \delta_{ij}, u_{i3} = \delta_{ik} \sin \delta_{ij}, u_{i4} = \delta_{jl} \sin \delta_{ij}, u_{i5} = \cos \delta_{ij}, u_{i6} = \delta_{ik} \cos \delta_{ij}, u_{i7} = \delta_{jl} \cos \delta_{ij}, u_{i8} = \omega_i$$

再令输出为

$$y_i = d\omega_i / dt$$

则式(13)可写为

$$y_i = \alpha_{i0} u_{i0} + \alpha_{i2} u_{i1} + \beta_{i1} u_{i2} + \beta_{i3} u_{i3} + \beta_{i5} u_{i4} + \beta_{i2} u_{i5} + \beta_{i4} u_{i6} + \beta_{i6} u_{i7} + D'_i u_{i8}$$

将上式写成系统辨识的统一格式:

$$y^T(k) = \varphi_k^T \theta + \xi(k) \tag{14}$$

式中 $\varphi(k), y(k)$ 分别为第 k 个输入、输出采样; θ 为辨识参数向量。

$$y^T(k) = \left[\frac{d\omega_1}{dt^2}, \frac{d\omega_2}{dt^2}, \dots, \frac{d\omega_n}{dt^2} \right]$$

$$\varphi_k^T(k) = [u_{i0} I_n, u_{i1} I_n, \dots, u_{i7} I_n, u_{i8} I_n]$$

$$\theta^T(k) = [\alpha_{i0}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \beta_{i3}, \beta_{i5}, \beta_{i2}, \beta_{i4}, \beta_{i6}, D'_i]^T$$

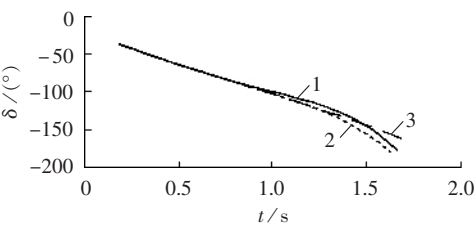
式中 I_n 为单位阵; n 为系统内发电机数。

对式(14)应用渐消记忆的最小二乘辨识算法,可以得到辨识参数。再利用所得的系统模型就可以采用时域仿真等方法预测第一摇摆的暂态稳定性。 k 个输入、输出采样点数据通过短时时域仿真获得。为了使系统模型参数更为精确,可适当延长观察窗口,增加采样数据点。

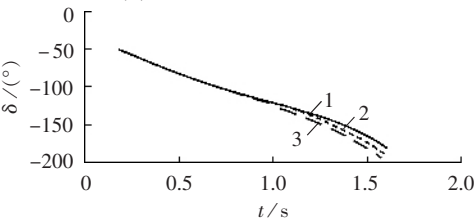
3 仿真分析

采用文献[6]中的 10 机 39 节点新英格兰系统作为算例,系统结构图、发电机、负荷以及线路的有关数据见文献[6]。采用电科院 PSASP 电力系统分析综合程序进行仿真,所有发电机均采用 E' 恒定经典模型。各发电机的阻尼系数 D 均设为 0.01 s(在系统辨识时把阻尼当成未知参数加以辨识), D 值设置参考文献[7,8]。预测时观察故障后 0.3 s 内的仿真数据,作为系统模型辨识的输入。

故障为 21-22 线路 (线路编号 27) 1% 处三相接地短路,0.18 s 故障切除。PSASP 仿真结果显示故障后系统失稳。图 1 给出了部分发电机第一摇摆周期内相对 39 节点的功角曲线,1 为 PSASP 仿真曲线;2 为基于本文模型的预测曲线;3 为采用文献[1]模型的预测曲线。



(a) 发电机 32 相对 39 的摇摆曲线



(b) 发电机 38 相对 39 的摇摆曲线

图 1 故障时相对功角曲线

Fig.1 Relative angle curves under fault condition

表 1 给出了失稳瞬间 t_u ,各机相对 39 节点发电机的相对功角预测值,以及最大绝对误差,并与 PSASP 仿真数据对照。

表 1 故障时相对功角预测结果

Tab.1 Predictive relative angles under fault condition

相对功角	t_u/s	$\delta/(^\circ)$		最大绝对误差 $\Delta/(^\circ)$	预测正确性
		PSASP仿真数据	本文模型预测值		
39-30	1.82	-179.230 00	-199.05	19.820 0	正确
39-31	1.70	-180.541 34	-211.46	30.918 7	正确
39-32	1.67	-179.633 97	-188.24	8.606 0	正确
39-33	1.51	-180.173 54	-145.59	34.583 5	正确*
39-34	1.36	-180.939 27	-175.09	5.849 3	正确
39-35	1.11	-180.194 85	-188.80	8.605 2	正确
39-36	1.03	-180.654 94	-182.78	2.125 1	正确
39-37	1.73	-180.756 61	-194.84	14.083 4	正确
39-38	1.60	-180.485 70	-190.60	10.114 3	正确

注: * 39-33 相对功角在 1.741 5 s 时预测值达到 -183.63° 。

从图 1 可以看到采用本文提出的系统模型进行稳定预测比文献[1]更为准确。对比 PSASP 的数据,可知本文方法是准确、有效的。从仿真时间上看,采用 PSASP(积分步长设定 0.001 s)得出不稳结论花费计算机计算时间(笔者使用的为奔腾 II 处理器,128 M 内存的计算机)约 4 s,采用本文方法(积分采用不定步长,计算精度设为 1×10^{-16})得出不稳结论花费计算机计算时间 1.572 0 s。

4 结论

本文基于二群失稳模式提出了一种新的系统模型。在计及群内发电机相对运动的情况下获取系统模型参数,并在模型中考虑了阻尼的影响。方法中采用了系统辨识法获取系统模型参数,无需预先知道阻尼系数和机械惯性时间常数。只需观察故障后短时间内各机组的功角和转速就可进行预测,需要的数据很少。系统模型形式简单,物理意义清晰,因而计算速度很快。利用该模型可大大提高在线稳定预测准确性。在预测中,对于可以确认为稳定或是不稳定的故障,则可提前中止仿真计算,从而大大节省在线动态安全分析时间。本文以 10 机 39 节点新英格兰系统作为算例进行了仿真,结果显示该模型是准确的,在在线稳定预测等领域具有广阔应用前景。

参考文献:

[1] 周良松,彭波,夏成军,等. 利用系统辨识进行超前预测中止的在线快速仿真法[J]. 继电器,2000,28(11):9-12. ZHOU Liang-song, PENG Bo, XIA Cheng-jun, et al. Fast online simulation method based on system identification [J]. Relay, 2000, 28(11): 9-12.

[2] 匡文凯,吴政球,刘堂伟. 暂态稳定分析中的发电机电磁功率预测研究[J]. 湖南电力,2004,24(3):9-11. KUANG Wen-kai, WU Zheng-qiu, LIU Tang-wei. Study of the electric power prediction of generation unit in transient stability analysis [J]. Hunan Electric Power, 2004, 24(3): 9-11.

- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [4] 傅书逊, 倪以信, 薛禹胜. 直接法稳定分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [5] 韩光文. 系统辨识[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1988.
- [6] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher, 1989.
- [7] 倪腊琴, 鞠平, 李训铭, 等. 电力系统动态等值的在线辨识研究(II)——辨识方法及仿真检验[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 20–22.
- NI La-qin, JU Ping, LI Xun-ming, *et al.* Online identification of power system dynamic equivalent. Part two: Parameter estimation & simulation [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(10): 20–22.
- [8] 赵书强, 常鲜戎, 潘云江, 等. 多机系统机电模式特征根的

快速估算[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(3): 11–15.

ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong, PAN Yun-jiang, *et al.* A fast estimation method of eigenvalue for electro-mechanical mode of multi-machines power system [J]. **Journal of North China Electric Power University**, 1999, 26(3): 11–15.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

张力晨(1979–), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定控制与实时通信(E-mail: lichenzhang79@tom.com);

周良松(1967–), 男, 江西上饶人, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统安全稳定控制装置。

Research on system model considering in-cluster motion and damping

ZHANG Li-chen, ZHOU Liang-song, DAI Shi-yong, WU Yong

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new system model is presented based on two-cluster instability mode, which considers the relative motion in one cluster and the factor of damping. On the assumption that the rotator angle swing of any two generators in the same cluster is linear, the electromagnetic power expression in the model is simplified. It takes short-period time-domain simulative data as inputs, and system identification theory is applied in computing model parameters. The damping coefficient and inertia time constant of generator may be unknown beforehand. Simulation on New England 39-bus system illustrates the veracity of the proposed method. The model can be used in on-line stability prediction.

Key words: two cluster instability mode; system identification; transient stability prediction