

转速因素影响暂态稳定机理分析

张恒旭

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 发电机模型是影响暂态稳定仿真结果的重要因素之一,其转矩方程中转速变化的简化处理在某些情况下会对暂态稳定计算产生较大影响。通过分析比较指出扩展等面积准则 (EEAC) 在此问题研究中的独特优势;指出了转速因素影响暂态稳定的两种表现途径;提出依据等值两群转速与同步转速的关系将受扰系统进行分类的方法,清晰地揭示了转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内在机理。算例仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: 暂态稳定; 量化分析; 扩展等面积准则; 发电机模型

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)20-0009-04

0 引言

电力系统数字仿真已成为规划、运行与控制的主要工具,相应的决策无不以数字仿真为依据。大区域互联、远距离大容量输电以及电力工业体制的转变使系统运行条件越来越接近稳定极限,从而对电力系统数字仿真的精确度提出了更高的要求^[1,2]。

1996年美国西部电网事故分析和东北-华北联网计算都表明,发电机和负荷模型对稳定计算结果影响甚大^[3,4]。就某种程度而言,模型的选择已成为制约电网计算分析乃至电网运行发展的关键性问题。文献[5]通过大量算例仿真研究了发电机模型中转速的简化处理对暂态稳定计算的影响,指出转速因素某些情况下会对计算结果带来不可忽略的影响,并给出暂稳计算中选取转速简化处理方式的建议。

在文献[5]基础上,基于 EEAC 理论,从等值两

群转速与同步转速的关系入手,本文进一步揭示了转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内部机理。实例仿真验证了理论分析的正确性。

1 研究工具

电力系统暂态功角稳定性研究的是由代数微分方程组描述系统的运动有界性问题^[1],常用的分析方法有数值积分法、暂态能量函数 (TEF) 法和 EEAC。

数值积分法通过全程数值积分来研究系统稳定性,可以处理任何非线性因素和复杂场景;但其稳定判断紧密依赖于专家经验,且只能给出稳定与否的定性判断,无法给出稳定的充要条件,也无法量度受扰轨迹的稳定程度。由于物理概念和内部机理都被掩盖在数值运算中,故难以用来细致地分析模型或参数对稳定性的影响。

不同的 TEF 法都建立在各自的假设下,当这些假设与实际情况不符时,可能造成非常大的误差。

Adaptive power quality signals compression and denoising based on DWT

LI Peng, YANG Hong-geng

(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper introduces a new data compression and denoising technique for short time voltage change signal via discrete wavelet transform (DWT) and information-theory based approximate minimum description length criterion (AMDL). This algorithm has data-adapted capability for different noise levels and signal sorts. Without any parameter setting (such as thresholding) or subjective judgments, it can select the "best" number of wavelet-retained coefficients and "best" wavelet basis according to dynamic signals. Results of computation prove that the MDL criterion can give the best compromise between the fidelity of the signal and the efficiency of signal compression.

Key words: data compression; denoise; MDL; power quality

TEF 不是严格意义上的李雅普诺夫函数,因此其既不是稳定性判断的必要条件,也无法保证充分性^[6]。就目前而言,基于李雅普诺夫函数的直接法以及 TEF 法试图避免全程数值积分而寻求暂态稳定充要条件的探索还面临着非常大的困难。

由于直接法无法提供稳定性的严格充要条件,一系列的假设左右着稳定性判断的准确性,从而无法用其来严格地反映模型或参数对稳定性的细微影响。

系统受扰轨迹包含了系统的稳定信息,在无法得到电力系统数学模型解析解的情况下,系统受扰轨迹也是严格判断系统稳定性不可缺少的依据。

EEAC 基于全程数值积分,从而可以考虑任何非线性、非自治、复杂模型和场景;能够提供滑步的充要条件和量化结果。电力系统实际不允许出现滑步运行,如果系统发生滑步,工程上就认为失去了稳定^[7]。EEAC 清晰地反映了暂态稳定的机理,发现并解释了电力系统的许多复杂现象。其信息提取于系统实际轨迹,从而可以严格反映系统模型和参数的微小变化;其分群后两群等值思想,可以很好的揭示模型、参数或控制措施影响稳定性的内在机理。本文中采用 EEAC 作为研究转速因素影响暂态稳定性的理论工具。

2 转速因素影响暂态稳定性的途径

设 $X = (\theta^T, \omega^T)^T$ 为电力系统中转子运动变量构成的向量;其他非运动状态变量则用向量 Z 表示; Y 表示所有的代数变量。考虑任意复杂因素的电力系统动态特性可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i & \forall i \\ M_i \dot{\omega}_i = T_{mi}(\theta, \omega, Z, Y, t) \\ \dot{Z}_k = f_{zk}(\theta, \omega, Z, Y, t) & \forall k \\ Y = g(\theta, \omega, Z, Y, t) \end{cases} \quad (1)$$

按实际的复杂模型和扰动场景对多机运动方程进行数字仿真后,将得到的 $Z(t)$ 和 $Y(t)$ 以离散数值函数的形式代入式(1),这样,复杂模型因素、时变扰动以及由网络方程构成的代数方程约束对暂态稳定性的全部影响都反映在运动方程中:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i & \forall i \\ M_i \dot{\omega}_i = T_{mi}(\theta, \omega, Z(t), Y(t), t) \end{cases} \quad (2)$$

包括转速因素在内的任何复杂模型因素和参数因素都通过改变各机的机械力矩 $T_{mi}(t) \forall i$ 或(和)电磁力矩 $T_{ei}(t) \forall i$ 来影响多机系统的受扰轨迹,从而影响系统的稳定性。

EEAC 将各映象摆次的稳定裕度定义在外力 - 位置 ($T - \theta$) 平面上,因此在讨论转速因素对暂态稳定影响时,也应该利用 $T - \theta$ 平面,而不可能直接在时间响应曲线上进行。在不同转速筒处理式下,等值单机无穷大 (OMIB) 映象的不平衡力矩轨迹会有所不同,进而改变各摆次的稳定裕度。在相同的分群方式下,不平衡力矩的差别可以认为由转速因素引入的时变因素导致。

转速因素通过不平衡力矩及其沿 θ 轴的积分区间来影响 $T - \theta$ 平面上的加速和减速面积,从而影响轨迹稳定裕度,将这两种途径分别称为 T 轴效应和 θ 轴效应。 T 轴效应会引起 θ 轴间接效应;另外转速因素会直接改变每一摆次中映象角行程,成为 θ 轴直接效应。

T 轴效应与 θ 轴效应相互关联,是转速因素影响暂态稳定性的直观体现。其中, θ 轴效应对暂态稳定裕度的影响起主导作用。

3 转矩方程中转速因素影响暂态稳定性机理分析

数值积分得到系统的实际受扰轨迹后,在临界分群方式下,通过互补簇惯量中心 (CCCOI) 变换,得到互相独立的两自由度空间上的轨迹。

转矩方程不考虑转速变化和考虑转速变化时,得到的两群等值映象可分别表示为式(3)、式(4):

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_s = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} \\ \ddot{\theta}_a = \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_s = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} \\ \ddot{\theta}_a = \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} \end{cases} \quad (4)$$

对其分别进行相对运动变换,得到两种情况下等值转矩方程,分别如式(5)、式(6):

$$\ddot{\theta} = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} \quad (5)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} \quad (6)$$

其中, $\theta = \theta_s - \theta_a$, $\omega_s = \omega_a = \omega$, P_{ms} 、 P_{es} 、 P_{ma} 、 P_{ea} 均为积分求得的时间序列。

考虑转矩方程中转速变化因素会改变各个时间序列点上机械功率、电磁功率,从而改变各时刻点的不平衡力矩,继而影响系统稳定性。

EEAC 将稳定裕度定义在各个摆次上,轨迹在特定分群下的稳定裕度为该分群下主导摆次的稳定裕度;主导摆次的运动状态决定了系统的稳定属性。从而可从主导摆次入手研究转速因素对暂态稳定性的影响。

为便于理论分析,假设受扰系统主导摆次: 为正向摆动; 领先群(S 群)转速和余下群(A 群)转速都开始于同步转速,结束于同步转速: S 群、A 群转速始终大于 1 或小于 1。根据主导摆次中 S 群和 A 群转速与同步转速的关系将受扰系统归为 5 类,来分析转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内在机理。

$$1) \quad s > 1, \quad a < 1$$

扰动对 S 群产生正向加速作用,而对 A 群电磁功率的影响不大,或 A 群转动惯量足够大,从而 S 群转子角正向摆动,A 群转子角基本保持不变。

主导摆次中 s 始终大于 1,考虑转速变化等效于减小领先群等效机组的不平衡力矩,其影响有缩小两群转子角度间隙的趋势,对暂态稳定有利。

$$2) \quad s < 1, \quad a < 1$$

S 群转速基本保持同步转速不变,A 群转速减小。转速 a 始终小于 1,考虑转速变化等效于增大 A 群等效机组的不平衡力矩,其影响有增大两群转子角度间隙的趋势,对暂态稳定不利。

$$3) \quad s > a > 1$$

S 群和 A 群都正向摆动,两者转速均大于同步转速,且 $s > a$ 。考虑转速变化等效于同时减小 S 群、A 群不平衡力矩;由于 $s > a$,故转速因素对 S 群的影响程度要大于对 A 群的影响程度。其综合影响有缩小两群转子角度间隙的趋势,对暂态稳定有利。

$$4) \quad a < s < 1$$

S 群和 A 群都反向摆动,S 群转速、A 群转速均小于同步转速,且 $a < s$ 。考虑转速变化等效于增大 S 群、A 群不平衡力矩;由于 $a < s$,故转速因素对 S 群的影响程度要小于对 A 群的影响程度。其综合影响有增大两群转子角间隙的趋势,对暂态稳定不利。

$$5) \quad s > 1, \quad a < 1$$

S 群正向摆动,A 群反向摆动, $s > 1, a < 1$ 。考虑转速变化等效于减小 S 群不平衡力矩且增大 A

群不平衡力矩,其对两群转子角有同方向的影响趋势,但综合影响结果取决于对两者的相对影响程度: 如果 A 群转速接近于 1,而 S 群转速相对而言远大于 1,则近似于类型 1),对稳定有利;如果 S 群转速接近于 1,而 A 群转速相对而言远小于 1,则近似于类型 2),对稳定不利。实际算例中,此类情况居多。

上面近似分析了转矩方程中转速因素影响不同运动形态受扰系统暂态稳定性的规律,而实际系统非常复杂: 正向摆动中有利于稳定的运动类型,在相继的反向摆动中转速因素往往会产生不利于稳定的影响,例如类型 1) 在后续反向摆动中会转换为类型 2); 转速因素可能会改变受扰系统的主导分群模式和主导摆次; 实际系统中两群动态非常复杂,主导摆次中 s 不一定一直大于 1 或一直小于 1(a 亦然); 在多摆失稳模式中,转速因素还会通过多摆动态起作用。所有这些复杂因素导致转矩方程中转速因素对暂态稳定性的实际影响非常复杂。

4 算例仿真

1) OMB 系统

发电机取次暂态模型,变压器高压侧三相对地短路,0.150 s 故障切除。不考虑转速影响时主导摆次(首摆)两群转速曲线如图 1(a) 所示;考虑转速变化影响产生的 T 轴、 δ 轴效应见图 1(b),图中 0 和 2 分别表示不考虑转速变化和考虑转速变化时的系统仿真结果。

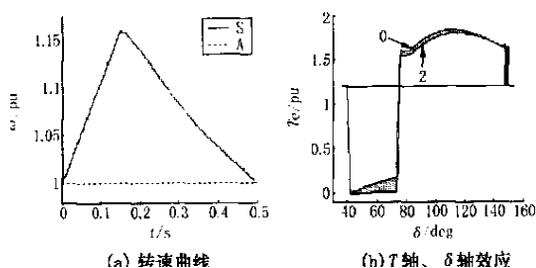


图 1 OMB 系统仿真结果

Fig. 1 Simulation results of OMB system

系统在该故障作用下,主导摆次运动特征属典型的类型 1): 转速因素缩小了不平衡力矩,产生了明显的 T 轴效应;在每个积分点上不平衡力矩的差异,最终导致两种情况下转子角行程不同,产生负的 δ 轴效应,有利于摆次稳定;但产生的 δ 轴效应不是特别大。两种情况下求得临界切除时间分别为 0.155 s 和 0.156 s。

2) IEEE14 节点系统

发电机取二阶模型,线路首端发生 0.365 s 三相短路,故障后线路切除。不考虑转速影响得到的主导摆次(第 5 摆)两群转速曲线如图 2(a)所示,转速因素产生的 T 轴、 δ 轴效应见图 2(b)。

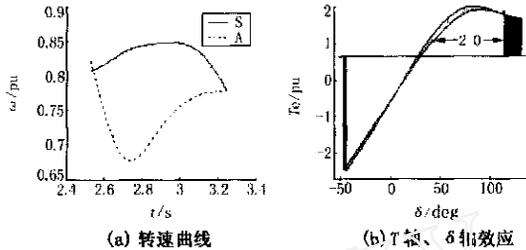


图 2 IEEE-14 系统仿真结果

Fig. 2 Simulation results of IEEE 14 system

主导摆次为第 5 摆, S 群和 A 群转速均小于 1, 运动特征类似于类型(4)。图中可以看出:两种情况下摆动起始角略有不同,其对应的 δ 轴效应可以认为是由转速因素通过多摆动态导致;考虑转速变化时,加速面积增大,而不平衡力矩减小,故使得转子角行程增加,产生明显正的 δ 轴效应,不利于摆次稳定。两种情况下求得临界切除时间分别为 0.364 s 和 0.366 s。

5 结论

发电机建模中对转速的简化处理在某些情况下会对暂态稳定计算产生较大影响,且其影响程度和规律非常复杂。基于 EEAC 两群等值理论,依据等值两群转速与同步转速间的关系对受扰系统进行分类,清晰地揭示了转矩方程中转速因素影响暂态稳定性的内部机理;实例仿真验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] 薛禹胜(XUE Yr-sheng). 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析(Quantitative

Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability) [M]. 南京:江苏科学技术出版社(Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press), 1999.

- [2] 贺仁睦(HE Ren-mu). 电力系统动态仿真准确度的探究(Research into Veracity of Power System Dynamic Simulation) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 24(12): 1-4.
- [3] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [4] 于浩, 刘瑞叶, 陈学允, 等(YU Hao, LIU Rui-ye, CHEN Xue-yun, et al). 发电机实用模型的选取对稳定计算的影响(Influence on Stability Calculation Using Different Practical Model of Generator) [J]. 中国电力(Electric Power), 1998, 31(10): 10-13.
- [5] 张恒旭, 薛禹胜(ZHANG Heng-xu, XUE Yr-sheng). 转速的简化处理对暂态稳定计算的影响(The Influence of Simplifications of Speed Variations on Transient Stability Simulation) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(17): 8-10.
- [6] 薛禹胜(XUE Yr-sheng). EEAC 与直接法的机理比较(I ~ IV) (A Critical Comparison of Various Methods of Transient Stability Assessment, I ~ IV) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(11)-25(14).
- [7] 薛禹胜(XUE Yr-sheng). 滑步与发散, 电力系统与一般动力系统(Pole-slip vs Divergence, Motion Systems vs General Dynamic Systems) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(7): 17-21.

收稿日期: 2004-02-19; 修回日期: 2004-05-24

作者简介:

张恒旭(1975-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统数字仿真、电力系统稳定分析与控制。E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn

Mechanism analysis of speed variations influence on transient stability simulation

ZHANG Heng-xu

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Generator model is an important aspect of affecting transient stability assessment, and the simplifications of speed variations in its torque equation may cause great influences on transient stability simulation. The outstanding advantages of extended equal area criterion (EEAC) in the studies are emphasized with analysis and comparison. Two different modes of the influences are also pointed out. By classifying post-fault systems into five groups according to the relationship of synchronous speed and equivalent two machine speed, a method is presented to analyse the mechanism of the influence. Numerical simulation results verifies the correctness and the effectiveness of this proposed method.

Key words: transient stability; quantitative analysis; extended equal-area criterion (EEAC); generator model