

基于正规形变换考虑发电机励磁控制的 电力系统暂态稳定分析

左江林, 李啸聪, 崔洪亮

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 当考虑发电机的励磁控制时, 难以确定系统的稳定域。根据非线性动力系统理论, 非线性系统的稳定域边界是由稳定边界上的不稳定平衡点处的稳定流形的并集构成。当系统受到大扰动时, 主导不稳定平衡点(CUEP)上的稳定流形就是电力系统的稳定边界。通过正规形变换, 将非线性的系统映射到线性系统, 根据线性空间的稳定子空间来确定原始系统的稳定流形, 写出稳定边界的表达式。当持续故障轨线和系统的稳定边界相交时, 就求得故障临界切除时间。实际仿真结果表明该方法是有有效的, 且略有保守。

关键词: 电力系统; 励磁控制; 正规形; 暂态稳定

Power system transient stability research for excitation control based on normal form theory

ZUO Jiang-lin, LI Xiao-cong, CUI Hong-liang

(Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The transient stability region is difficult to be determined considering excitation control of a generator. According to the theory of nonlinear dynamic system, the stable boundary is the union of the stable manifolds of the unstable equilibrium points on the stable boundary. To transform the nonlinear power system into a linear system on Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP) based on normal form theory, according to the stable subspace of the linear system, this paper can get the stable manifolds of the nonlinear power system. So, a new stable region and its detailed expression are obtained. When the fault track gets across the stable region boundary, the time is the critical clearance time. The stimulated results prove this method to be valid.

This paper is supported by National Natural Science Foundation of Guangxi Province(No.0728027).

Key words: power system; excitation control; normal form; transient stability

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0021-04

0 引言

由非线性动力学系统理论可知, 正规形^[1]变换是一种非线性变换, 这是从数学空间结构上来分析非线性系统的稳定性, 基本思想是将原始非线性系统在不稳定平衡点处经过线性和非线性的变换映射到线性的解耦的系统中, 这样就可以在线性系统中来讨论原系统的稳定性。非线性系统的稳定域边界是由稳定边界上的不稳定平衡点处的稳定流形的并集构成^[2~4], 对电力系统而言, 当受到扰动时, 其CUEP处的稳定流形, 就是电力系统的稳定边界, 该边界映射到线性系统空间中是一超平面 $z_i = 0$, 当故障轨线越过超平面时就是临界切除时间。

当考虑发电机的励磁控制时, 本文通过正规形

变换, 将非线性的电力系统映射到线性系统, 再根据线性空间的稳定子空间来确定原始系统的稳定流形, 从而推导出稳定边界, 并写出稳定边界的表达式。当持续故障轨线和系统的稳定边界相交时, 就求得故障临界切除时间。

1 简单电力系统模型

对于考虑发电机励磁控制的单机无穷大电力系统如图1所示, 设其中一条输电线路中的始端发生三相短路故障。系统可用3阶微分方程表示:

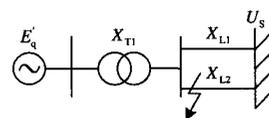


图1 单机-无穷大系统

Fig. 1 Single-machine infinite-bus power system

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J}(P_m - P_e - D(\omega - 1)) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(-E'_q + u_f) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中: } P_e = \frac{E'_q U_s \sin \delta}{X'_{d\Sigma}}$$

$$E'_q = \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q - \frac{U_s (X_d - X'_d)}{X'_{d\Sigma}} \cos \delta$$

δ 是发电机转子角度, ω_0 是额定转子角频率, ω 是转子角频率, E'_q 是发电机暂态电势, P_m 是输入机械功率, D 是阻尼系数, T_J 是发电机的惯性时间常数, T'_{d0} 是励磁绕组时间常数, X_d 是直轴电抗, X'_d 是直轴暂态电抗, $X'_{d\Sigma}$ 是系统等值直轴暂态电抗, u_f 是励磁控制。

2 正规形变换

假设非线性状态方程为

$$\dot{X} = F(X) \quad (2)$$

X 是 n 维状态向量, 如单机无穷大系统微分方程中的转子角度、角频率和发电机暂态电势 (即 δ 、 ω 、 E'_q), 将原点移到不稳定平衡点处, 并把式 (2) 展开成泰勒级数, 并忽略二阶以上的项。第 i 维表示为

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \frac{1}{2} x^T B_i x \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

其中: A_i 为雅克比矩阵 A 的第 i 行, B_i 是系统海森矩阵 B 的第 i 个子矩阵。

首先进行线性变换, 令

$$Y = VX \quad (4)$$

若取 $V = U^{-1}$, 则有 $X = UY$ 。其中 U 由 $AU = UJ$ 求出, J 是 A 的特征根 λ_i 构成的约当对角矩阵, 即 $J = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ 。将式 (4) 代入式

(3) 后得到在 Y 空间的系统为

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + Y^T C_i Y \quad (5)$$

$$\text{其中二阶变换矩阵 } C_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n V_{(i,j)} U^T B_j U。$$

再对式 (5) 作非线性变换, 令

$$z_i = y_i - Y^T D_i Y \quad (6)$$

其中: $D_{i(j,k)} = C_{i(j,k)} / (\lambda_j + \lambda_k - \lambda_i)$, $D_{i(j,k)}$ 为海森矩阵 D 的第 i 个子矩阵的第 j 行第 k 列的元素。将式 (6) 代入式 (5) 得到线性空间 Z 的表达式

$$\dot{Z} = JZ \quad (7)$$

3 稳定边界的确定

由流形理论可知, 原非线性系统 X 空间的局部不变稳定流形映射到线性系统 Z 空间是不变稳定子空间。在 Z 空间中, 其状态矩阵 J 是个对角矩阵。电力系统的不稳定平衡点常常只有一个, 是 I 型不稳定平衡点, 也就是说雅克比矩阵 A 只有一个特征根的实部是大于零的, 即 J 只有一个对角元素的实部为正, 若 A 的特征根全为实数, 则 J 为一个纯对角阵, 令 $\lambda_1 > 0$, 则特征根 λ_1 对应的特征向量为 $(1, 0, \dots, 0)^T$, 由该向量张成式 (7) 的不稳定子空间, 解析表达式为

$$z_i = 0 \quad i=2, \dots, n \quad (8)$$

那么, 式 (7) 的稳定子空间就由其余 $n-1$ 个特征根对应的特征向量 $(1, 0, \dots, 0)^T, \dots, (0, \dots, 1, 0, \dots, 0)^T, \dots, (0, \dots, 0, 1)^T$ 张成, 解析表达式为

$$z_1 = 0 \quad (9)$$

可知, 稳定子空间在 Z 空间中就是超平面 $z_1 = 0$ 。

因此, 原始系统式 (2) 在不稳定平衡点处的局部稳定流形经正规形变换后, 映射到 Z 空间的超平面 $z_1 = 0$ 上, 该超平面与原始系统的稳定边界在不稳定平衡点处的局部曲面是对应的。

4 临界切除时间的确定

原始系统的持续故障轨线经式 (4) 的线性变换到 Y 空间, 再经式 (6) 的非线性变换到 Z 空间, 此时的持续故障轨线表示为

$$Z = (z_1(t), \dots, z_n(t)) \quad (10)$$

在 Z 空间的持续故障轨线与稳定边界 $z_1 = 0$ 相交, 交点就是 Z 空间中持续故障轨线在稳定边界的临界切除时间点。

5 算例

以文献[5]中例 13.2 为例, 检查某电厂的暂态稳定性, 包括 4 台 555 MVA, 24 kV, 60 Hz 的机组, 通过两回线路向无穷大系统供电, 系统模型用一个等值的单机来表示, 如图 1 所示, 其方程如式 (1)。相关参数及以 2 220 MVA, 24 kV 为基准的初始运行条件标么值如下:

$$X_d = 1.81 \quad X'_d = 0.30 \quad X_T = 0.15 \quad D = 0$$

$$X_{11} = 0.5 \quad X_{12} = 0.93 \quad T'_{d0} = 8.0 \text{ s} \quad T_J = 7.0 \text{ s}$$

$$P = 0.9 \quad Q = 0.436 \quad U_S = 0.90081 \angle 0$$

设回路 2 始端发生三相短路故障后将该线路切除, 将式 (1) 在不稳定平衡点处展开成式 (3) 的形式, 式中 $X = (\delta, \omega, E'_q)$ 。

当 u_f 取不同的定值时就有不同的暂态稳定域。

设 $u_f = 2.598$, 求得雅各比矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 376.9911 & 0 \\ 0.1414 & 0 & -0.0911 \\ -0.1203 & 0 & -0.3237 \end{pmatrix}$$

海森矩阵为 $B_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0.0643 & 0 & 0.0501 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0501 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B_3 = \begin{pmatrix} 0.0661 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

求得式 (4) 中的线性变换矩阵为

$$V = \begin{pmatrix} 0.9997 & 0.0195 & -0.0157 \\ 0.9997 & -0.0192 & 0.0173 \\ 0.5427 & -0.0006 & 0.8399 \end{pmatrix}$$

由 $C_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n V_{i(j)} U^T B_j U$ 得

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1.5830 & 1.6253 & 1.9453 \\ 1.6253 & 1.6676 & 1.9682 \\ 1.9453 & 1.9682 & 1.6456 \end{pmatrix}$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} -1.6605 & -1.7037 & -2.0109 \\ -1.7037 & -1.7468 & -2.0343 \\ -2.0109 & -2.0343 & -1.6939 \end{pmatrix}$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} 0.1426 & 0.1443 & 0.1206 \\ 0.1443 & 0.1459 & 0.1215 \\ 0.1206 & 0.1215 & 0.0889 \end{pmatrix}$$

由 $D_{i(j,k)} = C_{i(j,k)} / (\lambda_j + \lambda_k - \lambda_l)$ 得非线性变换矩阵为

$$D_1 = \begin{pmatrix} 0.2158 & -0.2239 & -4.8460 \\ -0.2239 & -0.0763 & -0.1312 \\ -4.8460 & -0.1312 & -0.2022 \end{pmatrix}$$

$$D_2 = \begin{pmatrix} -0.0757 & -0.2322 & -0.1417 \\ -0.2322 & 0.2406 & 5.0676 \\ -0.1417 & 5.0676 & -0.2624 \end{pmatrix}$$

$$D_3 = \begin{pmatrix} 0.0095 & 0.3010 & 0.0164 \\ 0.3010 & -0.0103 & -0.0167 \\ 0.0164 & -0.0167 & -0.2215 \end{pmatrix}$$

将故障轨线经式 (4) 的线性变换和式 (6) 的非线性变换映射到 Z 空间 (其中 $Z=(z_1, z_2, z_3)$)。当 $z_1(t)$ 过零或者变号时, 故障轨线就从稳定域过渡到了不稳定域, 此时就是临界切除时间。经计算, 求得临界切除时间 $t_{cr} = 0.098 \text{ s}$ 。

同样, u_f 等于 3.198 和 3.598 时, 也可以求得稳定边界和临界切除时间 (见表 1)。

表 1 受控系统故障临界切除时间

Tab.1 The critical clearing time/s

u_f	正规形变换法求得 t_{cr}	数值仿真法求得 t_{cr}
2.598	0.098	0.108
3.198	0.103	0.111
3.598	0.106	0.113

如表 1 可见, 当 u_f 增加时所求得的切除时间延长, 说明稳定域扩大了, 增加励磁有利于提高系统的暂态稳定性。同时由表 1 也可看出, 利用正规形变换所求得的临界切除时间和通过数值仿真得到的值很接近, 且略偏保守, 这种保守性对于保证生产实用的可靠性是有益的。

6 结束语

当考虑发电机的励磁控制时, 有时候寻找作为电力系统的稳定边界的能量函数是比较困难的。运用正规形变换的方法, 可将以往难以计算和确定的电力系统的稳定边界做 2 阶近似, 得出具体的稳定边界解析式, 从而可以较准确地计算出故障后电力系统的临界切除时间。因为在运用正规形变换时舍去了泰勒展开式的某阶以上的项, 所以在计算时存在截断误差, 这是需要进一步讨论的情况。但是已有的研究表明, 误差是在允许范围内。

本文只讨论了运用正规形理论研究单机无穷大系统的情况, 对于多机系统, 该方法也能给电力系统暂态稳定性的研究带来有益的启示。

参考文献

[1] 李伟固. 正归形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

LI Wei-gu. Normal form Theory and Application [M].

- Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 李颖晖, 张保会. 运用非线性系统理论确定电力系统暂态稳定域的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 24-27.
LI Ying-hui, ZHANG Bao-hui. Application to Determine the Transient Stability Boundary Using Nonlinear Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 24-27.
- [3] 李颖晖, 张保会. 运用非线性理论确定电力系统暂态稳定域的一种新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 41-44.
LI Ying-hui, ZHANG Bao-hui. A New Method to Determine the Transient Stability Boundary Using Nonlinear Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 41-44.
- [4] 李颖晖, 张保会, 李勤. 对电力系统暂态稳定边界的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 22(3): 72-77.
LI Ying-hui, ZHANG Bao-hui, LI Meng. Study on Electrical Power System Stability Boundary [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(3): 72-77.
- [5] 孙元章, 赵枚, 黎雄, 等. 考虑发电机励磁控制的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 1-6.
SUN Yuan-zhang, ZHAO Mei, LI Xiong, et al. Direct method of Transient Atability Analysis for Power Syetems with Excitation Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 1-6.
- [6] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 26(12): 37-42.
LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. A High Performance Nonlinear Excitantion Control for Generator Unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 26(12): 37-42.
- [7] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [8] Saha S, Fouad A A, Kliemann W H, et al. Stability Boundary Approximation of a Power Sustum Using the Real Normal Form of Vector Fields[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2).
- [9] Thapar J, Vittal V, Kliemann W. Application of the Normal form of Vector Fields to Predict Interarea Separation in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 844-850.
- [10] Ni Y, Vittal V, Kliemann W. System Separation Mechanism in Neighborhood of Releant Type-n UEP Using the Normal form of Vector Field[J]. IEEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 1998, 145(2): 139-144.
- [11] Jang Gilsoo, Chen Jin-boo, Kown Sae-Hyuk. Analysis of Nonlinear Oscillation in KEPCO Systems: Application of Normal forms of Vector Fields[A]. In: IEEE/PES Winter Meeting on Power System Dynamic Performance Committee Paper Session[C]. Singapore: 2000.

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-04-04

作者简介:

左江林(1973-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态稳定; E-mail: zjlin522@163.com

李啸骢(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统非线性控制、电力系统预测控制;

崔洪亮(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态稳定。

秦皇岛电力公司举行 2007 年反事故演习

为提高电网安全应急处理能力, 确保电网安全稳定运行, 6月16日, 秦皇岛电力公司举行 2007 年反事故演习。

此次演习旨在落实“全国安全生产月”活动的要求, 针对电网运行方式特点和薄弱环节, 演练各单位、各部门事故情况下的应急机制, 检验和演练各单位反事故预案和措施的适应性及预案处理程序的可行性, 检验各单位事故处理预案的衔接性和在事故处理过程中的协调配合, 同时检验参演人员事故处理时的应变能力, 从而达到锻炼队伍、提高运行人员、检修人员、后勤保证队伍应急处理水平的目的。

演习 8 时 25 分开始, 9 时 43 分结束。此次演习设置两处故障, 由此故障引起的连锁故障处理涉及主网 220 kV 变电站 2 座, 220 kV 输电线路 1 条, 110 kV 变电站 4 座, 涉及配网 26 条 10 kV 线路及广电中心、市公安局、居民等重要用户, 影响负荷 9.5 万 kW, 损失电量 5 万 kWh。

演习采用模拟实战方式, 参加演习的各单位人员沉着冷静, 反应迅速, 思路清晰, 判断准确, 处置得当, 措施有效, 很快将故障排除, 恢复正常供电。整个演习环环相扣, 紧张有序, 各有关单位密切配合, 演习取得圆满成功。

这次演习是 2007 年该公司各单位、各部门反事故应急预案制定后的第一次大型联合反事故演练, 真正检验了反事故预案的可行性。此次演习也为该公司即将举行的迎峰度夏反事故演习提供了借鉴。