

基于混和逻辑动态模型的混杂电力系统及其电压 稳定性分析方法研究

刘凯, 彭志炜, 黄忠, 孙晋超

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 为了满足大规模互联电力系统安全与经济协调优化的目标, 在分析了一些不同混杂电力系统模型基础上, 提出了混和逻辑动态(MLD mixed logic dynamic)电力系统模型, 并利用分叉与拓扑理论, 针对所设计混杂电力系统模型, 探讨了能否以及如何利用非线性的分析方法分析所设计系统的稳定性。文章提出了一种混杂逻辑动态电力系统模型稳定性的分叉理论分析方法, 并对此方法加以具体分析, 从而得出分叉理论是考察混杂电力系统稳定性的一种有效方法, 并展望了分叉理论在混杂系统研究的应用前景。

关键词: 混和逻辑动态模型(MLD); 混杂系统; 分叉理论

Research on hybrid power system and its voltage stability based on mixed logic dynamic model

LIU Kai, PENG Zhi-wei, HUANG Zhong, SUN Jin-chao

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: To satisfy the safe operation of large scale power system and its economic optimization, MLD hybrid system is adopted by analyzing different hybrid power systems. Meanwhile, by employing bifurcation and topological theories, it discusses if it is available and how to use the nonlinear method to analyze the stability of the designed system, which is applied to the hybrid systems. This paper puts forward a bifurcation analysis method considering stability of MLD hybrid power system. In addition, an analysis is detailed as well. The conclusion is that furcate analysis method is effective in respect of examining the stability of power system, and it also predicts the bifurcation of furcate theory in hybrid power systems.

Key words: MLD(mixed logic dynamic); hybrid systems; bifurcation

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0015-04

0 引言

在科学研究与工程技术的各个领域, 研究工作分别建立了适合本领域特点的模型与结构; 而其中建模的理论与方法, 要适用于所处领域需要解决的问题。在电力系统中, 可由微分代数方程描述的发电机和负荷表现为连续动态行为, 受物理规律约束; 其他如有载调压变压器调节等是作用于电力系统的离散事件, 其行为基于逻辑规则, 依赖于连续动态系统的演化。因此, 可以将电力系统描述为一个离散事件控制与连续动态交织在一起的混杂系统。

一个好的系统模型可以较为准确地反映系统行为, 即研究者可以可靠地确定与分析实际系统的运行轨迹。在庞大的实际电力系统中, 这一特点就尤

为重要。而在实际工作中, 研究者往往根据问题需要而选用不同的系统模型, 很难说哪种模型更好。关键是研究者应能根据问题的需要选用模型。

随着电力系统的逐步互联, 为了实现大系统安全与经济协调优化的目标, 研究者从不同的角度出发, 为混杂电力系统建立不同的模型来反映与分析系统行为, 如 Petri 网和混杂自动机模型、混杂切换系统模型等。

目前, 混杂系统理论应用于实际电力系统的研究中取得了一定的成果, 如 I. A. Hiskens 将混杂系统理论应用到有载调压变压器的动态行为的分析^[1]; 在我国, 清华大学提出了基于混杂系统理论, 以离散一连串模型分层建模、再以离散事件为驱动主体, 同时考虑电压稳定性的混成电压控制理论, 并以此为基础建

立了东北电网混杂自动电压控制系统,并经过系统动态模拟仿真试验,验证了所设计混杂控制系统的有效性与稳定性^[2,3]。

稳定性是对控制系统的基本要求,而由于混杂系统的复杂性和特殊性,目前大多采用李亚普诺夫函数法来分析混杂电力系统的稳定性,这是一种运动稳定性分析方法^[4~6]。由于混杂系统的控制策略切换引起的参数变化情况会更加频繁^[7],所以有必要探讨如何利用非线性动态系统结构稳定性分析的有力工具——分叉理论来研究与分析混杂系统的稳定性。

本文在非线性的结构稳定分析框架下,考虑系统的动态、动态之间的逻辑关系后,首先为混杂电力系统建立起一个混合逻辑动态模型MLD(Mixed Logic Dynamic);然后利用分叉理论来与拓扑理论,针对所设计的MLD模型下的混杂电力系统,探讨其电压稳定性的非线性研究方法。

1 混杂系统的建模与描述

1.1 一般混杂系统可由下列函数描述^[8]:

$$\begin{cases} x^{(m)}(t) = f^{(m)}(x^{(m)}(t), u(t), p) \\ y(t) = h^{(m)}(x^{(m)}(t), u(t), p) \\ m_+ = \delta(m_-(t), x^{(m)}(t), e) \\ x_+^{(m_+)}(t) = r(m_-(t), m_+(t), x_-^{(m_+)}(t), e) \end{cases} \quad (1)$$

设 t_0 为初始时刻,系统的初始状态为 $(m_0, x_0^{(m_0)})$ 。对任意时刻 t ,事件的发生都可能导致系统运行模式的变化,即系统由模式 $m_-(t)$ 到 $m_+(t)$ 。系统变迁到后继模式下继续运行,如果有新事件发生,系统继续进行演化。“-”表示事件发生时刻,“+”表示事件发生之后时刻。

1.2 基于混合逻辑动态模型MLD的混杂逻辑动态模型

在模式变迁过程中改变了系统的拓扑结构,而造成系统运行方式改变,可能致使系统不稳定。而在电力系统中存在着多子模切换现象(如OLTC的分接头调整),使得传统的建模方法不能够恰当描述电力系统独有的混杂特性,所以有学者在研究命题逻辑和多约束的混合转换关系后,提出了一种针对上述过程的混合逻辑建模方法,即基于混合逻辑动态建模MLD的混杂系统模型^[8]。

此方法的优点在于它是在统一框架下描述连续事件、离散事件以及它们之间的相互作用,属于混杂系统建模框架中的延拓法(continuation),即:将整个混杂系统看成是一个连续动态系统,描述系

统为一个微分方程;离散事件被认为是对系统的扰动,从而把离散的事件嵌入到系统整体框架中。正是由于此优点,我们利用此方法对电力系统进行混合逻辑动态建模,从而考察整个系统的结构稳定性。

基于MLD的混杂系统的规范形式为^[9]:

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t) \\ y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t) \\ E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x(t)$, $y(t)$, $u(t)$ 分别为系统的状态、输出、控制输入量,它们既可以是连续变量,也可是离散(逻辑)变量,或者同时包含二者。 δ , Z 为MLD模型引入的辅助逻辑变量与辅助连续变量。其中的不等式包含了 δ , Z 的定义和由于物理限制或安全运行所必须引入的系统状态 $\delta(t)$ 和状态控制输入 $u(t)$ 所应满足的输入条件。

所以混合逻辑动态模型的状态演化过程是:首先由给定系统的初始状态 $x(t)$ 和 $u(t)$ 确定 $\delta(t)$ 和 $z(t)$,然后确定系统的输出 $y(t)$ 和下一时刻的状态 $x(t+1)$ 。并在下一时刻的输入 $u(t+1)$ 作用下,重复以上过程。

那么对系统的一个基本要求是系统的良定性(Well Posedness),即 $x(t)$ 和 $u(t)$ 一旦给定,则 $x(t+1)$ 和 $y(t)$ 也是唯一确定的。因此,确定系统初始状态变量后,系统下一状态的运行轨迹的确定是方便的。

2 电力系统非线性稳定分析方法

2.1 电力系统的一般描述

电力系统一般有以下式进行描述:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (3)$$

所有满足式(3)的点 (x_0, y_0, μ_0) 称为(3)所示系统的平衡点。

于是其平衡解流形可以表示为

$$\mu = \{(x, y, \mu) / f(x, y, \mu) = 0, g(x, y, \mu)\} \quad (4)$$

在系统平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处对系统(3)进行微分变换

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) \cdot dx + D_y f(x_0, y_0) \cdot dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) \cdot dx + D_y g(x_0, y_0) \cdot dy \end{cases} \quad (5)$$

那么由上式即可得出描述系统微分动力特性的微分状态方程:

$$\frac{dx}{dt} = \{D_x f(x_0, y_0) - D_y f(x_0, y_0) [D_x f(x_0, y_0)]^{-1} \cdot D_x g(x_0, y_0)\} \cdot dx \quad (6)$$

$$\text{简记为: } F(x, \mu) = (A - BD^{-1}C)x = Jx \quad (7)$$

2.2 结构稳定性定理

由于已经得出系统在平衡点处的解流形方程式(6)、(7),且由动力学知道式(5)系统在平衡点 $(x_0, y_0) = (x(\mu_0), y(\mu_0))$ 处的稳定性由其系统动态雅克比矩阵 $J(\mu_0)$ 所决定^[10]。那么根据静分叉定义知道:当 $J(\mu_0)$ 有零特征值时,平衡点为双曲平衡点,系统失去结构稳定性。

定理 1 对于式(7)所示系统,随着参数 μ 连续变化,当 $\mu = \mu_0$ 时,若 $J_1(\mu_0)$ 非奇异,则在 $(x(\mu_0), y(\mu_0))$ 处发生电压静分叉失稳的充要条件是扩展向量场 $F(x, y, \mu)$ 的雅克比矩阵 $DF(x(y_0), y(\mu_0))$ 奇异。

该定理适用于动、静态电压稳定性分析^[11]。

3 混和逻辑动态电力系统的电压稳定性分析方法的研究与探索

混杂系统从本质上来看是属于一类复杂的非光滑、非连续的非线性系统,因此要建立起一种通用的分析方法,具有相当的难度^[8]。

由于我们要以混和逻辑动态模型为系统框架,那么针对式(2)及其状态演化过程,在利用分叉理论研究系统结构稳定性时,就必须在追踪系统平衡解流形与分叉点的同时,追踪和判别分叉点处新分叉的前行方向。

在文献[11]中,提出了一种搜索平衡解流形上分叉点的新方法:将系统雅克比矩阵特征复平面进行特定变换,以考察变换后特征复平面的最大特征值是否从单位圆穿出来确定运行态是否维持动态稳定性。

首先对式(7)引入变换

$$Z = [J + 1][J - 1]^{-1} \quad (8)$$

$$\text{则 } J = [Z + 1][Z - 1]^{-1} \quad (9)$$

那么由式(8)、(9),对平衡解流形(7)上的点 (x_0, y_0) 进行特定变换,得到由 J 变换的矩阵 Z ;然后利用乘幂法求矩阵 Z 的最大特征值 $\lambda_{z_{\max}}$;最后

根据所求的 $\lambda_{z_{\max}}$,由其在特征复平面单位圆的位置和上文所述结构稳定性定理,最终确定系统的动态稳定性。

所以根据此方法,首先我们可以通过追踪系统的平衡解流形,并以P-U为分析参数,从而得出系统的稳态P-U曲线。而P-U曲线的准确求取对于考察系统的电压稳定性具有重要意义,可以有针对性地防止电压失稳事件的发生。

所以混和逻辑动态电力系统的电压稳定非线性分析方法为:首先由给定的基于混合逻辑动态(MLD)的混杂电力系统及其初始状态,我们在P-U曲线上确定一个初始运行点 $X(t)$;并在 $t = t_1$ 时刻,系统接受事件驱动(如OLTC分接头调整,在MLD框架下,我们将其看成是对系统的一个扰动量)。

此时利用简单初值常微分方程算法,求出 $x(t+1)$ 和 $y(t)$ 。拥有此三个起算点后,我们就可以递推出系统受扰后各时间序列下的电压随时间 t 的变化情况,即追踪系统平衡解流形与分叉点。

所以在上述步骤完成后,我们就可以根据本节所述方法和结构稳定性定理来考察混杂系统的稳定性了。

4 结论

基于MLD的混杂电力系统建模属于延拓建模方法的一种,建模与分析的关键在于如何将离散或者逻辑的信息嵌入到系统模型中去。由于此方法还处于理论研究阶段,那么如何写出混杂电力系统的解析方程式,并在建模过程中结合智能方法是一个值得深入的研究方向。

分叉理论是分析系统结构稳定性的有力工具,目前在电压稳定研究领域研究中取得了一定的研究成果。目前电力系统研究工作者认为只有当功角和电压都暂态稳定时,才能认为系统是暂态稳定的^[12],所以如何利用分叉理论来研究混杂电力系统的整体系统稳定性是一项十分有必要的工作。

系统模型建立后,如何利用我们所述方法进行仿真研究来验证系统建模及所述分析方法的有效性,进而使得研究结果具有很好的工程应用价值就是我们下一步要进行的研究工作。

参考文献

- [1] Hiskens I A, Pai M A. Hybrid Systems View of Power System Modeling[A]. In: IEEE International Symposium on Geneca[C]. Switzerland: 2000.228-231.
- [2] 胡伟,卢强.混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 11-16.

HU Wei, LU Qiang. Hybrid Power Control and Its

- Application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (2): 11-16.
- [3] 马幼婕, 王新志, 刘昂, 等. 混杂动态系统及其在电力系统中的应用[J]. 天津师范大学学报, 2006, 26 (4): 69-73.
- MA You-jie, WANG Xin-zhi, LIU Ang, et al. Hybrid Dynamic System and Its Application in Power Systems[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2006, 26(4):69-73.
- [4] 颜钢锋, 全庆胎, 赵光宙. 含有微分代数子系统的混杂系统稳定性研究[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(10): 1293-1297, 1379.
- YAN Gang-feng, TONG Qing-yi, ZHAO Guang-zhou. Study on Stability of Hybrid Systems Composed of Differential-algebraic Subsystems[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(10): 1293-1297, 1379.
- [5] Ye H, Michel A N, Hou L. Stability Theory of Hybrid Dynamical Systems[J]. IEEE Trans on Automat Contr, 1998, 43(40):461-474.
- [6] ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, SONG Wei, et al. Multiple Lyapunov Functions Analysis of Hybrid Power Systems with Discrete Event Actions. PowerCon2002[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002. 2026-2029.
- [7] CHEN Luo-nan, Aihara K. Bifurcation Analysis of Hybrid Dynamical Systems[A]. In: IEEE Proc Int Conference on Systems[C]. Geneva(Switzerland):2000. 228-231.
- [8] 张聚. 混杂系统理论及其在非线形系统中的应用研究(博士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHANG Ju. Hybrid Systems and Its Application in Nonlinear Control Systems, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [9] Bemporad A, Morari M. Control of Systems Integrating Logic, Dynamics and Constraints[J]. Automatic, 1999, 35(3): 407-427.
- [10] 陆启韶. 分叉与奇异性[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1995.
- [11] 彭志炜, 胡国根, 韩帧祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
-
- 收稿日期: 2007-09-14; 修回日期: 2007-12-11
- 作者简介:
- 刘凯(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定; E-mail: gz_liukai@yahoo.com.cn
- 彭志炜(1958-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与稳定, 电力系统电压稳定;
- 黄忠(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场。
-
- (上接第14页 continued from page 14)
- LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. The Maximal Wind-energy Tracing Control of a Variable-speed Constant-frequency Wind-Power Generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20):62-67.
- [8] 刘其辉, 贺康益, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 50-55.
- LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Grid Connection Control Strategy of AC-excited Variable-speed Constant-frequency Wind Power Generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3):50-55.
- [9] 程静, 王维庆, 岳雷. 变速恒频风力发电机组的模糊控制[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2004, 21(1): 56-59.
- CHENG Jing, WANG Wei-qing, YUE Lei. Fuzzy Control of the Variable Speed Pitch Regulated Generator [J]. Xinjiang University Solaris Sinica, 2004, 21(1):56-59.
- [10] 赵栋利, 许洪华, 赵斌, 等. 变速恒频风力双馈发电机并网电压控制研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 587-591.
- ZHAO Dong-li, XU Hong-hua, ZHAO Bin, et al. Study on the Cut-in Voltage Control of a Variable-speed Constant-frequency Doubly-fed Induction Generator[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(5): 587-591.
- [11] Chung Se-Kyo, Lee Jung-Hoon, et al. Current Control of voltage-fed PWM invert for AC Machine Drives Using Integral Variable Structure Control[J]. IEEE, 1995.
- [12] 于文波, 童建东, 刘成斌, 等. 变速恒频双馈风力发电机空载并网滑模控制[J]. 沈阳工程学院学报, 2007, 3(1): 10-12.
- [13] 康小亲. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- KANG Xiao-qin. Fuzzy Control Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
-
- 收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2008-01-10
- 作者简介:
- 兰华(1956-), 女, 教授, 主要从事信号处理及理论电工的研究工作;
- 刘座铭(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统控制与风力发电技术. E-mail: lzmhero_@126.com