

混杂理论在有载调压器建模中的应用

杨 昆, 米增强, 赵洪山, 王晓冬

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 由于电力系统的动态行为表现出混杂系统所共有的特征, 使得电力系统负荷侧电压控制研究变得复杂。描述了混杂理论和可编程赋时 Petri 网 (PTPN) 的基本思路, 然后基于混杂理论, 用可编程赋时 Petri 网的方法对有载调压器分接头的调节进行了混杂建模。最后将所建模型放在一个简单的单机系统中进行仿真, 得到母线电压以及离散变量变化的曲线, 结果表明建立的模型是合理的, 对延迟电压崩溃起到了积极的作用。

关键词: 有载调压器; 混杂系统; 可编程赋时 Petri 网; 建模

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0019-05

0 引言

一个复杂系统的动态演化过程通常由其连续时间的物理过程来描述, 即微分方程或差分方程, 而实际物理系统的动态过程的演化是非常复杂的, 除了连续动态变化外, 还存在基于事件驱动的离散动态行为, 而且连续动态和离散动态相互影响、相互作用。混杂控制系统就是由离散事件动态系统和连续变量控制系统相互混和、相互作用而成的^[1]。

电力系统是一个典型的混杂动态系统, 如连续动态包括发电机的运行及其控制等, 离散事件动态包括有载调压器分接头的调节、电容器的投切、负荷的切除以及继电保护动作等。当电力系统发生大的扰动或故障时, 系统的动态特性通常是复杂的, 需要使连续的状态量和离散事件驱动命令控制相互作用和相互协调以确保系统的稳定运行。但长期以来, 由于人们对连续动态系统和离散事件动态系统的理论一直是分开研究的, 致使在人们公认的电力系统分析软件中, 对起重要作用的、产生离散事件动态行为的元件未能给予充分的、真实的、全程的建模, 即使通过自定义的建模方法对其进行表征, 也只能用简单的逻辑来描述, 而无法真实地反映这些元件的复杂控制规则。本文提出了电力系统的混杂控制建模思路, 并用可编程赋时 Petri 方法 (PTPN) 建立了有载调压器分接头调节的混杂模型。

1 混杂系统理论简述

一个混杂切换系统就是一个结构以离散方式进行改变的连续系统, 这时系统的状态就被发展成为一个切换序列。这样一个系统就可以用下面方程来

描述:

$$x = f_i(t)(x(t^-), i(t^-)) \quad (1)$$

$$i(t^+) = q(x(t^-), i(t^-)) \quad (2)$$

$$x(t^+) = \phi(x(t^-), i(t^-), t) \quad (3)$$

其中: $x \in R^n$ 是状态变量, 即代表系统的连续状态, $i \in Z^+$ 是状态序号即离散状态, R^m 代表外部的干扰信号。我们选择一个有 N 个控制策略的有限集合 $D = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 来控制系统的连续动态特性, 这里 $f_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是一个 Lipschitz 连续函数。函数 q 用来控制系统的离散状态, 它能够通过给定的当前连续状态 $x(t^-)$ 和前一个离散状态 $i(t^-)$ 来决定下一个时刻的离散状态 $i(t^+)$ 。当离散事件发生后, 系统的连续状态会发生跃变, 用式 (3) 来描述。其中 t^- 和 t^+ 分别表示事件发生前和事件发生后的时间, 变换函数 ϕ 表示连续轨迹的跃变。

2 可编程赋时 Petri 网简介

可编程赋时 Petri 网 (又名 PTPN) 将混杂系统分成两个层次: 逻辑层和连续层。逻辑层由普通 Petri 网来描述, 连续层则由局部时钟来刻画其连续动态行为。它的基本结构可由图 1 来简单说明:

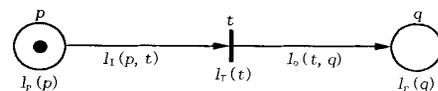


图 1 可编程赋时 Petri 网模型

Fig. 1 Model of programmable timed Petri nets

图 1 中, $l_p(p)$ 由逻辑公式 (4) 定义, 表示的含义是当托肯到达库所 p 时, 时间的初值 t_0 和系统状态量 x_i 都要重新设置为满足公式规定的值, $J(p)$ 代表切换的序列号即库所的代号。

$$l_p(p) = \bigwedge_{i \in J(p)} ((x_i = f_i) \quad (i_0 =)) \quad (4)$$

$l_T(t)$ 是变迁 t 的逻辑公式, 表示变迁 t 触发的条件, 此处定义成永真式。 $l_1(p, t)$ 是输入弧的逻辑公式, 定义为式(5), 它为一组不等式约束方程, 表示只有当系统中某些量满足这些约束方程时, 变迁 t 才可以触发。

$$l_1(p, t) = \bigwedge_{i \in J(p,t)} (h_i(x) < 0) \quad (5)$$

$l_o(t, q)$ 是输出弧的逻辑公式, 形式与输入弧的逻辑公式相同, 表示当系统满足这些条件时, 变迁 t 完成触发, 托肯从库所 p 移到库所 q , 从而完成系统模式的切换, 在这里我们将其都规定成永真式^[2]。

3 有载调压器分接头调节混杂模型的建立

我们以图 2 所示的一个简单系统为例来说明有载调压器分接头调节的混杂特性, 图中发电机采用连续的三阶模型。负荷模型我们用文献[7]的一阶指数型动态负荷模型来描述:

$$\begin{cases} x_q = Q_s - Q_d \\ Q_d = \frac{1}{T_q} x_q + Q_t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_p = P_s - P_d \\ P_d = \frac{1}{T_p} x_p + P_t \end{cases} \quad (7)$$

其中: x_p, x_q 代表有功和无功负荷的状态; T_p, T_q 为有功和无功负荷的恢复时间常数; P_d 和 Q_d 分别表示负荷的有功和无功; $P_s = kP_0V^s, Q_s = kQ_0V^s$ 和 $P_t = kP_0V^t, Q_t = kQ_0V^t$ 分别代表负荷的稳态和暂态特性; k 是表征负荷水平的标度因子。

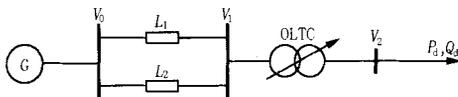


图 2 简单电力系统

Fig. 2 Simple power system

3.1 有载调压器分接头调节简述

当网络无功功率供给充足时, 负荷侧有载调压器的调节可以有效控制系统电压的稳定。其调节的离散模型为:

$$n(k) = n(k-1) - d f(V) \quad (8)$$

其中: $n(k)$ 是第 k 次调节时 OLTC 的变比; $V = V - V_r$ 是分接头负荷侧的电压偏差; V_r 为参考电压; d 是变压器分接头的调节步距, 其控制准则由函数 $f(V)$ 来表示:

$$f(V) = \begin{cases} 1 & \text{当 } V > DB/2 \text{ 且延时 } t > T_d + T_m \\ -1 & \text{当 } V < -DB/2 \text{ 且延时 } t > T_d + T_m \\ 0 & \text{其它时候} \end{cases} \quad (9)$$

式中: DB 表示 OLTC 电压调节的死区; T_d 为计时器延时, 表示当计时器计时达到 T_d 后, 有载调压器分接头才开始进入动作状态; T_m 为机械延时, 表示分接头完成切换这样一个物理运动所需要的延时。

要建立完整的有载调压器模型还应该考虑其调节对系统电压的负面影响。有载调压器的升调节可使二次侧的电压升高, 却使一次侧的电压降低, 从而导致一次侧网络的无功消耗增大, 如果网络的无功功率供给不足, 有载调压器的连续调节就有可能导致或者加速高压电网发生电压崩溃。因而在建立有载调压器模型时必须考虑到它的闭锁条件, 本文所设定的闭锁条件是一次侧电压低于某一数值, 这是因为一次侧电网能提供足够无功的标志就是一次侧电压能保持一定的电压水平。另外文献[8]还提出闭锁时必须在 $x_q < 0$ 的区域, 从式(6)可以知道, 这个条件对应于 $Q_s < Q_d$, 即只有当有载调压器负荷端电网无功供给大于无功需求时, 对有载调压器的分接头调节进行闭锁才可以起到减缓电压崩溃的作用。

3.2 用 PTPN 方法构造有载调压器调节模型

用 PTPN 的方法构造有载调压器分接头的调节模型如图 3 所示。

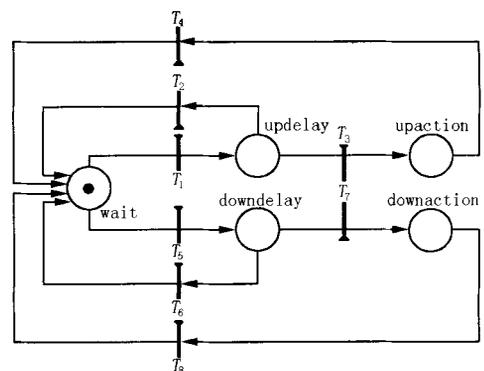


图 3 有载调压器分接头调节的模型

Fig. 3 Model of OLTC's regulation

图 3 中, 库所集合为 $P = \{wait, updelay, downdelay, upaction, downaction\}$, 其中 $wait$ 为分接头正常运行时系统的运行模式, $updelay$ 和 $upaction$ 表示分接头升调节过程中的两种运行模式, 而 $downdelay$ 和 $downaction$ 则代表分接头降调节过程中的两种运行模式。变迁集合 $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7,$

T_8 }, 其中 T_1, T_2, T_3, T_4 表示分接头的升调节过程, T_5, T_6, T_7, T_8 表示分接头的降调节过程。

对于变迁 $T_1, T_2, T_3, T_5, T_6, T_7$, 其输入弧分别由下式定义:

$$\begin{aligned}
 l_1(\text{wait}, T_1) &= (V < -DB/2) \quad (\text{tap} < \text{tap}_{\max}) \\
 l_1(\text{updelay}, T_2) &= (V - DB/2) \quad (\text{tap} = \text{tap}_{\max}) \\
 &((x_q < 0) \quad (V_{\text{first}} - V_{\min})) \\
 l_1(\text{updelay}, T_3) &= t > (T_d + T_m) \\
 l_1(\text{wait}, T_5) &= (V > DB/2) \quad (\text{tap} > \text{tap}_{\min}) \\
 l_1(\text{downdelay}, T_6) &= (V - DB/2) \quad (\text{tap} = \text{tap}_{\min}) \\
 l_1(\text{downdelay}, T_7) &= t > (T_d + T_m)
 \end{aligned}$$

其中: $V = V_{\text{second}} - V_r$, V_{second} 是调压器二次侧的电压, V_r 为参考电压。DB 为调压器电压调节的死区, 表示 V 低于某一负值时, 分接头就应上调, 而当调压器二次侧电压高于某一正值时, 分接头才应下调。 V_{first} 为调压器一次侧电压, V_{\min} 为分接头动作时调压器一次侧电压的最小值, tap 为当前分接头的位置, tap_{\max} 为分接头可以到达的最大位置, 表示调压器一次侧电压低于 V_{\min} 或分接头达到最大位置时, 分接头不再进行上调动作。 tap_{\min} 为分接头可以到达的最低位置。对于变迁 T_4, T_8 的输入弧都定义成永真式。而所有变迁及输出弧全部定义成永真式。

3.3 仿真结果

在图 2 所示简单系统中, 线路 L_2 在 30 s 时因故障被切除, 如果无有载调压器进行调节, 我们得到母线电压 U_1 和 U_2 的变化曲线如图 4:

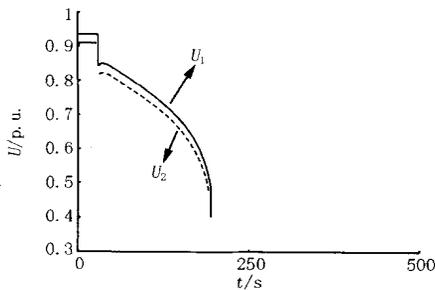


图 4 母线电压 U_1 和 U_2 的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of bus voltage U_1 and U_2

系统的各元件参数值见表 1, 从图 4 可以看到, 母线电压 U_1 和 U_2 发生了急剧下降。将所建有载调压器模型放在图 2 系统中进行仿真, DB 的值设为 0.2, V_r 设为 1, d 的值设为 0.01, tap_{\max} 和 tap_{\min} 分别设为 1.13 和 0.87, V_{\min} 为 0.8, 可以得到母线电压

U_1 和 U_2 以及有载调压器变比 n 和表征闭锁的逻辑变量 lock 变化曲线如图 5、图 6、图 7 所示。

表 1 简单系统的参数

Tab. 1 Parameters of simple power system

发电机参数	负荷参数	变压器参数	线路 L_1 参数	线路 L_2 参数
$X_d = 0.8948$	$K = P_0 = 1.0$	$X_T = 0.1$	$X = 0.3$	$X = 0.3$
$X_q = 0.84$	$Q_0 = 0.2$		$R = 0$	$R = 0$
$X_d = 0.3$	$s = s = 1$			
$T_{d0} = 7$	$t = t = 2$			
$R_a = 0$	$T_p = T_q = 60$			

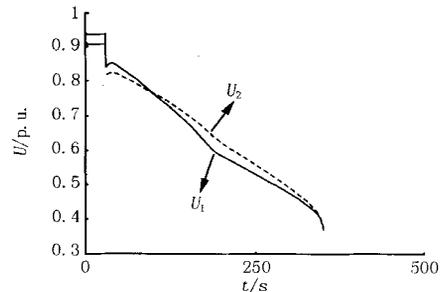


图 5 母线电压 U_1 和 U_2 的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of bus voltage U_1 and U_2

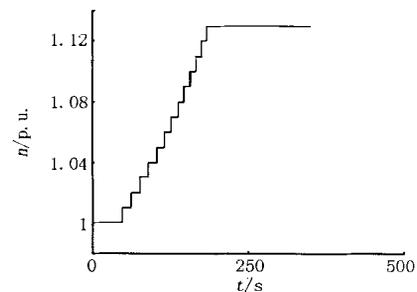


图 6 有载调压器变比的变化曲线

Fig. 6 Changing curve of OLTC s ratio

比较图 4 和图 5 我们可以发现通过有载调压器的调节并不能抑制母线电压的崩溃, 根据图 6 我们知道是因为其分接头最大位置的限制, 但它却延缓了电压崩溃的发生, 因此它的调节对防止电压崩溃事件是有一定积极作用的。同时我们看到尽管一次侧电压低于 V_{\min} 即 0.8, 但图 7 显示表征闭锁的逻辑变量并没有从 0 跃变到 1, 即有载调压器没有被闭锁, 从图 8 我们可以知道这是因为 $x_q > 0$, 仿真结果也证明有载调压器没被闭锁是正确的, 因为它的调节对系统电压的稳定性确实起到了作用。

同样在图 2 所示的简单系统中, L_2 和 L_1 的线路阻抗都改为 $X = 0.1, R = 0$, 其他各元件的参数值

不变,假设刚开始只有线路 L_1 在系统中,线路 L_2 是在 30 s 时突然投入到系统中去的,这时母线电压 U_2 的仿真曲线如图 9。

将所建负载调压器模型放在图 2 所示系统中,令 DB 的值为 0.1,其它参数的值同上面升调节的仿真实例相同,我们可以得到下面的仿真结果,如图 10 和图 11 所示。

从图 10 和图 11 可以看到,通过有载调压器的降调节,母线电压 U_2 最终稳定在了 $(V_r + DB/2)$ 即 1.05 以下,证明所建负载调压器模型的降调节对调压器二次侧电压能够起到降低的作用。

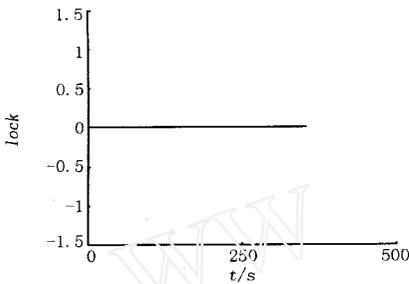


图 7 表征闭锁的逻辑变量 lock 变化曲线

Fig. 7 Changing curve of logic variable lock that represents locking

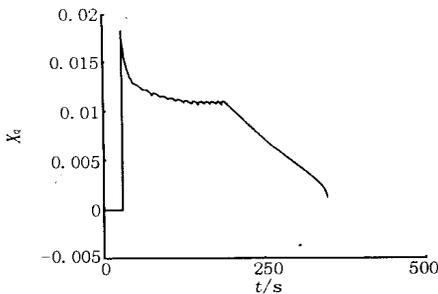


图 8 x_q 变化曲线

Fig. 8 Changing curve of x_q

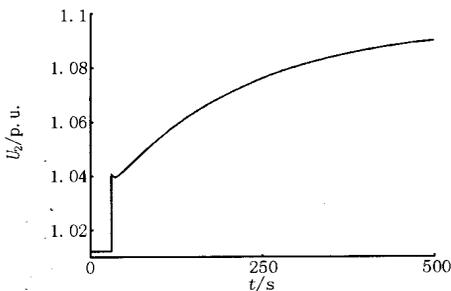


图 9 母线电压 U_2 的变化曲线

Fig. 9 Changing curve of bus voltage U_2

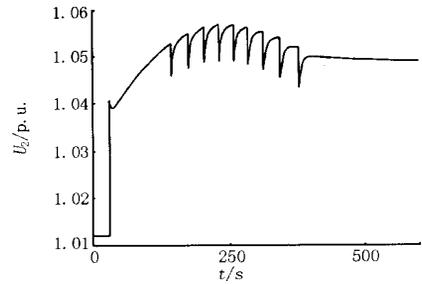


图 10 母线电压 U_2 的变化曲线

Fig. 10 Changing curve of bus voltage U_2

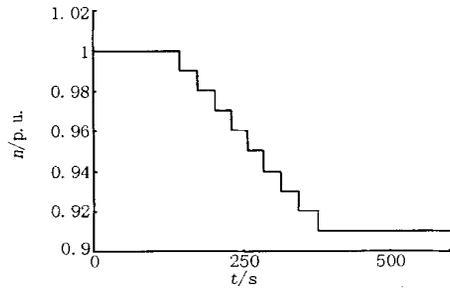


图 11 有载调压器变比的变化曲线

Fig. 11 Changing curve of OLTC's ratio

4 结论

现在国内电网系统受电的比重不断增加以及缺乏大电源的支撑,主要原因是无功供给不足,使得电压稳定问题逐渐突出。要解决大扰动下系统发生电压崩溃的问题,就必须采取动态的电压稳定的方法,而这种方法首先要做的工作就是建立系统的动态元件模型。由于电力系统的动态行为表现出混杂系统所共有的特征,使得电力系统的负荷侧电压的控制研究变得复杂。本文基于混杂理论建立了有载调压器分接头调节的混杂模型,仿真结果显示有载调压器的调节推迟了电压崩溃,从而证明了所建模型是正确的,为今后更为复杂的电力系统混杂控制建模提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 赵洪山,米增强,田建设,等(ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, TIAN Jian-she, et al). 混杂系统理论及其在电力系统中的应用前景(Hybrid System Theory and Its Application Perspectives in Power System)[J]. 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 2002, 29(2): 6-12.
- [2] 赵洪山,米增强,牛东晓,等(ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NIU Dong-xiao, et al). 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究(Power System Modelling Using Hybrid

- System Theory) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23(1): 20-25.
- [3] 韩景红, 秦世引, 宋永华 (HAN Jing-hong, QIAN Shi-yin, SONG Yong-hua). 基于学习自动机的混杂电力系统紧急频率控制 (The Frequency Control in Emergency of Hybrid Power System Based on Learning Automata) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(18): 8-12.
- [4] 张元鹏, 黄要桂 (ZHANG Yuan-peng, HUANG Yao-gui). 静态电压稳定分析中的动态元件模型及其实现 (The Model of Dynamical Composition and Its Realization of Study on Static Voltage Stability Analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(3): 66-70.
- [5] Hill D.J. Nonlinear Dynamical Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies [J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 166-176.
- [6] Popovic D, Hiskens I A, Hill D. Investigation of Loadtap Changer Interaction [J]. Electrical Power & Energy System, 1996, 18(2): 81-97.

收稿日期: 2003-07-28; 修回日期: 2003-10-10

作者简介:

杨昆(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统混杂平台建模分析与控制;

赵洪山(1965-), 男, 博士研究生, 研究方向为混杂电力系统动态分析与控制以及电力系统离散事件动态特性分析;

米增强(1960-), 男, 教授, 研究方向为混杂电力系统自动化与混杂电力系统动态分析与控制。

Application of hybrid theory in OLTC modeling

YANG Kun, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, WANG Xiao-dong
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Since the dynamic behaviors of power system represent the characteristic of hybrid system, it is difficult to research the voltage control on the load side. The paper describes the basic thoughts of hybrid theory and programmable timed Petri nets (PTPN). Based on hybrid theory, the hybrid model of regulation for OLTC's taps is built by the way of PTPN. Finally the model is simulated in a simple single generator system, and the changing curves of bus voltage and its discrete variable are obtained. The result shows that the model is reasonable, and it can take positive effect on postponing the voltage collapse.

Key words: OLTC; hybrid system; programmable timed Petri nets; modelling

(上接第9页 continued from page 9)

- [5] 蔡华嵘, 范春菊, 郁惟镛 (CAI Hua-rong, FAN Chun-ju, YU Wei-yong). 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 (A New Practical Double-terminal Fault Location Algorithm for HV Transmission Line) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2003, 36(7): 31-34.

作者简介:

李胜芳(1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化;

范春菊(1967-), 女, 副教授, 在职博士生, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作;

郁惟镛(1940-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

收稿日期: 2003-09-05; 修回日期: 2003-09-27

An adaptive fault location algorithm based on PMU for transmission line

LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong
(School of Electrical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new adaptive fault location algorithm based on phasor measurement unit (PMU) for transmission line is presented in this paper. Voltage and current phasors of both ends of the transmission line are obtained through PMU. The online parameter estimation algorithm is adopted to solve the problems such as practical parameters being different from parameters provided by electric power company, and the uncertainty of line parameters in the process of operation. The DFT based filter combined with a bandpass filter help to extract extremely accurate fundamental frequency components for calculation of fault location. Extensive EMTP simulations as well as practical system data test results have shown that the proposed algorithm allows for accurate estimation in fault location, and is immune from the operation mode, transition resistance at fault point, fault types and fault distance.

Key words: fault location; phasor measurement unit (PMU); line parameter