基于 DEVS 理论的电力系统混杂动态数值算法的研究

张纪平，赵洪山，吴亚楠，刘靖辉
（华北电力大学电力系，河北省 保定市 071003）

摘　要：本文提出了一种用于电力系统动态仿真的混杂数值算法。对电力系统这一典型的混杂动态系统进行较为准确的分析与仿真，就必须综合考虑连续和离散的动态过程。本算法采用基于离散事件（Discrete-Event）机制的QSS/QSS2（Quantized State System）方法对电力系统的连续及离散的动态行为进行分析，提出了一种针对电力系统混杂动态仿真的数值算法，并且通过实例详细说明了用这种混杂算法处理电力系统的思想与步骤。

关键词：电力系统；混杂；DEVS；QSS；**仿真**

0 引言

电力系统是一个既包含连续动态行为又包括离散动态行为的混杂动态系统，为了对这样一个系统进行仿真，在算法方面，人们做了较多的研究。但综合起来存在以下两个缺陷：第一，很多研究主要针对连续动态系统，而电力系统中的离散动态行为并没有给以太多的关注；第二，即使研究系统中的离散行为，却没有过多的考虑系统中的连续动态行为。由于电力系统的混杂特性，所以在建立动态仿真或是对其进行深入而细致的研究时，综合考虑连续与离散两种动态行为是十分必要的。

目前，在电力系统动态仿真算法的研究中，几乎都从离散时间（discrete-time）的角度进行分析。本文提出了基于离散事件(discrete-event)机制的混杂动态仿真算法的思想，它利用 DEVS（Discrete Event System specification）理论将连续系统和离散事件系统有机的统一在一起，不但克服了前面提到的算法的两个缺陷，而且具有高效、快速的计算速度。该算法利用一阶/二阶量化状态系统（Quantized State System QSS/QSS2）[1]方法以离散事件的形式来对连续动态系统进行较为精确的近似，分别提供了用零阶量化器和一阶 QSS 方法，以及具有更高精确度的一阶量化器和二阶 QSS（QSS2）方法对连续动态系统进行仿真。

通过和其它算法，如Runge-Kutta 4-5 (Matlab's ode45)、Adams -Bashforth-Moulton等相比较，基于QSS/QSS2理论的混杂算法所用系统开销非常少，具有其它算法无法比拟的收敛速度[2]。对于从算法的机制上看，该方法属于事件驱动而非时钟驱动，它不但能处理离散事件问题，还能够以较快的速度解电力系统中的微分代数方程，因此这种方法对于电力系统混杂动态仿真大有益处。

通过对该算法的研究，以及同其它算法的比较，本文验证了它在电力系统混杂动态仿真中的可行性。

1 DEVS 及 QSS/QSS2 为基础的电力系统混杂算法的思想

DEVS 理论主要是针对离散事件系统而提出的[3]，但由于它本身的特点，同样也适用于连续系统仿真。为了做到这一点，量化状态系统（QSS）[4]被提出。通过这一方法，能够根据 DEVS，从离散事件的角度来描述或表示连续的系统[5]，从而为连续系统和离散事件系统的分析与仿真提供了一个统一的理论基础及平台。因此，这中理论与方法的结合非常适用于处理具有混杂动态特性的电力系统仿真。

1.1 DEVS 理论

DEVS 所定义的模型被分为原子模型（Atomic Model）和组合模型（Coupled Model）两类。通常，原子模型是最基本的模型，而组合模型可以由原子模型组成也可以包含其它的组合模型，因此 DEVS 模型具有层次化机构[6]。

一个原子模型被定义为：

$$M=<X,S,Y,\delta_{\text{int}},\delta_{ext},\lambda,T_a>$$

其中,X 是输入事件集合，S 是状态集合，Y 是输出事件集合。而其它的几个函数的意义：δ_{int} 用于处理内部变迁，δ_{ext} 处理外部变迁，λ 控制输出，T_a 为时间片（即距离下次状态变迁所剩的时间）。

一个 DEVS 组合模型被定义为：

$$CM=<I,X,Y,D,\{M_i\},\{I_i\},\{Z_{ij}\}>$$

其中，X 是输入事件集合，Y 是输出事件的集合。D 为模型组件的编号，$i\in D$，M_i 是基本的 DEVS 模型。其中

$$M_i=<I_i,X_i,S_i,Y_i,\delta_{\text{int}_i},\delta_{ext_i},tai>$$

I_i 是第 i 模型的响应集。对于每一个 $j \in I_i$，Z_{ij} 是从 i 到 j 的转换函数。

对于一个原子模型,其基本动态机制是这样的:模型在进行状态变迁以前处于一个初始状态，当从输入端口接收到一个数值时（即可理解为一个事件发生时),如果这个数值满足模型中定义的外部变迁函数 δ_{ext}（External Transition function）的条件，那么模型会进入 δ_{ext} 所指定的另一个状态。否则，模型将保持当前状态，直到该状态的时间片用完，从而执行 δ_{int}（Internal Transition function），首先发送一个数值给输出端口，然后使模型进入其它指定状态。

1.2 量化状态系统（QSS/QSS2）方法简介

（1）QSS(一阶 QSS 法)

QSS最早是由Kofman（参考文献[4]）提出的，它的基本思想就是：用一个带有滞环（hysteresis）的量化函数将连续系统离散化，从而将其转换为分段连续的常量。然后结合DEVS理论，用离散事件机制来描述连续系统。

对于连续系统来说，通常用以下微分方程来表示：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t)) \end{cases}$$

其中，$x(t)$ 表示状态向量，$u(t)$ 表示输入向量。将其转换到量化状态系统后，其形式为[7]：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(q(t), u(t)) \\ y(t) = g(q(t), u(t)) \\ q(t) = Q(x(t)) \end{cases}$$

其中，$Q(x(t))$ 是带有滞环的量化函数，定义如下：$Q = \{Q_0, Q_1, \ldots Q_r\}$ 是一个实数集，其中 $Q_{k-1} < Q_k$ ($1 \le k \le r$)，设 Ω 表示分段连续轨迹的集合，连续状态量 $x \in \Omega$。映射 $b : \Omega \to \Omega$ 表示带有滞环的量化函数，$q = b(x)$ 定义如下;

$$q(t) = \begin{cases} Q_m & \text{if } t = t_0 \\ Q_{k+1} & \text{if } x(t) = Q_{k+1} \wedge q(t^-) = Q_k \wedge k < r \\ Q_{k-1} & \text{if } x(t) = Q_k - \epsilon \wedge q(t^-) = Q_k \wedge k < 0 \\ q(t^-) & \text{otherwise} \end{cases}$$

并且有

$$m = \begin{cases} 0 & \text{if } x(t_0) < Q_0 \\ r & \text{if } x(t_0) \ge Q_r \\ j & \text{if } Q_j \le x(t_0) < Q_{j+1} \end{cases}$$

离散的量 Q_i 和 $Q_{k+1} - Q_k$ 分别被称作量化等级（quantization levels）和量子（quantum），他们通常都是常量。ε 是滞环窗口的宽度。Q_0 和 Q_r 分别为上饱和边界和下饱和边界（lower and upper saturation bounds）。图1给出了等间隔的量化函数。

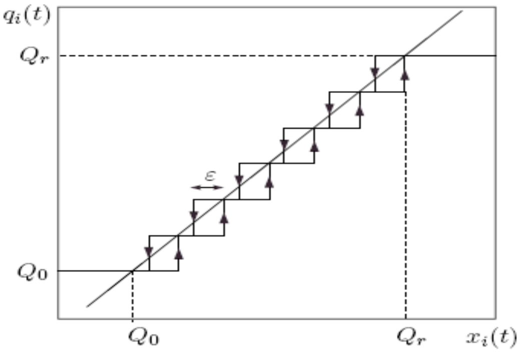

图 1.带有滞环的量化函数

（2）QSS2(二阶QSS法)

为了达到更高的精确度，二阶 QSS 方法（QSS2）[8]被提出以满足更高的精度要求。它保持了 QSS 的基本思路，但却采用一阶量化函数（first-order quantization function）而不是传统的 QSS 中的零阶量化函数（zero-order quantization function）。一阶量化函数主要考虑状态变量斜率的变化，即用状态轨迹上点的切线去代替状态量本身。当状态变量的斜率变化达到一定的门槛值时，量化函数的值也相应的进行变化。图 2 描述了这种思想。

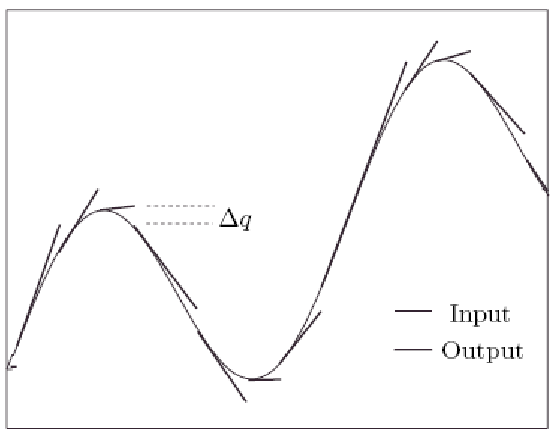

图 2.一个一阶量化器中的输入输出轨迹

通过这种方法，量化变量的轨迹是分段线性的，而状态量轨迹呈分段抛物线状。

由于 QSS 和 QSS2 本身的一些特点，使它们具有较快的收敛速度和较好的稳定性等[9]。

1.3 电力系统混杂动态算法

电力系统分为离散和连续动态行为，因此由两个子系统构成，分别是连续子系统和离散子系统，用一种算法将两种系统统一描述是十分必要的。本文提出的电力系统混杂动态算法的基本思路是：利用 DEVS 的离散事件机制，结合 QSS/QSS2 方法来描述电力系统的混杂特性。

对于电力系统而言，需要建立以下几种基本概念[10]：

概念 1：具有多种不同的运行模式（mode），每一种运行模式都有相应的向量场描述其连续动态，不同的向量场的维数不一定相同。

概念 2：整个系统的模式变化是由系统中所发生的事件（event）来控制的。混杂的电力系统一般分为两类事件。一类是时间事件，时间事件发生的时刻是已知的；另一类是状态事件，它是由系统状态变量确定的，如继电保护与自动装置动作等；状态事件也可以从系统中抽象出来，如系统的运行轨迹穿越约束边界时，也称系统产生了一个事件。

通过以上思路，以下简要描述电力系统混杂算法的步骤。

首先，根据文献[9]，混杂系统可以由以下微分代数方程的形式表示：

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), z(t), m(t)] \tag{1a}$$

$$0 = g[x_r(t), u_r(t), z(t), m(t)] \tag{1b}$$

同样，对于混杂特性的电力系统，这里的 $x(t)$ 表示电力系统的状态变量，如功角及发电机的转速等；$u(t)$ 是系统的输入向量；$z(t)$ 表示代数向量，如电压、有功功率和无功功率等；$m(t)$ 是来自离散子系统的分段常量，用来定义电力系统的运行模式。$m(t)$ 是由独立的模块计算，以 $m(t)$ 作为输入，也可以建立相应的连续子系统模型。(1b)中的 $x_r(t)$ 和 $u_r(t)$ 分别是状态变量和输入向量的简化形式。

然后，按照 QSS 或 QSS2 的方法，将以上两式（1a）、（1b）转换为如下形式：

$$\dot{x}(t) = f[q(t), u(t), z(t), m(t)] \tag{2a}$$

$$0 = g[q_r(t), u_r(t), z(t), m(t)] \tag{2b}$$

如前所述，连续系统通过 QSS/QSS2 已经转换到量化系统中。根据这一关系，可以建立电力系统的 DEVS 模型。具有混杂动态特性的电力系统可由 4 个主要的原子模型组成：静态函数（Static Functions）f_i，量化积分器(Quantized Integrator)，离散子系统（Discrete）模型和隐函数（Implicit）模型。可以分别定义每个原子模型的 DEVS 模型，然后将它们组装起来形成组合模型。

对于静态函数和量化积分器以及隐函数的模型，文献[7]和[11]已经给出了相应的 DEVS 结构。而对于电力系统来说，存在很多种运行模式，因此必须要考虑离散子系统模型的结构。例如，对于一个包含线路保护离散事件的多机系统，如果发生永久性线路故障，保护动作切除故障线路，电网结构发生变化，系统的运行方式也随之变化，我们可以以此特征来定义系统的运行模式。但对于复杂的多机电力系统，运行模式的数量非常大，这样建立模型是很难应用和分析的。可以采用首先对其元件利用 DEVS 理论进行建模，如对继电保护和 FACTS 设备等建立 DEVS 模型，然后根据实际的物理系统的关系连接在一起进行分析。

2 一个简单电力系统的实例

为了便于说明，现以如下系统（图 3）为例加以说明基于 DEVS 和 QSS 方法的电力系统混杂算法过程：

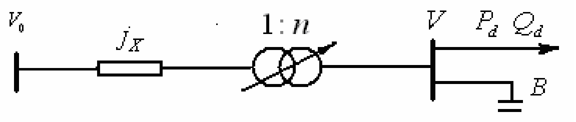

图 3. 简单电力系统

图中，将发电机模型看作无穷大母线，负荷模型采用[12]的动态模型，变压器采用离散模型。

(1)可以看出，该系统是由 OLTC（有载调压器）控制的多模式的电力系统模型。根据其动态特性，可以用一下微分代数方程来描述其特性：

$$\dot{x}_p = -(1/T_p)x_p + P_s(V) - P_t(V) \tag{3}$$

$$\dot{x}_q = -(1/T_q)x_q + Q_s(V) - Q_t(V) \tag{4}$$

$$0 = x_p + P_t(V) + (V_0 V \sin\delta)/Xn(k) \tag{5}$$

$$0 = x_q + Q_t(V) - BV^2 + V^2/Xn(k)^2 - (V_0 V \cos\delta)/Xn(k) \tag{6}$$

$$n(k) = n(k-1) - df(\Delta V) \qquad (7)$$

式中，x_p 和 x_q 分别表示有功与无功的负荷状态。T_p, T_q 分别为有功无功负荷的恢复时间常数；P_s，Q_s 和 P_t，Q_t 分别为负荷的稳态与暂态特性；$n(k)$ 为第 k 时间间隔的 OLTC 的变比；$\Delta V = V - V_r$ 为分接头控制侧的电压偏差；d 为变压器分接头的调节步距。

其中，在非时序控制方式，$f(\Delta V)$ 表达式为：

$$f(\Delta V) = \begin{cases} 1 & \Delta V > D_B/2, \text{保持时间为 } T_d + T_m \\ -1 & \Delta V < -D_B/2, \text{保持时间为 } T_d + T_m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \qquad (8)$$

式中：D_B 为系统参数死区；$T_d = T_{d0} D_B / \Delta V$，为定时器延时参数；$T_m = T_{m0} D_B / \Delta V$，为有载变压器分接头调节机延时参数。

该系统的离散子系统应该由 OLTC 控制，由它产生系统的运行模式。

(2) 为了便于分析，设计 OLTC 具有 5 个分接抽头，即 V_N，$V_N(1 \pm 2.5\%)$，$V_N(1 \pm 5\%)$。

由此，图 3 所示电力系统的运行模式分为五种，分别对应 5 个分接抽头的位置。文献[13]中对 OLTC 的动态过程进行了详细的描述，根据 DEVS 理论，OLTC 模型包括为五种状态，每种状态的时间延时可参考表达式(7)和(8)进行设置。根据输入端口的不同的值，可以由内部和外部变迁函数来决定各个状态的相互转换，从而产生整个系统的运行模式 $n(k)$。

用 $q(t)$ 代替动态方程中的 x_p 和 x_q，然后按照各模块的关系可画出整个系统的方框图。

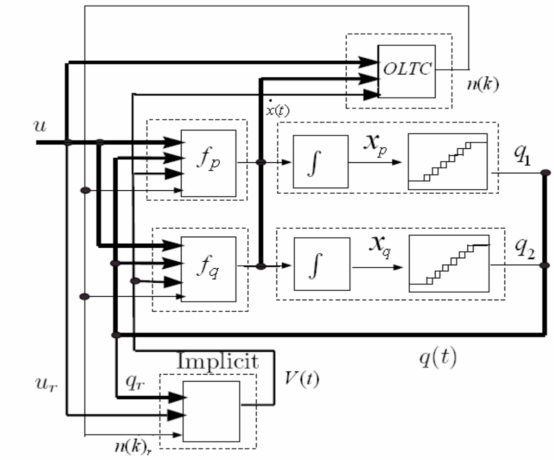

图 4. 混杂电力系统的方框图

图 4 描述了该系统的各个模块之间的关系。如前所述，该系统的几个模块已经用虚线表示出来，f_p, f_q 分别代表静态函数模型，用来描述(3)~(4)式；积分器和量化器被合称为量化积分器；Implicit 模型用来描述(5)~(6)的动态；而 OLTC 是离散子系统，用来产生该电力系统的运行模式。可以分别为这几个模块建立 DEVS 原子模型，根据文献[2]，使用 QSS 方法的量化积分器的 DEVS 模型可定义为：

$$M_1 = (X, Y, S, \delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, \lambda, ta), \text{ where}$$
$$X = \mathbb{R} \times \{\text{inport}\}$$
$$Y = \mathbb{R} \times \{\text{outport}\}$$
$$S = \mathbb{R}^2 \times \mathbb{Z} \times \mathbb{R}_0^+ \infty$$
$$\delta_{\text{int}}(s) = \delta_{\text{int}}(x, d_x, k, \sigma) = (x + \sigma \cdot d_x, d_x, k + \text{sgn}(d_x), \sigma_1)$$
$$\delta_{\text{ext}}(s, e, x_u) = \delta_{\text{ext}}(x, d_x, k, \sigma, e, x_v, port) = (x + e \cdot d_x, x_v, k, \sigma_2)$$
$$\lambda(s) = \lambda(x, d_x, k, \sigma) = (Q_{k+\text{sgn}(d_x)}, \text{outport})$$
$$ta(s) = ta(x, d_x, k, \sigma) = \sigma$$

其中：

$$\sigma_1 = \begin{cases} \dfrac{Q_{k+2} - (x + \sigma \cdot d_x)}{d_x} & \text{if } d_x > 0 \\ \dfrac{(x + \sigma \cdot d_x) - (Q_{k-1} - \varepsilon)}{|d_x|} & \text{if } d_x < 0 \\ \infty & \text{if } d_x = 0 \end{cases}$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} \dfrac{Q_{k+1} - (x + e \cdot x_v)}{x_v} & \text{if } x_v > 0 \\ \dfrac{(x + e \cdot x_v) - (Q_k - \varepsilon)}{|x_v|} & \text{if } x_v < 0 \\ \infty & \text{if } x_v = 0 \end{cases}$$

而其他的模型也可根据其内部逻辑建立 DEVS 模型。

3 模型的实现和验证方法

为了利用该算法的思路对图 3 所示的系统进行仿真，我们可以利用根据 DEVS 理论用 C++代码实现其建模过程，也可以利用基于 DEVS 的仿真软件实现。例如 CD++[14]、PowerDEVS[15]等软件都支持 DEVS 建模。在 PowerDEVS 中，我们可以利用图 4 所示的关系建立以下模型（图 5）：

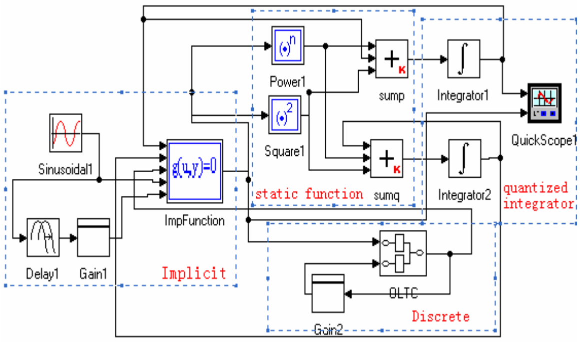

图 5. 实例的 PowerDEVS 模型

虚线内分别描述了各个模块的组成，每个组件分别代表一个原子模型，经过组合形成了整个系统的组合模型。其中，OLTC 模块内部可以按照（5），（6）式进行设置。通过给定的关系形成该模型后，便可以对它进行仿真，利用 QuickScope 可观察电压 V 和 $n(k)$ 的运行结果，根据该结果可对系统模型进行分析于验证。

4 结论

本文提出了用 DEVS 理论结合 QSS/QSS2 方法进行电力系统混杂算法的研究。由于电力系统的混杂特性，要对其进行分析与仿真，就必须综合考虑连续和离散两种动态行为，而利用具有 DEVS 机制的 QSS 方法将电力系统的连续动态转换为离散事件动态之后，用具有离散事件机制的算法对电力系统进行仿真，克服了传统仿真的诸多缺陷，有利于提高仿真的速度和精度。

参考文献

[1] E. Kofman, “Quantization-Based Simulation of Differential Algebraic Equation Systems”. Technical Report LSD0204, LSD,UNR, 2002.

[2] S. J. Junco, “Discrete Event Representation of Continuous Systems with Applications in Simulation and Control”. IMACS Multiconference CESA 2003-Lille,France,9-11 July 2003

[3] Cellier, F.E. and E. Kofman, Continuous System Simulation, Springer-Verlag, New York, 2005.

[4] E. Kofman and Sergio Junco, “Quantized-State Systems A DEVS Approach for Continuous System Simulation”.Vol.3369, pp.49-58,1998.

[5] Zeigler, B.P., J.S. Lee, “Theory of quantized systems: formal basis for DEVS/HLA distributed simulation environment”. SPIE Proceedings.

[6] Arturo I. Concepcion and Bernard P. Zeigler. “DEVS Formalism: A Framework for Hierarchical Model Development”. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol.14, No 2, February 1988.

[7] Ernesto Kofman, “Discrete Event Simulation of Hybrid Systems”.

[8] Kofman, E., “A Second Order Approximation for DEVS Simulation of Continuous Systems”. Simulation, 78(2), 76-89(2002a).

[9] Ernesto Konfman, “Quantization-Based Simulation of Hybrid systems”.

[10] 赵洪山，米增强，田建设，等.混杂系统理论及其在电力系统的应用前景.华北电力大学学报，2002，29（2）：6－12.

[11] Ernesto Kofman, “Discrete Event Based Simulation and Control of Continuous Systems”. Doctor Thesis. Universidad Nacional de Rosario.

[12] Larsson M, Popovic D, Hill D J. “Limit Cycle in Power System Due to OLTC Deadband and Load-voltage Dynamics”. Electric Power Systems Research, 1998,47(32):181-188.

[13] 赵洪山，米增强，牛东晓，等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究. 中国电机工程学报，2003，23（1），20－25.

[14] Wainer, G. “CD++: a toolkit to define discrete-event model”. Software, Practice and Experience. Wiley. Vol.32, No.3. pp.1261-1306. November 2002.

[15] Kofman, E., M. Lapadula, and E. Pagliero, “PowerDEVS: A DEVS-based Environment for Hybrid Sysem Modeling and Simulation”. Technical Report LSD0306,LSD, Universidad Nacional de Rosario, Argentinien. Submitted to Simulation.

作者简介：

张纪平（1979-）,男，青海石油局人，汉族，在读硕士，主要从事电力系统自动化研究。

赵洪山（1965-），男，河北保定人，汉族，副教授，主要研究方向为电力系统混杂建模与动态过程仿真，电力系统早期预警机理以及电力系统广域动态安全控制。

吴亚楠（1980-）,女，辽宁鞍山人，汉族，在读硕士，主要从事电力系统自动化研究。

刘靖辉（1981-），男，吉林辉南人，汉族，在读硕士，主要从事电力系统自动化研究。