

同步发电机组戴维南等值模型

任洪林¹, 张磊², 邬桐¹, 孟斌¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 国网重庆市电力公司经济技术研究院设计中心, 重庆 401121)

摘要: 为了解决电网机电暂态仿真中利用高阶发电机实用模型和梯形法而引起的机网方程“维数灾”和迭代求解问题, 基于戴维南等值原理, 利用梯形积分法建立了线性发电机组的离散时域 $d-q$ 轴和 $x-y$ 轴戴维南等值模型. 使得在仿真中发电机可以选择高阶实用模型, 而不影响机网方程的维数. 该模型在一段时间内与原发电机组模型等值, 而非一个积分步长, 从而减少了修正模型的计算量. 功角计算取决于相应变量的过去时间值, 从而解决了利用梯形法求解机网方程所造成的迭代求解问题. 仿真结果表明, 模型具有较高的仿真精度和数值计算稳定性.

关键词: 机电暂态仿真; 戴维南等值模型; 同步发电机组; 数值仿真

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.013

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2016)01-0062-04

The Thevenin Equivalent Model of Generators

REN Hong-lin¹, ZHANG Lei², WU Tong¹, MENG Bin¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Design Center of Chongqing Economic and Technical Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401121, China)

Abstract: In order to solve the dimension disaster of simulation equation caused by high order generator utility model and the trapezoidal method for power system transient simulation and the problem of iterative solution for equations between generators and network, a discrete time-domain $d-q$ axis and $x-y$ axis of Thevenin's dynamic equivalent model is established using trapezoidal integration method on the bases of the Thevenin equivalent principle. A more accurate generator model for simulation should be chosen to avoid affecting the simulation equation dimension. The model, over a period of time, is equivalent to the generator model instead of an integration step, thereby reducing the computation of modifying model. The value of power angle depends on the corresponding variables' values in the past time, which consequently solves the problems caused by the use of iterative solution of trapezoidal method for solving machine network equations. The simulation results show that, the model has a high simulation precision and stability.

Keywords: transient simulation; thevenin equivalent model; synchronous generator; digital simulation

收稿日期: 2015-02-07

作者简介: 任洪林(1961—), 男, 副教授;

张磊(1991—), 男, 硕士研究生, E-mail: honglin@hit.edu.cn.

0 引言

系统的等值方法可以极大地降低仿真方程的维数,减少仿真计算量,在电网暂态仿真中得到了广泛的应用^[1-3]. 这些方法将包含多台发电机组的外网络等值成一台发电机. 其等值精度受到诸如发电机运行方式等因素的影响^[4]. 根据电网暂态过程的不同阶段,选择不同阶次的发电机模型和网络模型,也是降低仿真方程维数、提高仿真效率的重要方法^[5-14]. 这一方法的关键问题是如何准确甄别系统暂态过程处于何种阶段以及如何实现各种模型的合理转换.

文 [1-14] 的研究结果表明: 选择不同阶次的发电机模型对电网暂态仿真结果有较大的影响; 模型阶次越高,暂态仿真结果越接近实际暂态过程. 然而高阶发电机模型也可能造成仿真方程的“维数灾”^[15-16]. 为此,本文利用戴维南等值原理,研究了发电机组的等值问题. 在系统小扰动条件下,首先建立发电机机端电压与电流的积分关系式,而后利用梯形积分法建立了发电机组的离散时域 d-q 轴与 x-y 轴的戴维南等值模型. 与现有的发电机组离散时域等值模型相比^[17-19],该模型的变量数少,且在一个时间段内与原发电机组等值,而非一个积分步长. 减少了修正模型的计算量. 利用该模型对电网进行暂态仿真,可以避免由于采用梯形法带来的机网方程的迭代求解,同时也可以将用于稳态电网分析的等值方法应用于暂态仿真之中.

1 同步发电机组时域戴维南等值模型

发电机组主要由同步发电机、励磁调节系统、原动机及调速系统组成. 选择文 [20] 提供的 3 型五阶发电机模型、1 型四阶励磁调速系统模型和 1 型一阶汽轮机及调速器系统模型为例,讨论发电机组戴维南等值模型的建立方法. 若无特殊说明,文中所用符号均采用文 [20] 之规定. 在系统小扰动时,选择发电机组输入变量 $x_b = [\dot{I}_d, I_q, V_t, P_e]^T$, 输出变量 $y = [E''_q, E''_d, \delta]^T$, 则发电机组可用下列线性状态方程描述:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_b x_b(t) + B_F F(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

式中: $x = [\Delta\omega, \delta, E'_q, E''_q, E''_d, \mu, v_R, v_A, E_f, v_F]^T$ 为发电机组内部状态向量; $F = [\omega_{ref}, v_{ref}, \omega_B, E_{fd0}]^T$ 为

发电机组内部激励源向量; A, B_b, B_F 和 C 为状态方程的常系数矩阵. 设系统小扰动起始时间为 $t_0 = 0$ 时刻,则式(1)的解析解可以写成两项和的形式:

$$x_A(t) = x^f(t) + x''(t) \quad (3)$$

式中:

$$x^f(t) = \int_0^t e^{A\tau} B_F F(t-\tau) d\tau + e^{At} x(0) \quad (4)$$

$$x''(t) = \int_0^t e^{A\tau} B_b x_b(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

式(4)中: $x(0)$ 为状态变量的初始值. 与之相对应,发电机组输出变量 y 亦表示为两项和的形式:

$$y(t) = y^f(t) + y''(t) \quad (6)$$

式中:

$$y^f(t) = Cx^f(t) \quad (7)$$

$$y''(t) = \int_0^t h(\tau) x_b(t-\tau) d\tau \quad (8)$$

式(8)中:

$$h(t) = Ce^{At} B_b \quad (9)$$

式(6)反映了发电机组外端子输入变量与输出变量的函数关系. 因此,式(6)可以视为发电机组的时域戴维南等值模型.

2 同步发电机组离散时域戴维南等值模型

利用数值积分法对式(6)进行积分运算,可以建立发电机组离散时域等值模型. 取积分步长为 T , 在时间 $t = nT$ 时刻,利用梯形积分法对式(6)进行计算,可得:

$$y(n) = H_{00} x_b(n) + f_{00}(n) \quad (10)$$

式中:

$$H_{00} = \frac{T}{2} h(0) = \frac{T}{2} C B_b \quad (11)$$

$$f_{00}(n) = \begin{bmatrix} E_{q00}(n) \\ E_{d00}(n) \\ \delta_{00}(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{2} h(n) x_b(0) + T \sum_{k=1}^{n-1} h(n) x_b(n-k) + y^f(n) \quad (12)$$

式中: $x_b(0)$ 为输入变量的初始值. 对本文中选择的发电机组模型而言,式(11)有:

$$H_{00} = \frac{T}{2} \begin{bmatrix} \frac{x''_d - x'_d}{T''_{d0}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_q - x''_q}{T'''_{q0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(10)~式(13),可得:

$$E''_d(n) = \frac{T x_q - x''_q}{2 T''_{q0}} I_q(n) + E_{d00}(n) \quad (14)$$

$$E''_q(n) = \frac{T x'_d - x'_d}{2 T''_{d0}} I_d(n) + E_{q00}(n) \quad (15)$$

$$\delta(n) = \delta_{00}(n) \quad (16)$$

由五阶发电机定子电压方程及式(14)和式(15),可得发电机组机端电压与电流方程为:

$$\begin{bmatrix} E_{d00}(n) \\ E_{q00}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d(n) \\ V_q(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_a & x_{dq} \\ x_{qd} & r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d(n) \\ I_q(n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{式中: } x_{dq} = -x''_q - \frac{T x_q - x''_q}{2 T''_{q0}}; x_{qd} = x''_d - \frac{T x'_d - x'_d}{2 T''_{d0}}.$$

式(17)即为在 nT 时刻发电机组的 $d-q$ 轴离散时域戴维南等值模型。 E_{q00} 和 E_{d00} 可视为发电机组 q 轴和 d 轴等值电势。 x_{qd} 和 x_{dq} 可视为发电机组 q 轴和 d 轴等值电抗。其等效电路如图1所示。

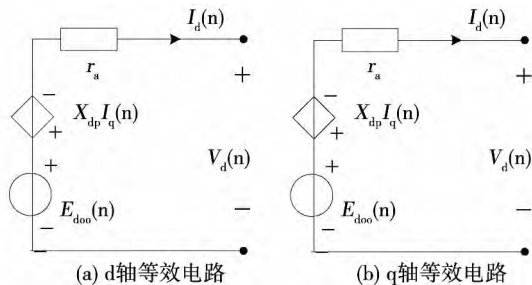


图1 发电机组 $d-q$ 轴离散时域戴维南等效电路模型

由式(12)和式(16)可见,功角变量 $\delta(n)$ 取决于输入变量 x_b 的过去时间值。对式(17)进行 park 变换,可得到发电机组 $x-y$ 轴的离散时域戴维南等值模型,即:

$$\begin{bmatrix} E_{x00}(n) \\ E_{y00}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x(n) \\ V_y(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x(n) \\ I_y(n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= r_a + \frac{x_{dq} + x_{dq}}{2} \sin(2\delta_{00}) \\ Z_{22} &= r_a - \frac{x_{dq} + x_{dq}}{2} \sin(2\delta_{00}) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{x_{dq} - x_{qd}}{2} - \frac{x_{dq} + x_{qd}}{2} \cos(2\delta_{00}) \\ Z_{21} &= \frac{x_{qd} - x_{dq}}{2} - \frac{x_{dq} + x_{qd}}{2} \cos(2\delta_{00}) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} E_{x00}(n) \\ E_{y00}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\delta_{00} & \cos\delta_{00} \\ -\cos\delta_{00} & \sin\delta_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{d00}(n) \\ E_{q00}(n) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(19)和式(20)可视为发电机组 $x-y$ 轴的等值阻

抗与等值电势。在每一步积分步长的计算中,其等值阻抗与电势需要进行修正。

由式(12)可见,利用建立的发电机组等值模型对电网进行暂态仿真时,将涉及卷积计算。随着仿真时间的增大,其计算量将增大。为此,可将仿真时间分成若干段。当完成一段时间的仿真后,可按式(3)重新确定发电机组的初始值,并重新建立发电机组的戴维南等值模型。这一过程称之为修正模型。为减少仿真计算量,可按式近似选取仿真时间的分割长度 T_0

$$T_0 = \frac{N_x \cdot T}{2} \quad (23)$$

式中: N_x 为发电机组状态变量数。

3 算例分析

以单机无限大系统为例验证发电机组戴维南等值模型的正确性。线路电导 $G = 0.2349$, 电纳 $B = -3.5649$ 。发电机组模型选择本文中的文[20]模型。其参数见表1。在初始时刻,发电机处于稳态,其机端电压 $\dot{V}_t = 1 \angle 16.1359^\circ$, 电流 $\dot{I} = 1 \angle 11.868^\circ$ 。在时间 $t = 3$ s 时刻,发电机控制参数 V_{ref} 由 1.0 改变为 1.02。机端电压如图2所示。在图2中,实线为利用 PSASP 软件的仿真结果,其积分步长 $T = 0.01$ s。虚线为利用戴维南等值模型的仿真结果,其积分步长 $T = 0.6$ s。图3给出了发电机机端短路的仿真结果。

表1 发电机参数

参数	T'_{d0}	T''_{d0}	T''_{q0}	T_J	x_d	x'_d	x''_d
参数值	8.375s	0.2s	1.85s	18.61s	0.6414pu	0.0762pu	0.0473pu
参数	x_q	x''_q	D	r_a	K_r	K_a	K_f
参数值	0.0762pu	0.0473pu	0.0	0.0pu	1.0	50.0	0.04
参数	T_r	T_a	T_f	T_e	K_i	δ_i	T_s
参数值	0.03s	0.03s	0.04s	0.50s	1.0	5.0	0.5s

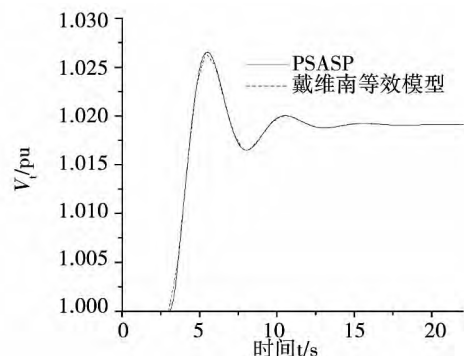


图2 积分步长为 0.6 s 时的机端电压仿真曲线

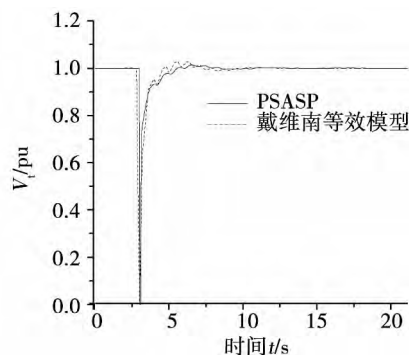


图3 大扰动条件下机端电压仿真曲线

故障发生时间 $t = 3 \text{ s}$, 持续时间 0.1 s . 励磁电压调节器输出上限和下限设为 $Efd_{\max} = 1.5$, $Efd_{\min} = 0.5$. 在图3中, 实线为 PSASP 仿真结果, 其积分步长 $T = 0.01 \text{ s}$. 虚线为利用戴维南等值模型的仿真结果, 其积分步长 $T = 0.2 \text{ s}$.

由图2和图3可见, 两种方法的仿真结果基本一致. 但利用本文提出的模型仿真, 其积分步长远大于利用 PSASP 软件的积分步长. 在上述仿真中, 利用 PSASP 仿真时, 在积分步长 $T = 0.1$ 时, 仿真结果均发散.

4 结 论

基于发电机实用数学模型, 利用梯形法, 首次提出了发电机组离散时域戴维南等值模型. 若发电机组为线性模型, 则无论 $d-q$ 轴还是 $x-y$ 轴发电机组的离散时域戴维南等值模型为线性模型. 提出的发电机组等值模型在一段时间内与原系统等值, 而非一个积分步长时间内. 这减少了修正模型的计算量. 仿真结果表明: 模型具有较高的数值计算精度和稳定性. 提出的模型建立过程简单, 表述形式简洁, 具有实用价值.

参 考 文 献:

- [1] KIM H, JANG G, SONG K. Dynamic Reduction of the Large-scale Power Systems Using Relation Factor [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1696 - 1699.

- [2] OURARI M L, DESSAINT L A, VAN-QUE D. Dynamic Equivalent Modeling of Large Power Systems Using Structure Preservation Technique [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1284 - 1295.
- [3] 胡杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法 [J]. 电网技术, 2006, 33(24): 26 - 30.
- [4] 文俊, 刘天琪, 李兴源, 等. 在线识别同调机群的优化支持向量机算法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 80 - 85.
- [5] 黄宇保, 王建全. 基于 ANN 和等值发电机模型的快速暂态稳定计算 [J]. 机电工程, 2010, 27(6): 78 - 82.
- [6] 李晓辉, 罗敏, 刘丽霞, 等. 动态等值新方法及其在天津电网中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 61 - 66.
- [7] 翁华, 徐政, 王兴刚, 等. 南方电网交直流系统的简化方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(3): 108 - 112.
- [8] 宋洪磊, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于 WAMS 和改进拉普拉斯特征映射的同调机群在线识别 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2157 - 2164.
- [9] 王庆平, 陈超英, 陈礼义. 面向对象的同步发电机自适应暂态模型 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(6): 87 - 91.
- [10] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态—电磁暂态混合仿真 [J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26 - 30.
- [11] 吴红斌, 丁明, 李生虎, 等. 发电机和负荷模型对暂态稳定性影响的概率分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 19 - 21.
- [12] 许国瑞, 王红宇, 刘晓芳, 等. 同步发电机不同实用模型的大扰动特性对比研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 67 - 73.
- [13] 许国瑞, 汤涌, 刘晓芳, 等. 汽轮发电机不同模型小扰动特性 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 302 - 309.
- [14] 戴家祯. 电网暂态过程数值仿真中的同步电机模型 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 25 - 28.
- [15] 余一平, 宋忠鹏, 鞠平, 等. 同步发电机简化模型的等效阻尼系数分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 15 - 20.
- [16] 彭伟, 徐泰山. 电力系统动态等值中发电机的选择方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 48 - 52.
- [17] 徐英, 白雪峰, 郭志忠. 采用动态多维阶数控制的暂态稳定计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 81 - 85.
- [18] 吴红斌, 丁明. 用于电力系统暂态稳定仿真的可变步长牛顿法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 36 - 41.
- [19] 江涵, 江全元. 一种可变步长的暂态稳定自适应修正牛顿组合法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 105 - 112.
- [20] 电力统分析综合程序暂态稳定计算用户手册 7.0 版 [M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010, 6: 155 - 205.

(编辑: 关 毅)