

基于 Bond Graph 的风力发电机建模

周卫, 张尧, 夏成军, 丁欣, 罗宗杰

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 简单介绍了 Bond Graph 的状态变量、标准元件和建模方法等基本概念。基于 Bond Graph 能深入描述系统内部变化过程, 对复杂系统物理模型研究更具优势, 将其引入电力系统, 在笼型三相异步风力发电机数学模型的基础上, 提出基于 Bond Graph 理论的风力发电机建模与仿真, 重点研究分析了发电机 abc- $\alpha\beta$ 坐标变换的 Bond Graph 模型, 以及描述发电机定子和转子之间电磁联系的惯性场、电量与机械量转换关系以及描述发电机机械转矩的 Bond Graph 模型, 在此基础上得出完整的风力发电机模型, 并利用 20-Sim 软件进行了仿真, 仿真结果验证了该模型的正确性。

关键词: Bond Graph; 建模; 风力发电机; 仿真

Wind-driven generator modeling based on Bond Graph

ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, DING Xin, LUO Zong-jie
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper briefly introduces the basic concepts of Bond Graph model, such as state variables, standard components and modeling approach. Bond Graph modeling can describe the internal variations in the system and has advantages on research of complicated physical model, so it is introduced into power system. Based on mathematic model of three-phase asynchronous motor, this paper brings forward wind-driven generator modeling using Bond Graph theory. It focuses on abc coordinate system to $\alpha\beta$ coordinate system model, inertia field model, electricity and mechanical quantity conversion model and mechanical part model, then achieves the whole model of wind-driven generator and carries out simulation by 20-Sim to verify its correctness.

Key words: Bond Graph; modeling; wind-driven generator; simulation

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0016-04

0 引言

Bond Graph 即键合图, 是美国麻省理工学院的 Paynter 教授于 1959 年创建的, 描述系统功率传输、转化、贮存、耗散的图形, 尔后由 Karnopp DC 和 Rosenberg RC 等将其逐步发展完善和推广使用^[1]。Bond Graph 能形象直观地考虑系统中的非线性环节, 构成电、磁、机械、液压、气动、热力等工程系统的动态模型, 且模型中的状态变量均为物理变量, 可深入地描述系统内部状态的变化过程, 与系统状态方程之间存在着其它方法无法比拟的一致性, 可以根据系统的键合图有规律地推导出相应的数学模型^[1]。目前, Bond Graph 建模已在工程技术领域的动态分析与控制研究中得到了广泛应用。

基于 Bond Graph 对复杂系统物理模型研究的优势, 本文采用该理论进行风力发电机建模。

1 键合图建模的基本概念

1.1 键合图的状态变量

键合图方法总共只采用了四种状态变量, 其中势变量和流变量统称为功率变量, 动量变量和变位变量统称为能量变量, 这四种广义变量与各种工程系统中的物理参量的对应关系如表 1 所示。

表 1 键合图中广义变量及其对应的物理变量
Tab.1 Generalized variables and corresponding physical variables in Bond Graph

物理变量 广义变量	机械平动	机械转动	电
势 e	力 F	转矩 τ	电压 e
流 f	速度 v	角速度 ω	电流 i
动量 p	动量 p	角动量 p_r	磁通量变量 λ
变位 q	位移 x	转角 θ	电荷 q

1.2 键合图的通口、键和因果线

键合图方法是一种基于功率的方法, 在实际工程系统中, 相互作用的子系统之间或元件之间必然存在着功率的交换和传递, 这就是键合图方法描述系统的理论依据。各子系统或元件之间相互连接的地方就是功率传递的地方, 称之为通口, 连接相邻两子系统或元件的通口的半箭头称为键, 在键的某一端且与键垂直的短划称为因果线。每一根键都有两个对应的变量, 即势变量和流变量, 两者的方向总是相反, 因果线画在势变量指向的那一端^[2]。如图 1 所示。



图 1 键和键上的因果线

Fig.1 Key and the line of cause and effect

1.3 键合图的标准元件

键合图共有十一种标准元件, 按通口的数量分为三种: 一通口元件, 二通口元件和三通口元件。一通口元件包括势源 Se 、流源 S_f 、阻性元件 R 、容性元件 C 和惯性元件 I ; 二通口元件包括变换器 TF 、回转器 GY 、调制变换器 MTF 、调制回转器 MGY ; 三端口元件即 0 节点及 1 节点。参考文献[2]对这十一种元件的功能及其可能的因果关系作了详细介绍。

2 风力发电机数学模型

目前我国采用较多的风力发电机是恒速恒频风电机组, 即恒速风机—笼型异步发电机系统, 其工作原理是利用电容器进行无功补偿, 在高于同步转速附近作恒速运行, 采用定桨距失速或主动失速桨叶, 单速或双速发电机运行^[3]。笼型异步发电机与同步发电机相比, 并网时没有严格的频率、相角要求, 而且其转子整体强度、刚度都比较高, 适合风力发电这种特殊场合, 所以近二十年来发展很快, 其技术日趋成熟^[4-5]。为方便分析及建模, 本文在研

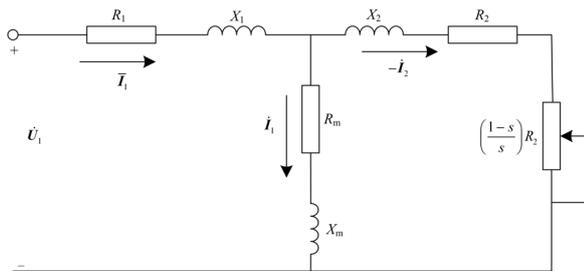


图 2 三相异步电动机等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of three-phase asynchronous motor

究笼型异步发电机内部电磁和机械过程时, 仍以电动机案例分析。三相异步电动机常用等效电路如图 2 所示^[4]。

3 风力发电机 Bond Graph 建模

3.1 abc 坐标到 $\alpha\beta 0$ 坐标转换的建模

为便于用 Bond Graph 建模, 先将 abc 异步电机参数归算到 $\alpha\beta 0$ 坐标系下^[6-7], 如图 3、图 4 所示。

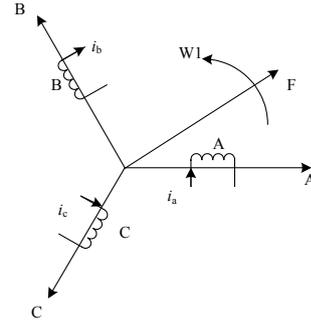


图 3 abc 坐标系

Fig.3 abc coordinate system

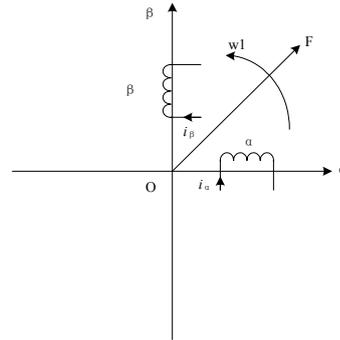


图 4 $\alpha\beta 0$ 坐标系

Fig.4 $\alpha\beta 0$ coordinate system

$\alpha\beta 0$ 坐标系统是固定在定子上的直角坐标系, 它也是用两个坐标或两个实数来表示空间的一个点 (综合相量的端点), 这一坐标系统的转速等于零^[7]。用 abc 和 $\alpha\beta 0$ 坐标表示的电磁量各分量间的变换公式如下 (假设三相平衡, 以电流变量 i 为例):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bond Graph 建模如图 5 所示, $MSe: V_a$, $MSe: V_b$, $MSe: V_c$ 有相同的幅值, 但互差 $2\pi/3$ 相位角, 可调变换器 $TF: m_1$, $TF: m_2$, $TF: m_3$, $TF: m_4$, $TF: m_5$, 它们的值分别为:

$$m_1 = \sqrt{3/2}, m_2 = m_3 = -\sqrt{6}, m_4 = \sqrt{2}, m_5 = -\sqrt{2}$$

再通过共0-结和共1-结^[8]，就转换成了 $\alpha\beta 0$ 坐标下的值。

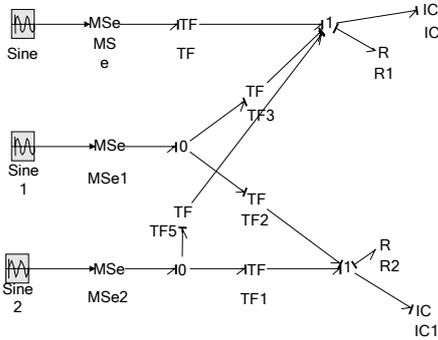


图5 abc坐标转变成 $\alpha\beta 0$ 坐标的Bond Graph表示

Fig.5 Bond Graph of abc coordinate system to $\alpha\beta 0$ coordinate system

3.2 惯性场的建模

发电机的Bond Graph建模关键是惯性场I的模型和方程，因为惯性场I连接了定子和转子，也就是反应了电磁感应原理，联系着电和磁。2端口的惯性元件I: α , I: β 。它们包含的参数之间的关系如下^[8,9]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\alpha s} \\ \lambda_{\alpha r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\alpha r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\beta s} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\beta s} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

上述方程中， $\lambda_{\alpha s}$, $\lambda_{\beta s}$, $\lambda_{\alpha r}$ 和 $\lambda_{\beta r}$ 是各绕组的磁链。Bond Graph建模如图6所示。

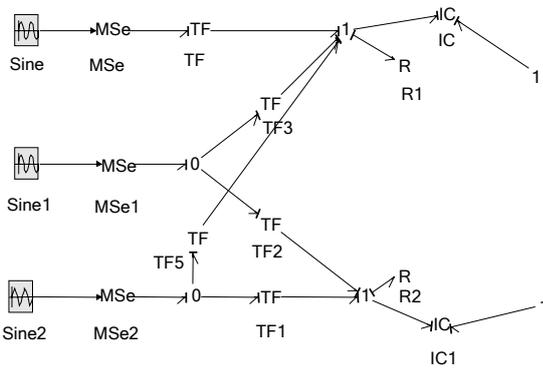


图6 惯性场I的建模

Fig. 6 Inertia field model

3.3 电量与机械量的转换建模

在异步电机的Bond Graph中，可调回转器MGY实现电量与机械量的联系，具体包括两种转换^[9]:

(1) 场中所受的力: $F = B(i_r)li$

(2) 导体两端所产生的电压: $U = B(i_r)Lv$,
其功能示意图如图7所示。

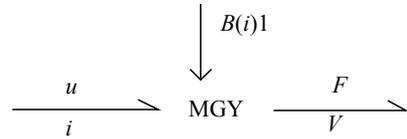


图7 MGY功能示意图

Fig.7 Functional diagram of MGY

假设磁动势呈理想的正弦分布，并忽略磁损耗和磁饱和，在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中，对称异步电机的定子电压表达式如下^[7]:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & 0 & L_m \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R_s + L_s \frac{d}{dt} & 0 & L_m \frac{d}{dt} \\ L_m \frac{d}{dt} & L_m \frac{d}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} & L_r \frac{d}{dt} \\ -L_m \frac{d}{dt} & L_m \frac{d}{dt} & -L_r \frac{d}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

上述方程揭示了定子电压和定子、转子电流之间的关系。

另外，一个P极电机的电磁转矩表达式为^[7]:

$$T_e = \frac{P}{2} [i_{\alpha r} (L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r}) - i_{\beta r} (L_m i_{\alpha s} + L_r i_{\alpha r})] \quad (5)$$

电磁转矩还可以写成:

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + c\omega_m + T_L \quad (6)$$

公式(6)右边的转矩分别是转子的惯性转矩，制动转矩和负载转矩。公式(4)~(6)各变量及参数意义如下: $V_{\alpha s}$ 和 $V_{\beta s}$ 是 α 和 β 轴的定子电压; $i_{\alpha s}$ 和 $i_{\beta s}$ 是 α 和 β 轴的定子电流; $i_{\alpha r}$ 和 $i_{\beta r}$ 是 α 和 β 轴的转子电流; R_s 和 R_r 是定子和转子的电阻; L_s , L_m , L_r 是定子的自感系数, 互感系数, 转子的自感系数; T_e 和 T_L 是电磁转矩和机械负载转矩; J 是转子的惯性转动惯量, c 是粘性电阻系数; ω_r 和 ω_m 分别是转子的电磁和机械角速度; P 是极对数。因为有互感和自感的影响, 所以每相各用2个回转器MGY^[8]。其中可调回转器的参数如下:

$$\text{MGY: } r = L_m i_{\beta s}, \text{ MGY: } r_1 = L_r i_{\beta r};$$

$$\text{MGY: } r_2 = L_m i_{\alpha s}, \text{ MGY: } r_3 = L_r i_{\alpha r}。$$

Bond Graph建模如图8所示。

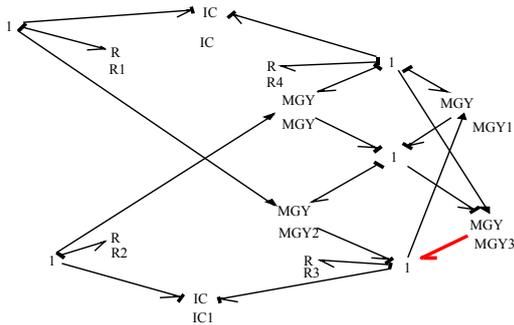


图8 电量和机械量转换模型

Fig.8 Electricity and mechanical quantity conversion model

3.4 机械转矩的建模

这部分的Bond Graph比较简单, 因为这部分只是量之间的转化问题, 用变换器TF就可以了^[11]。如图9所示。

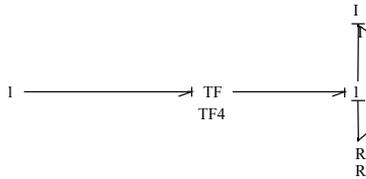


图9 机械部分的Bond Graph

Fig.9 Bond Graph of mechanical part

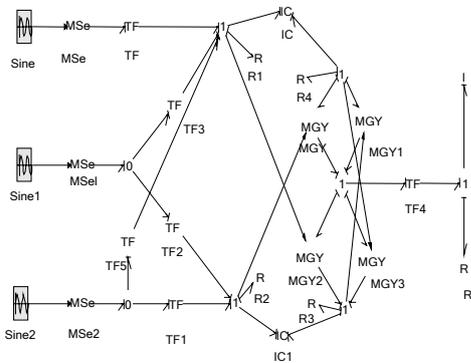


图10 风力发电机的 Bond Graph 模型

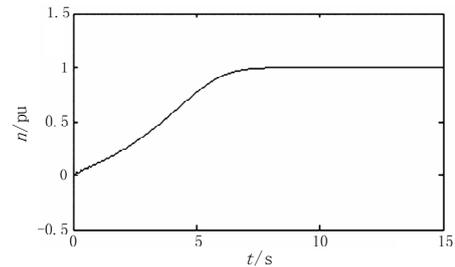
Fig.10 Bond Graph model of wind-driven generator

4 仿真分析

假定发电机定子三相对称, 每相电阻 0.1Ω , 电感 0.02 H , 三相间互感 0.01 H , 转子电阻 0.05Ω , 电感 0.02 H , 转子惯性转动惯量 $J=0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 粘性电阻系数 $c=0.15 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$, 风速保持发电机额定风速。采用 20-Sim 软件对发电机起动过程中转子转速 n 进行仿真, 仿真时间设定为 15 s , 结果如图 11 所示。

由图中可以看出, 发电机转子达到额定转速所

需时间大概为 8 s , 与理论值相符。

图11 转子转速 n Fig.11 Generator speed n

5 结论

目前国内一般采用 Matlab/Simulink 和 PSCAD/EMTDC 等软件进行风力发电机建模, 由于 Bond Graph 对复杂系统物理模型的研究更具优势, 且如前所述, 采用 Bond Graph 建模时, 模型中的状态变量均为物理变量, 可深入地描述系统内部状态的变化过程^[2], 故本文基于 Bond Graph 对风力发电机进行了建模, 先针对风电发电机实现电磁转换的各个环节进行 Bond Graph 建模, 然后得出完整的风力发电机模型, 并基于 20-Sim 进行了仿真验证, 具有一定的理论价值。下一步要做的工作, 一是进行风力、风轮机、传动机构等的 Bond Graph 建模, 构成完整的风力发电系统模型, 二是采用仿真软件 20-Sim 对完整风电系统模型进行仿真分析。

参考文献

- [1] 王中双, 陆念力. 键合图理论及应用研究若干问题的发展及现状[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(1): 78-83. WANG Zhong-shuang, LIU Nian-li. A Review of Bond Graph Theory and Its Application[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(1): 78-83.
- [2] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007. 5-15. WANG Zhong-shuang. Bond Graph Theory and Its Application in Dynamic Systems[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007. 5-15.
- [3] 刘细平, 林鹤云. 风力发电机及其风力发电控制技术综述[J]. 大电机技术, 2007(3): 20-23, 58. LIU Xi-ping, LIN He-yun. Overview of Wind Power Generators and the Control Technologies[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007(3): 20-23, 58.
- [4] 顾绳谷. 电机及拖动基础(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 95-100. GU Sheng-gu. Basis of Electric Machines and Drivers, Third Edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 95-100.

(下转第 24 页 continued on page 24)

数不同。

4 结论

本文以土壤直埋的三根单芯电缆的温度场和电场的分析为例,通过对得到的数据进行分析,得出了地下电缆周围温度和电场强度之间具有近似的线性关系的结论。当测量出地下电缆运行状态下温度和电场强度中的一个,我们可以根据得出的关系估算出电缆的另外一个数值。可以很方便地估算电缆载流量的同时也兼顾到对电缆安全的检测,因此,本文的结论有较强的工程应用意义,应用前景非常广阔。为了使本文的研究结论更好地运用在电缆的在线监测工程中(包括安全监测与载流量监测),需要进行更多的现场试验,对计算结论进行更为深入的验证。

参考文献

[1] 王春江. 电线电缆手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
WANG Chun-jiang. The Manual of Wires and Cables[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

[2] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
KONG Xiang-qian. The Application of Finite Element Method in Heat Transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[3] Hanna M A, Chikhani A Y, Salama M M A. Thermal Analysis of Power Cables in Multi-layered Soil [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8 (3): 761-771.

[4] 赵镇南. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
ZHAO Zhen-nan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

[5] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (8): 185-189.
LIANG Yong-chun, LI Yan-ming, CHAI Jin-ai, et al. A New Method to Calculate the Steady-state Temperature Field and Ampacity of Underground Cable System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (8): 185-189.

[6] 孙敏, 孙亲锡, 等. 工程电磁场基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001.
SUN Min, SUN Qin-xi, et al. The Basics of the Engineering Electromagnetic Fields [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[7] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
MA Guo-dong. Ampacity of Wires and Cables[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2009-06-07

作者简介:

罗 涛(1982-), 男, 主要从事输配电设备的状态监测和故障诊断方面的研究; E-mail: lt0618@163.com

陈民铀(1954-), 男, 主要从事电磁信号检测与智能信息处理的研究;

曾 灿(1972-), 男, 主要从事配网及工程管理工作。

(上接第 19 页 continued from page 19)

[5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(第 3 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.190-204.
CHEN Bo-shi. Motor Control Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.190-204.

[6] 吴学光, 张学成, 印永华. 异步发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 70-74.
WU Xue-guang, ZHANG Xue-cheng, YIN Yong-hua. Application of Models of the Wind Turbine Induction Generators(WTIGS) to Wind Power System Dynamic Stability Analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 70-74.

[7] Kim Jongbaeg, Bryant M D. Bond Graph Model of a Squirrel Cage Induction Motor with Direct Physical Correspondence[Z]. Ausin TX, 787 12-1063.

[8] Margolis D, Shim T. Bond Graph Modeling for Non-linear Hydro-mechanical Systems[A]. in: Proc. IMechE

Vol. 219 Part K: J. Multi-body Dynamics[C]. 2005.

[9] Sirivadhna K, Richards E F, Anderson M D. The Application of Bond Graphs to Electrical Machinery and Power Engineering[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983,102(5).

[10] Sanghoon Lee, Bryant D M, Lalit Karlapalem. Model- and Information Theory-Based Diagnostic Method for Induction Motors[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 12.

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-05-04

作者简介:

周 卫(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: lanyinglantian@163.com

张 尧(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统运行分析与控制、电压稳定性等方面的教学与科研工作;

夏成军(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 及 FACTS。