

# 基于 RTDS 的负荷模型验证及分类研究

唐永红<sup>1</sup>, 郑晓雨<sup>2</sup>, 马进<sup>2</sup>

(1. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072;

2. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 实测负荷建模法因其自身的优点而被广泛应用, 但是实测数据的来源成为了制约实测建模研究的主要因素, RTDS 的出现一定程度上弥补了这个缺点, 以四川攀枝花电网的 RTDS 数据为依托, 对实测负荷建模中 TVA 模型的有效性、泛化能力以及负荷的时变性进行了研究, 结果表明 TVA 负荷模型不但能够在较大范围内很好拟合各种扰动强度的数据, 而且具有较强的泛化能力。在解决负荷时变性的过程中应用了聚类分析的方法对数据进行分类, 最后在总结分类结果的基础上提出了一种简单的分类方法, 为消除负荷时变性对建模的影响提供了借鉴。

**关键词:** 负荷建模; RTDS; TVA 模型; 负荷分类; 泛化能力

## Model validation and load classification based on RTDS

TANG Yong-hong<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-yu<sup>2</sup>, MA Jin<sup>2</sup>

(1. Sichuan Electric Power Test & Research Institute, Chengdu 610072, China; 2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Because of its advantages on load modeling, measurement based method is widely used. But the lack of the field measurement data has been a limiting factor on its study. The appearance of RTDS gets rid of that limiting factor to some extent. Based on the RTDS data of Pan zhihua grid of Sichuan province, the validation and the generalization capability of the TVA load model structure are studied. After that, the time-variant characteristics of the load are also analyzed. The result indicates that the TVA load model structure can not only simulate the load data with various disturbances but also has strong generalization capability. In time-variant characteristic study, cluster analysis is used to classify the load data. Finally, a simple method is proposed after the analysis of the load classification result, which provides the guidance for eliminating the effect of time-variant characteristics on load modeling.

**Key words:** load modeling; RTDS; TVA load model structure; load classification; generalization capability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0037-05

## 0 引言

负荷模型作为电力系统仿真的主要模型之一, 对仿真的结果有着重要的影响<sup>[1-3]</sup>, 然而由于负荷自身具有时变性<sup>[4-5]</sup>、随机性等特点, 负荷模型一直没有得到很好的研究, 但是近年来随着人们对仿真准确度要求的提高, 负荷又重新成为研究的热点。在目前的两种主要负荷建模方法当中实测建模法以其简单、实用等多种优点被广泛采用, 但是对于研究而言, 由于实测建模法依赖于实际扰动数据, 而数据的获取往往是一种长期的过程, 所以数据来源就成为制约实测建模发展的主要因素。RTDS<sup>[6-7]</sup>的出现一定程度上消除了这种因素的影响, 它能在很

大程度上逼近真实的电力系统行为, 模拟真实情况下故障录波装置的动作, 记录各种故障下负荷波动, 另外它还可以通过编写脚本文件进行循环仿真, 非常适合用来产生大量的负荷数据, 因此可以为负荷建模的研究提供充足的数据来源, 本文基于四川攀枝花电网的 RTDS 数据一方面验证了 TVA 模型的有效性和泛化能力, 另一方面也提出了一种简单实用的负荷分类方法来消除负荷时变性对建模的影响。

## 1 实时仿真器 RTDS

RTDS 是一套利用多 CPU 并行处理技术和 EMTP 模型对电力系统电磁暂态过程进行模拟的计算机装置<sup>[8-10]</sup>, 是目前世界上技术最成熟、应用最

广泛的实时数字仿真系统，可运行在 50 μs 级的仿真步长上，对较大规模的电力系统进行实时仿真，易于建模、可实现对控制设备的闭环调节、不受故障严重程度和持续时间限制、配置灵活、可重复性强，它的出现为电力系统的设计、运行及研究提供了新的解决方案。

在 RTDS 中代表负荷的除了有三相电阻、电感、电容外还有专门的动态负荷模块 rtds\_udc\_DYLOAD，如图 1 中左图所示。

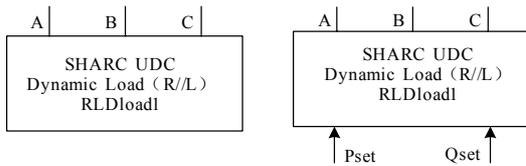


图 1 动态负荷模块

Fig.1 Dynamic load module

通过它可以将负荷类型设置为电阻并联电抗或者电阻串联电抗的形式，在其中还可以设定初始的有功和无功功率，如果将其控制方式设置为滑块控制，则可以在运行当中通过滑块任意改变负荷的大小，如果将控制方式设定为外部控制，则模块将多出两个接口 Pset 和 Qset，如图 1 中的右图所示，通过这两个接口可以自己编写控制模块来控制功率，最典型的的就是接 ZIP 负荷模块 rtds\_sharc\_ctl\_ZIP，如图 2 所示。

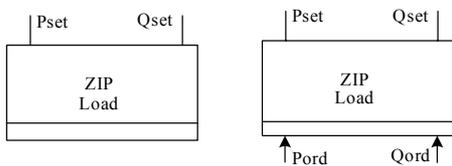


图 2 ZIP 模块

Fig.2 ZIP module

在其中可以设置恒阻抗、恒电流、恒功率负荷的比例，ZIP 模块同样可以像动态负荷模块那样通过改变其控制方式来改变功率的大小，负荷的另一重要组成元件为感应电动机，如图 3 所示。

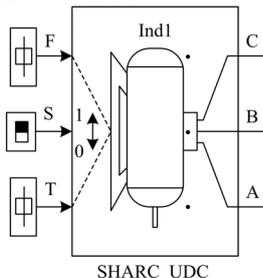


图 3 感应电动机模块

Fig.3 Induction motor module

它能够模拟单鼠笼或者双鼠笼感应电动机，通过设置控制方式接口 S 可以将电机设置为速度控制方式 F 或者转矩控制方式 T，因为在电力系统研究中一般将感应电机的负荷特性表述为恒转矩、单倍转矩、平方转矩三者的组合，所以一般在接口 T 上自己定义恒转矩、单倍转矩、平方转矩三者的组成，从而实现对感应电机特性的表述。本文就是综合利用上面的模块来模拟实际负荷。

## 2 研究所用系统

本文所用系统为四川攀枝花电网，它主要由攀钢自备电厂、河门口电厂、攀煤电厂、新冶炼电厂提供电力供应。该网通过两回 500 kV 线路与主网连接。攀枝花电网的负荷主要是炼铁与焦煤，为典型的工业负荷。本文以实际攀枝花电网为仿真对象，建立了一个六台仿真机组、电压从 500 kV 至 10 kV 的仿真系统，各发电机组的励磁模型参数、PSS 模型参数与原型一致。负荷测点为桐子林 220 kV 变电站的 110 kV 侧。通过对系统中其它地点的元件施加故障造成系统扰动来产生所需的负荷数据，利用这些数据来对负荷进行研究。

## 3 TVA 负荷模型

TVA 负荷模型采用三阶感应电动机并联负荷静特性的模型结构<sup>[11-12]</sup>，如图 4 所示。

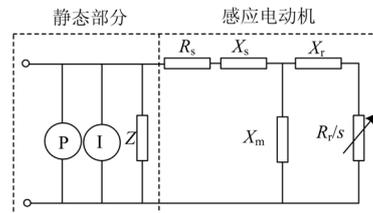


图 4 TVA 负荷模型结构

Fig.4 ZIP load model structure

TVA 负荷模型共有 14 个参数：

$[R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, A, B, K_{pm}, M_{if}, P_p, P_z, Q_p, Q_z]^T$  这里  $R_s, X_s, R_r, X_r, X_m$  分别是等值电动机的定子电阻、定子漏抗、转子电阻、转子漏抗与电动机激磁电抗。s 是电动机的转差率。P<sub>z</sub>、P<sub>p</sub> 分别表示负荷中与电压平方成线性关系以及与电压无关的恒阻抗以及恒功率组成部分；Q<sub>z</sub>、Q<sub>p</sub> 与之类同。

在该综合负荷模型结构中，定义了两个十分重要的物理量： $K_{pm}$  和  $M_{if}$ ， $K_{pm}$  用来分配等值电动机在综合负荷中所占的比例， $M_{if}$  为额定初始负荷率系数，二者分别定义为：

$$K_{pm} = P'_0 / P_0 \quad (1)$$

$$M_{lf} = \left( \frac{P'_0}{S_{MB}} \right) / \left( \frac{U_0}{U_B} \right) \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为负荷总的初始有功功率,  $Q_0$  为总的无功,  $P'_0$  为感应电动机的初始有功,  $S_{MB}$  为感应电动机的额定容量。引入  $K_{pm}$  和  $M_{lf}$  的一个原因是为了实现感应电动机容量  $S_{MB}$  对负荷初始功率  $P_0$  的动态跟踪, 从而使该模型是一种容量自适应的模型结构。模型中其它参数的详细介绍见文献 [11-12]。

#### 4 模型有效性和泛化能力验证

判断负荷模型有效性不仅要看模型对各种扰动强度的数据本身的拟合能力, 还要观察其外推内插也就是泛化能力, 通常的做法是用一条数据辨识出的参数来仿真其它扰动数据, 通过比较仿真曲线与实测曲线之间的拟合程度来判定其泛化能力的强弱。本文中用一条扰动强度为 4.2% 的数据辨识出的参数来仿真五条负荷组成相近但扰动强度不同的数据, 这五条扰动数据的信息如表 1。

表 1 所用数据信息

Tab.1 Information of the load data		
数据	强度	扰动原因
Data1	10.5%	河石坝一河门口三相故障
Data2	25.5%	银江 220 kV 母线 AB 两相故障
Data3	43.6%	二石线 BC 两相故障
Data4	60.7%	洪陈线三相故障
Data5	82.3%	二石线三相相故障

图 5~9 数据的电压扰动分别为 10.5%, 25.5%, 43.6%, 60.7%, 82.3%, 图中的实线为实测数据, 而点线为自身的辨识结果, 点划线为用扰动强度为 4.2% 的数据辨识出的参数进行仿真的结果。

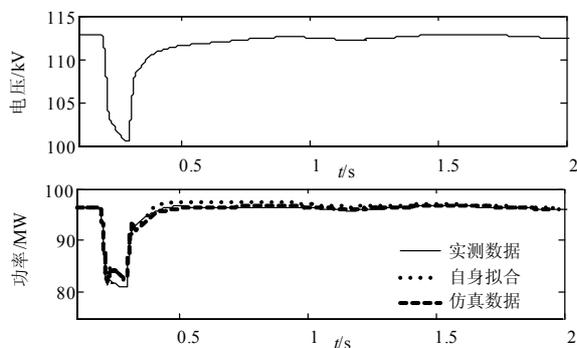


图 5 Data1 的仿真结果

Fig.5 Simulation result of Data1

首先从各个图中的点线和实线的对比可以看出 TVA 模型能够很好地辨识各种电压扰动的数据, 这说明本身的模型结构和辨识方法是非常有效的。

另外从功率图中实线、点线、点划线三者的对比可以看出, 三者非常接近, 这说明了该模型具有很好的泛化能力, 可以通过平时较容易测量到的小扰动数据辨识出来的参数来描述大扰动的情况, 这也从另一方面说明该模型具有很好的实用性。

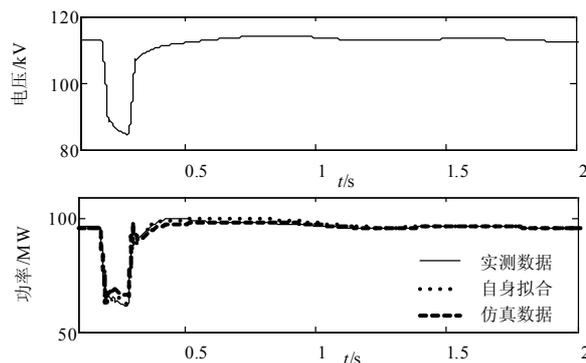


图 6 Data2 的仿真结果

Fig.6 Simulation result of Data2

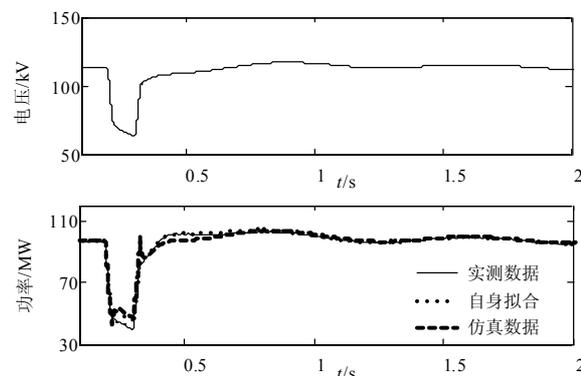


图 7 Data3 的仿真结果

Fig.7 Simulation result of Data3

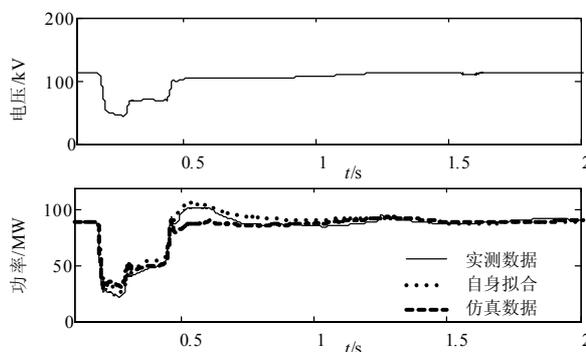


图 8 Data4 的仿真结果

Fig.8 Simulation result of Data4

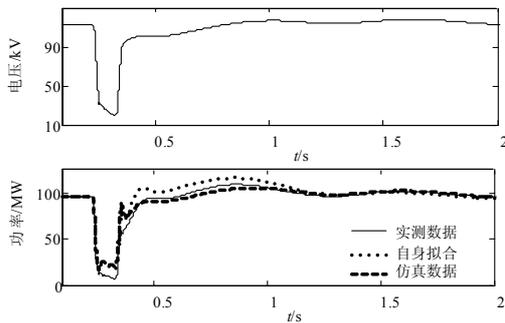


图9 Data5的仿真结果  
Fig.9 Simulation result of Data5

### 5 负荷分类

从上面可以看出当负荷组成成份相似的时候，建立起的模型具有很好的泛化能力，但是实际负荷是不断变化的，对于幅值变化的影响可以通过模型参数的设置来消除，对于成分的变化目前最好的办法是负荷分类，将特性相似的分为一类然后建模，这样就消除了负荷成份时变性对建模的影响。对于负荷分类聚类分析<sup>[13-14]</sup>是一个很好的方法，它是一种无监督分类，其目的在于挖掘数据集的内部结构特征，根据特定的相似性度量将数据集划分成一定数目的子集，使得同一子集内部的样本具有较大的相似性，而不同子集间的样本具有较小相似性。在分类中特征向量的选择很重要，目前主要有两种一种是模型参数，另一种是模型的响应，实际表明用模型的响应作为特征向量进行分类效果会更好。为了验证这种方法能否将负荷特性不同的数据分开，下面取两种组成不同的数据，第1-11条数据感应电动机含量为20%，第12-21条数据的感应电动机含量为80%，数据均来自四川攀枝花电网，先将这21条数据分别辨识，得到各条数据的参数，然后再加上统一的电压激励得到功率响应，用功率响应作为特征向量进行分类，结果如表2。

表2 分类结果

Tab.2 Result of load classification			
编号	类别	编号	类别
1	1	12	2
2	1	13	2
3	1	14	2
4	1	15	2
5	1	16	2
6	1	17	2
7	2	18	2
8	1	19	2
9	1	20	2
10	1	21	1
11	1		

从分类结果看用聚类分析法可以将数据按照特性差异分成不同的类，分完类后发现参数当中  $M_{lr}/K_{pm}$  的值在两类当中明显不同，如图10。

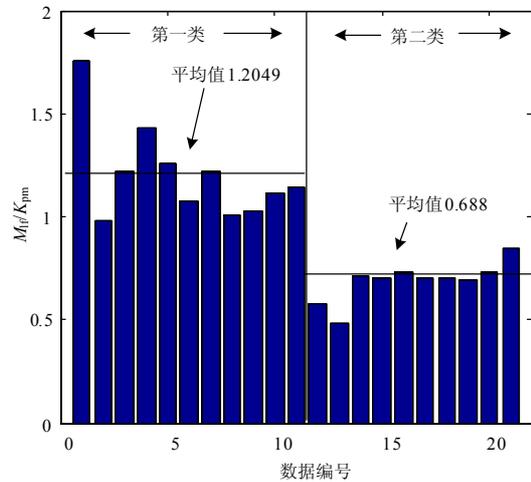


图10 两类数据的  $M_{lr}/K_{pm}$  值  
Fig.10  $M_{lr}/K_{pm}$  ratio of the data in two classes

由上可以看出，感应电动机含量为20%的数据辨识出来的  $M_{lr}/K_{pm}$  的平均值为1.2049，而感应电动机含量为80%的数据辨识出来的  $M_{lr}/K_{pm}$  的平均值为0.6888，仅为前者的一半。在参数定义中  $K_{pm}$  用来分配等值电动机在综合负荷中所占的比例， $M_{lr}$  为额定初始负荷率系数，则  $M_{lr}/K_{pm}$  为：

$$\frac{M_{lr}}{K_{pm}} = \frac{\left( \frac{P'_0}{S_{MB}} \frac{U_0}{U_B} \right)}{\left( \frac{P'_0}{P_0} \right)} = \frac{(P_0 U_B)}{(S_{MB} U_0)} \approx \frac{P_0}{S_{MB}} \quad (3)$$

从公式上看  $M_{lr}/K_{pm}$  的值代表了感应电动机的含量，这个值越大表示感应电动机含量越小，反之，这个值越小代表感应电动机含量越大，分类的结果也正好验证了这一点。所以在应用当中可以直接以  $M_{lr}/K_{pm}$  的值作为分类标准进行分类，这样会使分类过程大大简化。

### 6 结论

RTDS 为实测负荷建模的研究提供了丰富的数据，本文以四川攀枝花电网数据为依托对 TVA 负荷模型进行了验证，结果表明 TVA 不但能够在很大范围内较好拟合各种扰动强度的数据，而且具有较强的泛化能力，在用聚类分析对负荷的时变性进行研

究过程中, 提出了一种简单的负荷分类方法, 为解决负荷时变性提供了依据。

### 参考文献

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10 (1): 523-538.
- [2] MA Jin, HE Ren-mu, Hill D J. Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data from Field Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21 (2): 726-735.
- [3] 鞠平, 马大强. 电力负荷模型的机理式集结模型[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10 (3): 34-41.  
JU Ping, MA Da-qiang. Physically based Composite Models of Electric Power Loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10 (3): 34-41.
- [4] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 85-90.  
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Load Time-variant Characteristic Study in Dynamic Load Modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 85-90.
- [5] 石景海, 贺仁睦. 基于量测的负荷建模-分类算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 78-82.  
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling-sorting Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 78-82.
- [6] 许汉平, 黄涌, 陈坚. 电力系统实时数字仿真系统介绍[J]. 华中电力, 2002, 15 (5): 23-25.  
XU Han-ping, HUANG Yong, CHEN Jian. Real-time Digital Simulator in Power System[J]. Central China Electric Power, 2002, 15 (5): 23-25.
- [7] 甄威, 陈宝喜, 唐永红. 实时仿真在电力系统仿真中的应用[J]. 四川电力技术, 2006, 29 (6): 32-34.  
ZHEN Wei, CHEN Xi-bao, TANG Yong-hong. The Application of Real Time Simulator in the Power System Simulation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2006, 29 (6): 32-34.
- [8] 柳勇军, 梁旭, 闵勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37 (4): 39-42.  
LIU Yong-jun, LIANG Xu, MIN Yong. Power System Real-time Digital Simulation Technologies[J]. Electric Power, 2004, 37 (4): 39-42.
- [9] 郑旭, 孙海顺, 黄立滨, 等. RTDS 中同步电机模型特性研究[J]. 继电器, 2005, 33 (13): 64-67.  
ZHENG Xu, SUN Hai-shun, HUANG Li-bin, et al. Research on the Synchronous Machine Model in RTDS[J]. Relay, 2005, 33 (13): 64-67.
- [10] 郭丽娟, 陈乃添, 刘南平. 实时数字仿真装置 RTDS 介绍[J]. 广西电力, 2004 (1): 62-64.  
GUO Li-juan, CHEN Nai-tian, LIU Nan-ping. Introduction of Real-Time Digit Simulation Device-RTDS[J]. Guangxi Electric Power, 2004 (1): 62-64.
- [11] HE Ren-mu, MA Jin, Hill D J. Composite load Modeling via Measurement Approach[J]. IEEE Trans Power Systems, 2006, 21 (2): 663-672.
- [12] Shi J H, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling-Model Structure[A]. in: 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference[C]. Bologna (Italy): 2003.
- [13] 王成山, 曹旌, 陈光远. 基于聚类分析的电力系统暂态稳定故障筛选[J]. 电网技术, 2005, 29 (15): 18-22.  
WANG Cheng-shan, CAO Jing, CHEN Guang-yuan. Power System Transient Stability Contingency Screening based on Clustering Analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29 (15): 18-22.
- [14] 黄梅, 贺仁睦, 杨少兵. 模糊聚类在负荷实测建模中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (14): 49-52.  
HUANG Mei, HE Ren-mu, YANG Shao-bing. The Application of Fuzzy Clustering in Measurement-Based Load Modeling[J]. Power System Technology, 2006, 30 (14): 49-52.

收稿日期: 2009-01-18; 修回日期: 2009-03-23

作者简介:

唐永红 (1965-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与仿真;

郑晓雨 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷仿真与建模; E-mail: zhengxiaoyu0908@163.com

马进 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为负荷建模、电力系统动态分析。