

我国电力负荷建模工作的若干建议

鞠 平¹, 戴 琦¹, 黄永皓², 付红军², 何南强²

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏省南京市 210098; 2. 河南电力调度通信中心, 河南省郑州市 450052)

摘要: 从我国电力负荷建模实际出发, 指出电力负荷建模的可用性、实用性和针对性原则, 建议将现阶段的目标定位在为电力系统机电暂态计算建立重要负荷的分区、分时、分类的模型和参数范围。探讨了电力负荷模型结构的选择, 建议采用感应电动机加 ZIP 模型。对几种电力负荷参数的获取方法进行了比较, 提出了综合化的建议。最后, 对电力负荷建模工作的实施提出建议。

关键词: 电力系统; 负荷; 建模

中图分类号: TM714

0 引言

电力负荷模型对电力系统稳定性的计算结果影响较大, 对潮流计算、短路计算、安全分析等也有一定的影响, 在临界情况下, 还有可能改变定性结论, 或者掩盖一些重要现象。不恰当的负荷模型会使得计算结果与实际情况不一致, 或偏乐观, 或偏保守, 从而构成系统的潜在危险或造成不必要的浪费。首先, 在运行方式的选择上, 各网、省局的运行方式部门通过稳定计算来确定安全功率极限, 并以此保证系统的安全稳定运行; 在计算中人们发现负荷模型及其参数的选取(如电动机所占百分比)对计算结果影响很大, 成为目前运行方式选择计算中的主要问题。其次, 目前国内在调度员模拟培训器研制及使用方面正处于蓬勃发展时期, 而其中暂态和中、长期动态仿真都与负荷模型有密切联系, 负荷模型是否正确, 将会直接影响到培训的效果。再次, 进行电力系统规划时, 采用不同的负荷模型, 在临界情况下计算结果可能相差一条线路的投资, 约上千万元。

当缺乏实际负荷模型时, 人们常常试图采用某种“乐观”的负荷模型, 这种做法对现代大型电力系统往往是危险的。因为负荷模型对现代大型电力系统的总体影响事先难以确定, 而且在某种情况下“乐观”的负荷模型在另一种情况下却可能是“悲观”的; 再者, 不同问题对负荷模型的要求也不一样。所以应该根据应用目的及其相应的要求, 选定电力系统中的重要负荷, 确定其负荷特性和模型。

在过去的几十年间, 发电机及输电网络的建模已取得了很大的进展, 相比之下, 电力负荷建模则发展较慢, 成为电力界最困难的研究领域之一, 其发展

过程也是几起几落。虽然如此, 经过几十年的不懈努力还是取得了相当多的成果, 相关文献超过 200 篇^[1~17]。我国电力工作者在电力负荷建模领域也开展了不少工作, 取得了富有创造性的成果^[9~12, 18~28]。

国家电网公司高度重视电力负荷建模工作, 在 2001 年 7 月 1 日颁布实施的新版《电力系统安全稳定导则》中明确要求采用实际负荷参数, 国内越来越多的单位也逐步认识到必须开展这一工作。本文就电力负荷建模的原则、目标、模型、方法等关键问题谈一些建议。

1 电力负荷建模的总体原则

1.1 可用性原则

电力负荷建模具有时变性、随机性、分布性、多样性、非连续性等特点。多年来, 虽然人们做了大量努力, 但要对所有负荷点、所有时间点建立“精确”模型可能是不现实的。虽然不能做到定量完全精确, 但至少要做到定性正确。所以, 在目前只能考虑建立“可用”的负荷模型, 对该模型的最基本的要求是能够反映负荷的本质特征。

1.2 实用性原则

电力负荷建模的目的当然是为了应用。这就要求模型在能够反映负荷本质的前提下尽量简单, 最好与现有电力系统计算程序能够衔接。同时要求方法也尽量简单, 最好少做全系统性的大规模试验, 尤其是稳定试验。

1.3 针对性原则

国外对电力负荷建模已有大量的研究, 美国等国家进行了大量实际负荷参数的研究, 给出了推荐参数。但不同国家的管理体制和负荷情况具有明显差异, 国外的做法不一定就能够照搬, 国外的数据也

不一定能够照用。我国开展负荷建模工作,一方面要借鉴国外的经验,但另一方面要针对我国的实际,立足国内,走一条有中国特色的负荷建模之路。

2 电力负荷建模的阶段目标

电力负荷在本质上具有分布性、时变性、多样性。一方面,要对所有地区、所有负荷点、所有时间点建立“精确”模型是不现实的;另一方面,试图全网甚至全国的所有负荷点全部采用一套负荷参数的做法,虽然实用,但似乎过于绝对化、简单化,不能够反映负荷的本质。

作为国家电网公司重点开展的一项全国性工作,不能指望短期内解决所有负荷建模问题,而应该一步一步推进,确定有限目标,不断取得阶段性成果。第1阶段的首要任务还是要确定机电暂态计算所需的模型,因为这个问题重要而且可能解决。至于长时间、大范围电压等情况下的负荷模型问题,还有大量问题需要研究。综合考虑到可用性和实用性原则,需要考虑以下几个因素。

a. 分区。一般要划分到省级电网,因为全国或者区域网的范围大,不同地区的负荷特性还是有明显差异的。

b. 分时。一般可以划分为4个季节,或者就只考虑夏季和冬季这两个差异大且负荷高的季节;一天中则考虑白天高峰、晚上低谷。这样至少是4个时段,即夏季白天、夏季晚上、冬季白天和冬季晚上。

c. 分类。一般可以按照负荷的代表性分为几个类型,但不宜多,例如工业类、农业类、城市类(包含商业与民用)。这几个类型的负荷可以理解为“典型负荷”或“基础负荷”,其他负荷套用,类型大体相同就直接套用某一类,类型相差较大则可以采用加权(比例)综合。至于一些特殊负荷,可以采用特殊方法建立其模型。而对于系统中影响不大的负荷,则可以采用简单模型,比如恒阻抗或ZIP模型。

d. 范围。即使对于一个固定负荷点、一个固定时间,要准确确定其负荷参数也是很困难的,因为负荷参数可以认为随时都在变化。但一般可以采用适当方法来确定一个范围,比如某负荷点在夏季晚上的电动机比例范围为47%~50%。当然,这个范围区间不能太大,而应该尽量地小,否则无法应用。运行决策人员可以根据对安全和经济的关心程度或上级要求,决定采用该参数范围中的具体值。

综上所述,建议现阶段的目标定位在:为电力系统机电暂态计算建立重要负荷的分区、分时、分类的模型和参数范围。

3 电力负荷模型的结构选择

3.1 静态负荷模型^[2,3,11,12]

长期以来,人们对静态负荷特性的研究较为透彻,常用的有ZIP模型、多项式和幂函数^[11]以及在这两种模型基础上的变形或组合。

3.2 物理动态负荷模型

a. 感应电动机^[7,11,29,30]。感应电动机模型有5阶的电磁暂态模型、3阶的机电暂态模型、1阶的机械暂态模型和1阶的电压暂态模型。

b. 同步电动机。同步电动机有时也用到,比如在抽水蓄能电站。同步电动机模型人们非常熟悉,程序中也都有。电动机与发电机所不同的是运行状态不同、机械转矩不同,同步电动机的机械转矩可以采用与感应电动机相同的方程^[6]。

c. 有载调压变压器。这在长期动态过程中需要考虑。

d. 负荷减载及投切^[6]。在一些动态或准动态计算中需要考虑低频或低压减载及投切,最简单的情况是按比例切除负荷。

3.3 非物理动态负荷模型

a. 线性动态模型^[31~36]。线性动态模型可以采用传递函数、差分方程、状态方程等形式,互相之间可以转换。

b. 非线性动态模型^[37~43]。非线性动态模型也可采用传递函数、差分方程、状态方程等形式,但相互间一般难以直接转换。典型的非线性模型有Hill模型、Karlsson模型、动静综合负荷模型。文献^[43]证明了这些模型本质上是一致的,可以统一。

c. 人工神经网络模型。从理论上讲,人工神经网络可以描述复杂的映射关系,用做负荷模型基本上都采用离散形式,有点类似于复杂的差分方程。对于其适应性、实用性等问题仍有待深入研究。

3.4 负荷模型的选择

负荷模型的评判是困难的,因为不同的应用目的对负荷的要求不同,不同的研究人员看问题的出发点可能也不一样。一般需要考虑精确度、计算量、物理背景、参数获取(包括参数获取方法、可辨识性^[44~47]等)、应用方便^[48~50]等。可以说,目前还没有一种负荷模型在各方面都优。事实上,这几个方面有时甚至是互相矛盾的。因此,往往要根据应用者关心的主要方面,选择一种折中的负荷模型。

3.4.1 模型类的选择

首先,我们需要对静态模型、物理动态模型以及非物理动态模型进行比较和选择。静态负荷模型一般用于潮流分析、长期动态过程,对于机电暂态过程,静态负荷模型可以用于负荷以静态成分为主(如商业、民用负荷)、负荷影响比较小的节点。物理动

态模型,尤其是感应电动机模型,是目前故障程序中常用的动态负荷模型。感应电动机在电力负荷(尤其是工业负荷)中占有较大比重,对电力系统运行分析与控制具有相当大的影响。当负荷群中动态成分复杂,难以用物理模型描述时,可以用一个非物理模型来描述其输入-输出特性。有人认为,感应电动机可以理解为恒定功率项,即恒定阻抗加感应电动机($Z+M$)模型可以用恒定阻抗加恒定功率($Z+P$)模型代替。表1给出了河南电网中首阳山电厂出口处发生三相短路时采用2种负荷模型的极限切除时间,可见这2种负荷模型下的极限切除时间差异明显,尤其是恒阻抗比例小时更加如此。综上所述,按照前面提出的原则和目标,笔者建议采用感应电动机加ZIP模型类。

表1 极限切除时间比较
Table 1 Comparison of the critical clearing times

恒阻抗比例/(%)	极限切除时间/s	
	恒阻抗+感应电动机	恒阻抗+恒功率
0	0.07	0.11
30	0.14	0.21
50	0.17	0.24
70	0.19	0.25

3.4.2 感应电动机模型的选择

根据感应电动机的原理,可以推导得到5阶的电磁暂态模型。如果忽略电子绕组的电磁暂态,则得到3阶的机电暂态模型。如果进一步忽略转子绕组的电磁暂态,则得到1阶的机械暂态模型。随着电力系统电压稳定问题研究的发展,提出了1阶的电压暂态模型。由于感应电动机定子绕组的暂态过程比转子绕组的电磁暂态快得多,更比电力系统暂态过程快得多,因此,就感应电动机对电力系统的影响而言,是否计及定子的暂态过程影响不大,采用3阶模型就能很好地反映感应电动机的性能。文献[51]经过比较后认为:一般适宜采用3阶机电暂态模型;如果为了节省计算量,对于有功为主的动态问题可以采用1阶机械暂态模型,对于无功为主的动态问题可以采用1阶电压暂态模型。

对于配电网,假设可以用T型等值电路来描述,其串联阻抗可以加到感应电动机的定子阻抗中,而并联部分则可以加到静态部分ZIP模型中。但配电网对感应电动机的时间常数没有影响,因为时间常数是由转子及其绕组决定的。

4 电力负荷参数的方法选择

4.1 统计综合法

该方法的基本思想是把综合负荷看做成千上万用户的集合,首先确定各种典型负荷的平均特性(如日光灯、电机、空调器等的平均电气特性),然后统计

出各类负荷(如居民负荷、商业负荷、工业负荷等典型负荷)的比例,估计出各类负荷的平均特性,最后根据各类负荷所占的比例,得出综合负荷的模型。

4.2 总体测辨法

总体测辨法的基本思想是把负荷看成一个整体,先利用数据采集装置从现场采集负荷所在母线的电量,然后根据系统辨识理论确定综合负荷模型。从数据采集角度看,总体测辨法有2种数据来源:人为干扰下采集数据和自然扰动下采集数据。从参数辨识角度看,可分为在线辨识和离线辨识两种方式。

4.3 故障仿真法

该方法根据故障情况下的系统动态录波,通过不断改变全网负荷特性参数(比如全网统一的感应电动机比例),使仿真结果尽量接近系统动态录波。

4.4 几种方法的综合

用统计综合法得到的负荷模型具有物理概念清晰、易于被现场工作人员理解的优点,但其核心是建立在“统计资料齐全,负荷特性精确”的基础之上的,这一点往往很难做到,而且不可能经常进行,从而无法考虑负荷随时间变化的特性。总体测辨法避免了大量的统计工作,有可能得到随时间变化的在线实时负荷特性,但其最大的困难是难以在系统中所有变电站都安装有关装置,其次是参数的不确定性。故障仿真法的优点是参数确定过程与现在程序计算时选择参数的过程一致,而且在某些故障下能获得重现,但实际上这是一种试凑的方法,难以保证在某些故障下的负荷参数适用于其他故障,而且认为全系统负荷参数相同、不变,显然不符合负荷的实质。

综上所述,总体测辨法比较适合于微观定量,统计综合法比较适合于中观定性,故障仿真法比较适合于宏观校验。因此,建议选择一些地区进行3种方法的比较与综合。对于特别重要或者具有典型性的负荷节点,通过总体测辨法进行长期观测,建立其分时段的模型和参数范围;对于比较重要的负荷节点,通过统计综合法定性后套用观测参数;对于影响不大的负荷节点,则采用恒定阻抗。最终的有效性,则要采用故障仿真法进行校核。

5 电力负荷建模的实施

5.1 成立组织,建立规范

当务之急是成立行政与学术相结合的组织,尽快制定我国电力负荷建模的技术规范,以指导全国的电力负荷建模工作,避免走弯路,减少重复劳动。

5.2 立足实际,长期坚持

虽然IEEE已经给出^[7]了北美地区在不同地区、不同季节、不同负荷类型时的静态负荷特性系数,还推荐^[8]了感应电动机参数,但负荷建模的研究是一个既具有理论深度又直接面向实际应用的课

题,北美地区的负荷参数肯定能够为我们提供参考,但不一定就能够直接采用。建议立足我国实际,深入持久地积累数据,广泛开展应用研究,以获得适合于我国国情的负荷模型和参数。

5.3 分工协作,数据共享

我国从20世纪70年代开始负荷特性的现场实测工作,当时大多是进行稳态试验以获取静态特性^[52,53]。90年代以来,华北电力大学、清华大学、河海大学等在动态负荷特性方面又进行了不少现场试验^[54~56],但至今还没有进行大规模的测量和数据整理工作。应该将大家的力量结合起来,开展分工协作,实现数据的共享。

5.4 协调资源,应用检验

要进行大量的实际测量工作,但又不可能专门为此大量安装设备或专门做试验,因此,应该协调利用现有的各种设备资源和数据资源,如数字式故障录波、相角测量装置(PMU)。而且,在将来建设PMU和广域测量系统(WAMS)时,应该同时考虑负荷建模的需要,在将来的各种系统性试验中,也应该考虑负荷建模的需要。这些动态数据一方面是电力负荷建模的数据来源,另一方面负荷建模有效性的最终检验是系统范围的检验。

参考文献

- 1 IEEE Task Force. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 523~538
- 2 Concordia C, Ihara S. Load Representation in Power System Stability Studies. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(4): 969~977
- 3 Determining Load Characteristics for Transient Performances. EPRI Report, No. EL-848, 1979, 3(5)
- 4 Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies. EPRI Report, No. EI-5003, 1987, 4(1)
- 5 CIGRE Task Force. Load Modelling and Dynamics. Electra, 1990(130): 124~141
- 6 CIGRE Task Force. Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena. Electra, 1993(147): 71~77
- 7 IEEE Task Force. Load Representation for Dynamic Performance Analysis. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 472~482
- 8 IEEE Task Force. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1302~1313
- 9 贺仁睦(He Renmu). 负荷模型在电力系统计算中的作用及其发展(Effects on Power System Calculations and Development of Load Modelling). 华北电力学院学报(Journal of North China Institute of Electric Power), 1985(3): 1~8
- 10 沈善德(Shen Shande). 电力系统辨识(Identification of Power System). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1993
- 11 鞠平, 马大强(Ju Ping, Ma Daqiang). 电力系统负荷建模(Load Modeling of Power System). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1995

- 12 鞠平(Ju Ping). 电力系统非线性辨识(Nonlinear Identification of Power Systems). 南京:河海大学出版社(Nanjing: Hohai University Press), 1999
- 13 鞠平(Ju Ping). 电力系统负荷建模理论与实践(Theory and Practice of Load Modeling in Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(19): 1~7
- 14 余贻鑫, 陈礼义(Yu Yixin, Chen Liyi). 电力系统安全性和稳定性(Security and Stability in Power Systems). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1988
- 15 [日]电力系统稳定性专门委员会(Japan: Power System Stability Committee). 电力系统稳定性问题与对策(Problem and Countermeasure in Power System Stability). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1994
- 16 Kundur P. Power System Stability and Control. New York: Mc Graw, 1993
- 17 鞠平, 马大强(Ju Ping, Ma Daqiang). 电力负荷的动静特性对低频振荡阻尼的影响分析(Effects of Static and Dynamic Loads on the Damping of Low-frequency Oscillations in Electric Power Systems). 浙江大学学报(Journal of Zhejiang University), 1989, 23(5): 750~761
- 18 鞠平, 马大强(Ju Ping, Ma Daqiang). 电力负荷的NLRF建模法(Physically Based Composite Models of Electric Power Loads). 中国电机工程学报(Proceedings of the CESS), 1989, 9(6): 49~59
- 19 鞠平, 马大强(Ju Ping, Ma Daqiang). 电力负荷的机理式集给模型(A Nonlinear Recursive Filtering Method for the Modelling of Electric Loads). 中国电机工程学报(Proceedings of the CESS), 1990, 10(3): 34~41
- 20 Ju P, Handschin E, Wei Z N, et al. Sequential Parameter Estimation of a Simplified Induction Motor Model. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 319~324
- 21 Ju P, Handschin E. Identifiability of Load Models. IEE Proc—Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(1): 45~49
- 22 李德丰, 鞠平(Li Defeng, Ju Ping). 电力系统综合负荷特性的可辨识性研究(A Study on the Identifiability of Electric Load Models). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(7): 10~14
- 23 鞠平, 李德丰(Ju Ping, Li Defeng). 电力系统综合负荷特性的辨识方法研究(A Study on the Identification Method of the Composite Electric Load Models). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(8): 11~14
- 24 鞠平, 李德丰, 陆小涛(Ju Ping, Li Defeng, Lu Xiaotao). 电力负荷建模系统(A System for Load Modelling in Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(6): 49~51, 54
- 25 鞠平, 李德丰(Ju Ping, Li Defeng). 电力系统非机理负荷模型的可辨识性(Identifiability of Usual I/O Load Models in Power Systems). 河海大学学报(自然科学版)(Journal of Hohai University (Sci & Tech)), 1999, 27(1): 16~19
- 26 鞠平, 金艳, 吴峰, 等(Ju Ping, Jin Yan, Wu Feng, et al). 综合负荷特性的分类综合方法及其应用(Studies on Classification and Synthesis of Composite Dynamic Loads). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2004, 28(1): 64~68
- 27 Ju P, Zhou X Y. Dynamic Equivalents of Distribution Systems for Voltage Stability Studies. IEE Proc—Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(1): 49~53
- 28 程颖, 鞠平, 吴峰(Cheng Ying, Ju Ping, Wu Feng). 负荷

- 模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较 (PS Algorithm in Load Parameter Identification and Its Comparison with Genetic Algorithm). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(11): 25~29
- 29 Ahmed-Zaid S, Taleb M. Structural Modeling of Small and Large Induction Machines Using Integral Manifolds. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(3): 529~535
 - 30 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖 (Ni Yixin, Chen Shousun, Zhang Baolin). 动态电力系统的理论和分析 (Theory and Analysis of Power System Dynamics). 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2002
 - 31 Sabir S A Y, Lee D C. Dynamic Load Models Derived from Data Acquired During System Transients. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(9): 3365~3372
 - 32 Handschin I E, Doernemann C. Bus Load Modelling and Forecasting. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 627~633
 - 33 Welfonder E H, Hall W B. Investigations of the Frequency and Voltage Dependence of Load Part Systems Using a Digital Self-selecting Measuring and Identification System. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 19~25
 - 34 Wang Jin-Cheng, Chiang Hsiao-Dong. Development of a Frequency-dependent Composite Load Model Using the Measurement Approach. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1546~1556
 - 35 Lin C J, Chen Y T, Chiou C Y. Dynamic Load Models in Power Systems Using Measuring Approach. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 300~315
 - 36 Meyer F J, Lee K Y. Improved Dynamic Load Model for Power Systems Stability Studies. IEEE Trans on PAS, 1982, 101: 3303~3309
 - 37 Hill D J. Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 166~176
 - 38 Karlsson D, Hill D J. Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 157~166
 - 39 Xu W, Mansour Y. Voltage Stability Analysis Using General Dynamic Load Models. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 479~493
 - 40 Ju P, Ma D Q. A New Nonlinear Discrete Model of Electric Dynamic Load. In: Proc of 8th IFAC Symp on Identification and System Parameter Estimation. Oxford (UK): Pergamon Press, 1988. 1656~1661
 - 41 鞠平, 马大强 (Ju Ping, Ma Daqiang). 电力负荷中的新模型及动态参数的同时辨识 (Composite Dynamic-static Models of Electric Powers Loads). 控制与决策 (Control and Decision), 1989, 4(2): 20~23
 - 42 Ju P, Handschin E, Karlsson D. Nonlinear Dynamic Load Modeling: Model and Parameter Estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1689~1697
 - 43 Ju P, Handschin E, Rehtanz C. A Comparative Study on the Nonlinear Dynamic Load Models. In: Proc of 10th PSCC. Dresden (Germany): 1996. 1069~1074
 - 44 Walter E. Identifiability of Parametric Models. Oxford (UK): Pergamon Press, 1987
 - 45 文福拴, 韩祯祥 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang). 模拟进化方法在电力系统中应用综述(上) (The Survey of the Application of Simulated Evolutionary Optimization Method to Power Systems (the first part)). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(1): 59~62
 - 46 文福拴, 韩祯祥 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang). 模拟进化方法在电力系统中应用综述(中) (The Survey of the Application of Simulated Evolutionary Optimization Method to Power Systems (the second part)). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(2): 60~62
 - 47 文福拴, 韩祯祥 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang). 模拟进化方法在电力系统中应用综述(下) (The Survey of the Application of Simulated Evolutionary Optimization Method to Power Systems (the third part)). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(3): 72~74
 - 48 Dias L G, El-Hawary M E. Nonlinear Parameter Estimation Experiments for Static Load Modeling in Electric Power System. IEE Proc—Generation, Transmission and Distribution, 1989, 136(2): 68~77
 - 49 Miroslav M, Roger B, Mills Q. Load Identification and Voltage Stability Monitoring. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1)
 - 50 Frants T, Gentile T, Ihara S, et al. Load Behavior Observed in LILIO and RG&E System. IEEE Trans on PAS, 1984, 103(4): 819~831
 - 51 鞠平, 潘学萍, 韩敬东 (Ju Ping, Pan Xueping, Han Jingdong). 3种感应电动机综合负荷模型之比较 (Comparison of Three Composite Induction Motor Load Models). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(19): 40~42
 - 52 陈晓东 (Chen Xiaodong). 综合负荷电压静态特性的实测与数据处理 (Compositive Load Voltage Static State Characteristic Measurement and Data Management). 浙江电力 (Zhejiang Power), 1986(6): 10~18
 - 53 东北电业管理局调度局 (Northeast China Electric Power Bureau Dispatching Center). 电力系统运行操作和计算 (Operation and Calculation in Power Systems). 北京: 水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1977
 - 54 贺仁睦, 魏孝铭, 韩民晓 (He Renmu, Wei Xiaoming, Han Minxiao). 电力负荷动态特性实测建模的外推和内插 (Power System Dynamic Load Modeling Basic on the Measurements in the Field). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CESS), 1996, 16(3): 151~154
 - 55 卫志农, 鞠平 (Wei Zhinong, Ju Ping). 电力负荷在线建模方法 (On-line Modelling of Electric Loads). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CESS), 1995, 15(6): 361~369
 - 56 付红军, 王子琦, 何南强, 等 (Fu Hongjun, Wang Ziqi, He Nanqiang, et al). 河南电网实测负荷参数及其对电网的影响 (Measured Load Parameters of Henan Power Network and Their Influences on System Stability). 电网技术 (Power System Technology), 2003, 27(5): 38~42
-
- 鞠平 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 副校长, 主要研究方向为电力系统建模与控制。E-mail: pju@hhu.edu.cn
- 戴琦 (1980—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统建模。
- 黄永皓 (1962—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力市场。