

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.013

电力系统负荷建模研究综述与展望

赵静波¹, 鞠平^{2,3}, 施佳君^{2,3}, 秦川^{2,3}

(1.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 江苏南京 210008; 2.河海大学能源与电气学院 江苏南京 211100;
3.河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏南京 211100)

摘要: 负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性问题,既具有非常重要的理论意义,又具有十分显著的实用价值。在回顾已有负荷建模成果的基础上,归纳了负荷模型结构和模型参数的获取方法,整理了负荷模型应用现状,并总结了现有负荷建模方法的不足;然后分析了负荷建模的发展趋势,包括负荷特性重大变化对建模工作的新挑战、电网结构变化对建模工作的新需求和大数据、人工智能快速发展带来的新机遇;最后将未来负荷建模工作总结为解决模型结构的“定性正确”和模型参数的“定量准确”两步走问题,提出建立考虑主动负荷的广义综合负荷模型,并借助人工智能技术,综合采用多种在线建模方法,构建“分类分时”负荷模型数据库,建立负荷建模的长效机制。

关键词: 负荷建模; 广义综合负荷模型; 模型结构; 模型参数; 主动负荷; 人工智能; 综述

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)01-0087-08

Review and prospects for load modeling of power system

ZHAO Jingbo¹, JU Ping^{2,3}, SHI Jiajun^{2,3}, QIN Chuan^{2,3}

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210008, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
3. Renewable Energy Power Generation Technology Engineering Research Center of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Load modeling is a fundamental issue in the operation and control of power system, which has very important significance in theory and practice. First, this study reviews existing load modeling achievements, provides an overview of existing load models and methodologies for parameters estimation, identifies current industry practice on load modeling for power system, and summarizes the shortcomings of existing load modeling theory. Then, future prospects are analyzed, including new challenges and new requirements for modeling work resulted from major changes in load characteristics and grid structure, and new opportunities with the rapid development of artificial intelligence and big data. Finally, the future work is summarized as a two-step problem that is “qualitative correctness” of model structure and “quantitative accuracy” of model parameters. The structure of a generalized synthesis load model is proposed considering the active load. To establish the long-term mechanism of load modeling, a “type classified and time classified” load model database, taking the advantage of a variety of online modeling methods as well as the artificial intelligence algorithm, is proposed.

Key words: load modeling; generalized synthesis load model; model structure; model parameter; active load; artificial intelligence; review

基金项目: 国家自然科学基金(51407060); 江苏省电力公司科技项目(J2018054); 111引智计划项目(B14022)

作者简介: 赵静波(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事电力系统计算和分析研究。E-mail: 1418412034@qq.com

通信作者: 鞠平 教授。E-mail: pju@hhu.edu.cn

引用本文: 赵静波, 鞠平, 施佳君 等. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2020 48(1): 87-94.

ZHAO Jingbo, JU Ping, SHI Jiajun et al. Review and prospects of power system load modeling [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences) 2020 48(1): 87-94.

电力系统仿真计算不仅是电力系统动态分析与安全控制的基本工具,也是电力生产部门用于指导电网运行的基本依据。数字仿真结果的准确度直接影响系统运行、规划及决策的正确性。作为电能消耗的核心环节,电力负荷影响着电力系统设计、分析以及控制,负荷模型的准确与否对电力系统有着重要影响。1996年北美两次停电事故,2003年美国“8·14”大停电事故等的分析均表明,不恰当的负荷模型将导致仿真结果与实际故障曲线不符^[1-2]。过于乐观的负荷模型会对电力系统造成潜在威胁,过于悲观的负荷模型会造成投入过多,资金浪费严重。

然而,负荷节点几十千米供电范围内的设备海量而复杂,但模型方程要求低阶且统一;负荷特性具有非线性和时变性,但模型参数要求准确且鲁棒;大电网中面广量大的负荷节点逐个建模工作量巨大且难以实证,但工程实施要求高效且快速。上述困难致使负荷建模成为电力界的公认难题。

正是由于负荷建模的困难性与重要性并重,科研工作者不断探索,并取得了大量的成果。IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 和国际大电网委员会(International Council on Large Electric Systems, CIGRE) 设有专门研究负荷建模的小组^[3],如复杂电网负荷建模与聚合小组 C4.605 等,以指导负荷建模方面的研究^[4-5];在美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI) 委托下,美国 TXEAS 大学和电力公司通力合作,基于统计综合法开发了计算机分析程序(LOADSYN)^[6]。我国也在负荷建模领域做出了重要贡献:国家电网有限公司于 2003 年成立负荷建模工作组;中国电力科学研究院基于东北大扰动试验实测数据,提出了考虑配电网的综合负荷模型及其参数确定方法^[7]。国内若干院校科研团队也对负荷建模方法进行了深入研究,大大丰富了负荷建模理论,进一步推动了负荷建模的实用化^[8-13]。

本文首先对现有的负荷建模工作进行了总结:归纳了负荷模型结构和模型参数的获取方法,整理了负荷模型实际应用现状,并总结了现有负荷建模方法的不足;然后分析了负荷建模的发展趋势,包括负荷特性重大变化对建模工作的新挑战,电网结构变化对建模工作的新需求,以及大数据、人工智能快速发展带来的新机遇;最后,将未来负荷建模工作总结为解决模型结构的“定性正确”和模型参数的“定量准确”两步走问题,提出建立考虑主动负荷的广义综合负荷模型,借助人工智能技术,综合采用多种在线建模方法,构建“分类分时”负荷模型数据库,建立负荷建模的长效机制。

1 负荷建模研究现状

1.1 负荷建模的重要性

大量的计算与试验结果表明:负荷模型对电力系统动态行为的定量模型影响很大,对暂态稳定、小扰动稳定和电压稳定等都有不同程度的影响。

a. 对暂态稳定的影响:电力系统发生故障时,会造成发电机功率不平衡,从而引起功角及其他变量的变化。研究表明负荷特性对暂态稳定有显著影响,但对于不同的研究对象,影响程度、乐观与否也有所差异。以湖南电网为例,符合实际的负荷模型能有效提高联络线的功率输送极限,甚至能达 30% 左右,极限切除时间也有所提高^[14];而对于典型的发电-受电系统,如华东电网和河南电网,提高送端负荷模型的电动机比例有利于提高系统的暂态稳定性,而受端电网的结论则恰恰相反^[15-16]。

b. 对小扰动稳定的影响:电力系统发生低频振荡时,电压和频率都会发生显著变化,因而必须研究负荷的电压和频率特性。一般来说,动态负荷所占的比重和负荷的频率特性都对系统阻尼有显著影响,而负荷的一些动态参数对系统阻尼影响不大^[17-18]。

c. 对电压稳定的影响:负荷特性是电压稳定问题中的关键因素,不同的负荷特性对电压稳定的影响也不尽相同。电压稳定主要取决于无功平衡,综合负荷模型中动态负荷所占比例,感应电动机的结构和参数都会直接影响到电压稳定分析的精确度。

总的来说,准确的负荷模型有利于电网安全稳定运行,提高用户供电可靠性。但模型乐观与否不能一概而论,随着电力系统的不断发展,电网覆盖面积扩大,相互之间联系愈发紧密,不同条件下,相同的模型也可能得到截然相反的结果。因此,负荷模型需根据实际应用目的及需求进行确定。

1.2 负荷模型的结构

迄今为止,负荷建模研究已有一定基础。负荷模型一般可分为静态模型、机理动态模型和非机理动态模型。

静态负荷模型描述电压或频率缓慢变化时的负荷特性^[19],主要有幂函数模型、多项式模型以及在这2种模型基础上的变形和组合;机理动态模型用于描述电压或频率较快变化时的负荷特性,是以物理和电学等基本定律为基础,通过列写负荷的各种平衡关系式而获得的模型,主要有经典负荷模型(classic load model, CLM)和综合负荷模型(synthesis load model, SLM)。对于分布式电源较多的区域,也可采用增广负荷模型(generalized load model, GLM)^[20];非机理动态模型将负荷看成是一个黑匣子,建立输入输出表达式,由于物理概念不明确,实际应用较少。

1.3 负荷模型参数确定方法

负荷模型参数确定方法主要包括统计综合法、总体测辨法和故障仿真法^[21]。这3种方法各有优缺点:统计综合法物理意义明确,但需要对成千上万的设备进行统计,耗时费力,且准确度较低,另外实际的负荷出力处于动态变化中,该方法无法解决负荷的时变性问题;通过总体测辨法在线辨识模型参数可以有效解决时变性问题,但实际情况下,大于10%的电压波动数据不易获取;故障仿真法所得参数可能仅针对某一故障有效,需要调整参数以满足较多的实际故障情况,然而实际电网中故障数据获取不易,且该方法认为全系统负荷参数相同且固定,与实际不符。

在实际应用时,通常综合几种建模方法以互相取长补短。例如文献[22]提出基于日负荷曲线分析负荷行业构成比例,并以此为分类依据对所有负荷节点分类;然后选取各类中的典型节点,安装测量装置,辨识负荷模型参数;最后根据分类情况,推广得出其他负荷节点的模型参数;文献[23]首先将负荷拆分为各类电动机和静态负荷,并基于统计调查获取其参数,然后利用轨迹灵敏度法估算出各类负荷的比重,从而聚合得到最终的负荷模型;而文献[24]基于统计调查和馈线上的故障数据确定负荷构成相关参数,然后利用总体测辨法辨识其余参数。

1.4 负荷建模的应用现状

目前在实际应用中,各电网采用的负荷模型主要为静态负荷模型和含一定比例电动机的动态负荷模型。我国国家电网有限公司系统采用的具体负荷模型及参数如下^[25]:

- a. 华东电网。上海、江苏、浙江、安徽:60%恒功率+40%恒阻抗,不计及频率特性。福建:40%恒功率+60%恒阻抗,有功功率的频率影响因子 $L_{DP}=1.2$,无功功率的频率影响因子 $L_{DQ}=-2.0$ 。
- b. 华北电网。京津冀:60%电动机+40%恒阻抗;山东、山西:50%电动机+50%恒阻抗;均不计及频率特性。
- c. 华中电网。河南、湖南、湖北:65%电动机+35%恒阻抗;江西:50%电动机+50%恒阻抗;均不计及频率特性。
- d. 东北电网。东北电网:50%恒功率+50%恒阻抗,不计及频率特性。
- e. 西北电网。陕西:30%电动机+70%恒阻抗;甘肃、宁夏:60%电动机+40%恒阻抗;青海:10%电动机+90%恒阻抗;新疆:60%电动机+40%恒阻抗;均不计及频率特性。
- f. 西南电网。四川、重庆:40%电动机+60%恒阻抗,不计及频率特性;西藏:SLM模型(工业负荷70%电动机、其他负荷30%电动机) $L_{DP}=1.8$ 。
- g. 南方电网。云南:30%恒阻抗+30%恒电流+40%恒功率;海南:40%恒阻抗+30%恒电流+30%恒功率;广西、广东、贵州:30%恒阻抗+40%恒电流+30%恒功率;香港:40%恒阻抗+60%恒功率;均考虑频率特性。频率因子取值分别为:广东、香港: $L_{DP}=1.8$, $L_{DQ}=-2.0$;广西、贵州、云南: $L_{DP}=1.2$, $L_{DQ}=-2.0$;海南: $L_{DP}=2.0$, $L_{DQ}=-2.0$ 。

尽管目前负荷建模理论已取得了一定的成果,但在实际应用中却比较滞后,部分电网仍采用单纯的静态负荷模型。C4.605工作小组对各国负荷模型应用情况的调查结果也表明,仍有70%的电网在电力系统稳定计算中采用静态负荷模型^[4]。可见,负荷建模成果的推广与应用任重而道远。

1.5 负荷建模存在的问题

虽然负荷建模理论和方法已经取得了一定的成果,但也存在其局限性,主要体现在两方面。

- a. 难以解决负荷时变性问题。理论上说,负荷构成具有时变性和随机性,因此负荷模型也需要实现空间上因地制宜,时间上实时调整,但这过于复杂,在实际应用时也无必要。从1.4节可以看出,在实际工程应用中,各电网选择采用统一的负荷模型,而这显然过于粗糙,也与实际不符。此外,传统负荷建模工作通常离

线进行,这对于解决负荷时变性问题是不利的。

b. 难以解决负荷的复杂性问题。现有的负荷建模对象为传统负荷,随着电网建设的不断推进,大量新型负荷接入电网,负荷的复杂性进一步增加。新型负荷与传统负荷的负荷特性存在较大差异,现有的负荷模型已经难以描述新型负荷。

2 负荷建模发展趋势

2.1 负荷建模新挑战

负荷自身成分发生的变化给负荷建模带来了新挑战。

a. 负荷复杂性进一步提高。随着电力电子技术的广泛应用,LED灯和变频拖动设备等“电力电子化”负荷接入比例不断上升。这类负荷表现出较强的自主控制能力,有功功率特性更接近于恒功率,而无功功率往往表现出负特性,动态响应比传统电动机更慢一些^[26],这对系统的电压、频率稳定等造成了不利影响。

b. 负荷波动性进一步提高。一方面,分布式电源与储能得到快速发展,其接入可就地消纳部分负荷,其功率倒供则使单向的功率流动变为双向,极大地改变了负荷特性。此外,分布式电源存在随机性和弱可控性等特点,且具有很强的季节性,进一步提高了负荷的时变性和随机性^[27];另一方面,大规模高速铁路、动车组等投入比例不断增大,其运行将给电网造成较大的冲击性;电动汽车不断推广,其主动性和随机性给电网的运行带来了不确定因素^[28];一系列新型负荷的接入将进一步加剧负荷的波动性^[29]。

c. 负荷可控性提高。负荷主动控制能力的提高,一方面是由于其自身具有越来越强的控制能力,另一方面是电力系统对负荷的调控能力越来越强。例如柔性负荷可作为发电调度的补充,丰富电网调度运行的调节手段,有利于削峰填谷、平衡间歇式能源波动和提供辅助服务,但同时也影响了负荷原有的分布特性^[30]。

d. 负荷敏感性提高。近年来,负荷对气象的敏感程度有所增加。随着经济的增长和极端天气的增加,用户用电行为也发生了较大变化,气象敏感负荷水平异常增长。据统计,上海、苏州等中心电网夏季空调负荷占比高达40%以上,2017年苏州夏季的最大负荷功率与预测值相差100万kW。

综上所述,负荷成分中主动负荷的比例不断增加,负荷的双向性、不确定性、可控性和敏感性有所提高,这对于电网稳定来说有利有弊,但对于负荷建模来说则是难上加难。

2.2 负荷建模新需求

2.2.1 电网结构变化

一方面,随着特高压直流的发展,受端电网的直流落点增多、容量增大。截至2017年底,国家电网范围内在运特高压直流达到10回,直流额定输送总容量达到83.6GW^[31]。与此同时,电网一体化特征不断凸显,直流送受端、交直流之间耦合日趋紧密,特高压电网过渡期“强直弱交”特性更加明显。另一方面,受空气污染的影响,部分城市关停小火电机组,迁移中心火电站,城市电网空间分布发生较大变化,面临空心化局面。

此外,选择在进线端断路器加装低压脱扣器的用户不断增多,当电网电压暂降时,低压脱扣装置将瞬时或延时后动作使断路器跳闸断开电源,从而保护配电设备和用电设备的安全,但这使得故障情况下的电网稳定问题更加复杂^[32]。

2.2.2 电压稳定及频率稳定问题凸显

随着特高压直流的接入,由于受端电网联系日益紧密,有利于缩短电气距离,减小同步电网内机组间相角差,系统的功角稳定水平有所提升;但特高压直流闭锁将导致大规模潮流转移,受端电网产生大功率缺额,将对电网频率造成巨大冲击^[33],可能导致低频减载动作。以“9·19”锦苏直流双极闭锁事故为例,由于小负荷方式下电网开机规模较小导致系统转动惯量降低,且机组的一次调频情况不及预期,华东电网损失功率约490万kW,频率最低跌落至49.563Hz^[34]。

另外,在特高压直流大功率送电的方式下,受端电网动态电压支撑能力较弱,其中,多直流落点的受端电网电压稳定问题更为突出。送受端交互影响问题严重,交、直流混联电网中,受端交流短路故障时,系统电压下降,可能又会引发直流换相失败,系统连锁故障风险不断增加。

当主网发生短路故障或是雷击引发输电线路短路故障时,会引起大范围电压暂降,在用户已安装低压脱

扣器的情况下,大量负荷会因低压脱扣器动作而剥离电网。以2014年7月8日东莞电网220 kV莞景乙线BC相间短路故障为例,低压脱扣损失负荷约1 012.4 MW,进一步加剧了电网频率的波动和振荡^[35]。

总的来说,大容量直流的接入提高了功角稳定性,但暂态电压稳定和频率稳定问题日益突出。传统的负荷模型更关注与功角稳定相关的有功与电压特性,而暂态电压稳定和频率稳定对负荷的无功特性和频率特性比较敏感。因此,负荷模型的无功特性和频率特性需成为新的研究重点。

2.3 负荷建模新机遇

随着大数据时代的到来和计算机性能的飞跃,人工智能AI(artificial intelligence)技术有了质的发展,以深度学习为代表的机器学习算法在图像识别和语音识别等领域的应用取得了极大的成功。若能将其应用于电力领域,可能有助于解决一些长期性的难题^[36]。

与此同时,电网公司开发了一系列数据平台,包括调度管理系统(OMS)、生产管理系统(PMS)、配电管理系统(DMS)、能量管理系统(EMS)、用电信息采集系统(AMI)、广域测量系统(WAMS)、地理信息系统(GIS)和气象预报系统(WFS)。这些平台提供的海量数据,为人工智能算法的应用提供了良好的数据支撑。

目前,人工智能算法在负荷领域的应用已有一定尝试,如文献[37-39]将深度学习等算法应用于负荷预测,对比验证结果表明基于人工智能算法的预测结果具有更高的准确度。深度学习等新一代人工智能技术,能够提取复杂数据的深层特征,因而对于解决负荷的复杂性等问题有一定优势,而海量负荷数据则为负荷侧人工智能的实现提供了可能。同样,在负荷建模领域,可借助人工智能算法在特征挖掘方面的优势,解决负荷模型的复杂性和模型参数的时变性难题^[40]。

近年来,基于深度学习算法的聚类分析和非侵入式负荷分解(non-intrusive load monitoring and disaggregation,NILMD)算法不断发展^[41-42]。将其应用于负荷建模领域,在用户层面,可以对海量底层用户负荷曲线进行聚类分析,获得底层用户负荷的行业属性;然后,通过非侵入式负荷分解获得用户负荷的电气构成,进而构建上层负荷节点的时变负荷模型。

3 负荷建模研究展望

3.1 模型结构的“定性正确”

模型结构的“定性正确”即负荷模型的结构是否能够正确反映负荷特性。从1.4节可以看出,目前很多电网仍然采用静态负荷模型或者CLM模型,而SLM模型直接计及配电网阻抗的影响,已经获得了国内电力工业界的广泛认可。因此,在负荷模型的实际应用层面,要解决模型结构的“定性正确”,首先要实现由静态负荷模型或CLM模型向SLM模型的转变。

此外,由前所述,近年来电网的负荷特性发生了重大变化,其主要标志为主动负荷比例不断提高。所谓“主动”是指负荷功率不仅随电压和频率的变化而变化,而且通过内部控制率自变,也即 $P=S(U, f, K)$ 。其中 P 为负荷功率, U 为电压, f 为频率, K 为负荷的内部控制率。为此,笔者提出,在SLM模型的基础上,增加接口模型以反映负荷的主动性,从而建立计及主动负荷的广义综合负荷模型(GSLM, generalized synthesis load model),如图1所示。图1中,C表示配电网无功补偿;ZIP表示静态负荷模型;M表示等值异步电动机;G表示等值发电机; R_D+jX_D 为配电网等值阻抗;H1、H2、H3为反映负荷主动性的接口模型。

3.2 模型参数的“定量准确”

“定量准确”即负荷模型的参数是否准确。模型参数的确定在理论研究层面和工程应用层面存在两个极端:理论上,模型参数随时随地而变,但过于精细,难以实际应用;工程上,往往以不变应万变,又过于粗糙,不符实际。为此,笔者提出了基于“分类、分时、在线、综合”思想的在线综合负荷建模方案,其示意图如图2所示。

“分类”,用于解决参数因地而变的问题。对于负荷特性相差较大的负荷节点,应采用不同的负荷模型。可借助人工智能算法在特征提取方面的优势,挖掘各负荷节点的隐含特征,进行节点分类;而对于同一类别的负荷节点,考虑到工程实用性,可选取典型节点确定负荷模

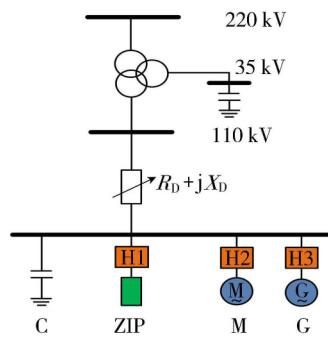


图1 考虑主动负荷的广义综合负荷模型

Fig.1 Generalized synthesis load model considering the active load

型参数，并推广至其余相似节点。

“分时”，用于解决参数因时而变的问题。针对主动负荷比例不断提高、负荷特性随多种因素影响而不断变化导致的模型参数时变性问题，利用大数据及人工智能技术，挖掘负荷特性及模型参数随时间及多影响因素的变化特征，进而开展适用的负荷时序多场景技术研究，分季节和时段给定推荐的模型参数。

“在线”，也即采用在线建模方式。传统负荷建模一般都是离线方式，即离线采集数据然后离线建模，或在线采集数据然后离线建模。由于系统状态和模型参数存在时变性，应采用在线建模方式，即在线采集数据然后在线建模，然后根据获得的一系列模型参数，分析其时变性，为“分时”“分类”应用奠定基础。

“综合”，即综合运用在线统计综合法、在线总体测辨法等负荷建模方法，互相取长补短。一是利用在线统计综合法宏观定性，确定参数变化范围。首先基于人工智能技术及非侵入式负荷分解，感知底层负荷的构成；然后，对海量底层负荷进行分类，获取各类负荷模型的参数；最后，通过逐层聚合及归算获取上层负荷节点总的模型参数。二是利用在线总体测辨法微观定量，搞准典型节点的负荷模型参数。在线采集PMU量测数据及故障录波数据，基于人工智能技术进行数据挖掘，根据不同数据类型分别辨识模型的“电气”参数和“主动性”参数，并对在线统计综合法获得的模型参数进行校核。

基于上述的在线综合负荷建模方案，可建立“分类分时”负荷模型数据库，实现负荷模型参数的在线发布和灵活应用，从而建立负荷建模的长效机制，实现模型参数的“定量准确”。

4 结语

负荷建模发展至今，已经取得了大量的成果，但也存在不足之处。近年来，随着现代电网的快速发展，负荷特性和电网结构都发生了巨大变化，负荷建模面临新挑战和新需求，而人工智能算法的突破为这些难题的解决带来了新思路，负荷建模领域机遇和挑战并存。为此，将未来负荷建模工作总结为解决模型结构的“定性正确”和模型参数的“定量准确”两步走问题。一是建立考虑主动负荷的广义综合负荷模型，实现模型结构的“定性正确”；二是借助人工智能技术，综合采用多种在线建模方法，构建“分类分时”负荷模型数据库，实现模型参数的“定量准确”。

参考文献：

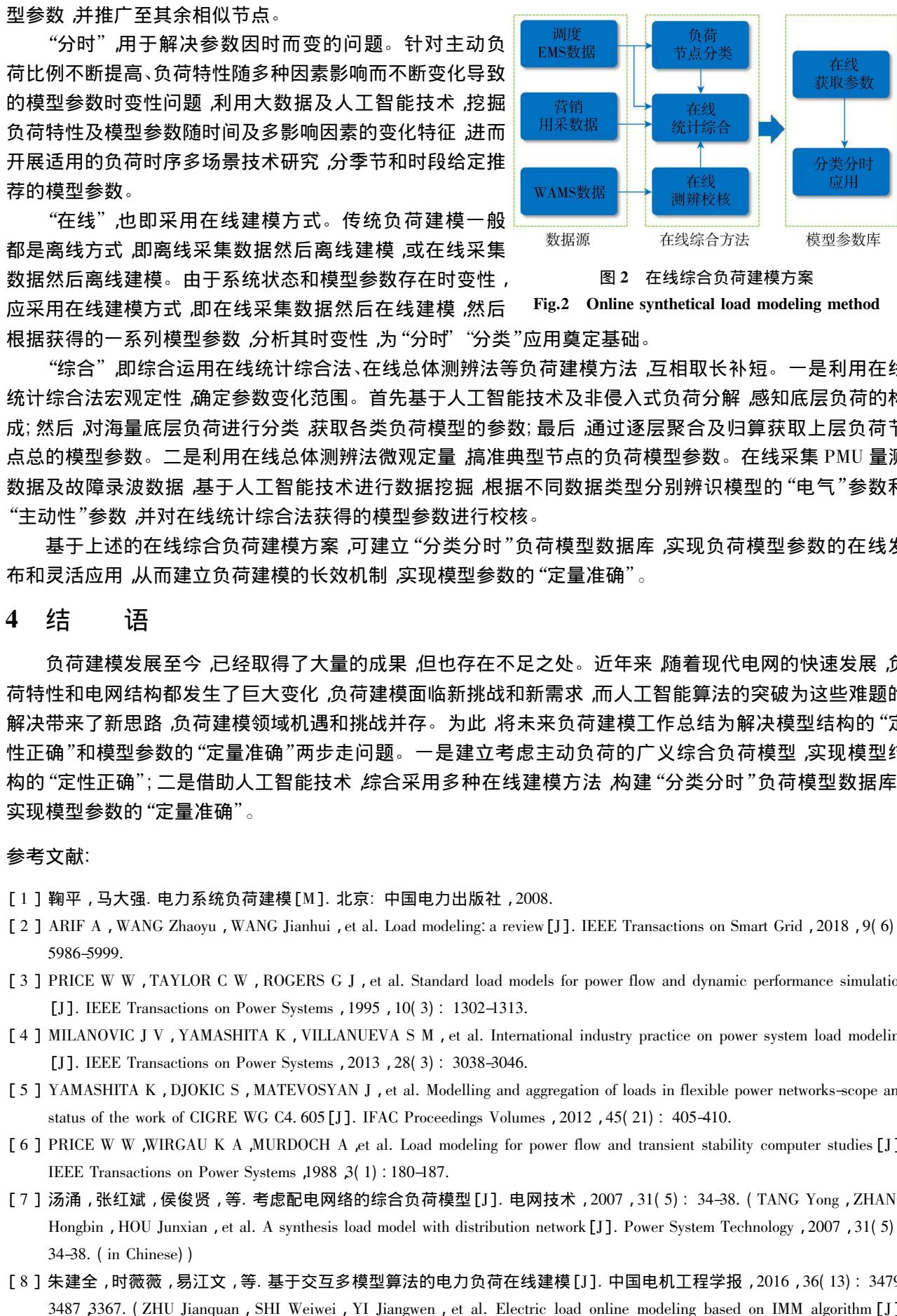


图2 在线综合负荷建模方案

Fig.2 Online synthetical load modeling method

- [1] 鞠平，马大强. 电力系统负荷建模 [M]. 北京：中国电力出版社，2008.
- [2] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Load modeling: a review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6) : 5986-5999.
- [3] PRICE W W, TAYLOR C W, ROGERS G J, et al. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3) : 1302-1313.
- [4] MILANOVIC J V, YAMASHITA K, VILLANUEVA S M, et al. International industry practice on power system load modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3) : 3038-3046.
- [5] YAMASHITA K, DJOKIC S, MATEVOSYAN J, et al. Modelling and aggregation of loads in flexible power networks—scope and status of the work of CIGRE WG C4.605 [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(21) : 405-410.
- [6] PRICE W W, WIRGAU K A, MURDOCH A, et al. Load modeling for power flow and transient stability computer studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1) : 180-187.
- [7] 汤涌，张红斌，侯俊贤，等. 考虑配电网络的综合负荷模型 [J]. 电网技术, 2007, 31(5) : 34-38. (TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network [J]. Power System Technology, 2007, 31(5) : 34-38. (in Chinese))
- [8] 朱建全，时薇薇，易江文，等. 基于交互多模型算法的电力负荷在线建模 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13) : 3479-3487. (ZHU Jianquan, SHI Weiwei, YI Jiangwen, et al. Electric load online modeling based on IMM algorithm [J].)

- Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3479–3487, 3367. (in Chinese)
- [9] 屈星, 李欣然, 李培强, 等. 计及配电网调压的综合负荷建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1695–1705, 1906.
(QU Xing, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Load modeling considering voltage regulation of the distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1695–1705, 1906. (in Chinese))
- [10] 鞠平, 秦川, 黄桦, 等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 1–6. (JU Ping, QIN Chuan, HUAGN Hua, et al. Research trends of power system modeling geared to power smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 1–6. (in Chinese))
- [11] 贺仁睦, 叶静, 徐欢, 等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 165–170, 183. (HE Renmu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement-based load modeling considering frequency characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 165–170, 183. (in Chinese))
- [12] 鞠平, 王耀, 项丽, 等. 考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 1–4, 21. (JU Ping, WANG Yao, XIANG Li, et al. Load modeling for Ningxia Grid with special loads [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 1–4, 21. (in Chinese))
- [13] 林济铿, 刘露, 张闻博, 等. 基于随机模糊聚类的负荷建模与参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 50–58.
(LIN Jikeng, LIU Lu, ZHANG Wenbo, et al. Load modeling and parameter identification based on random fuzziness clustering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 50–58. (in Chinese))
- [14] 宋军英, 陈辉华, 唐外文. 不同负荷模型对湖南电网暂态稳定水平的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 29–33. (SONG Junying, CHEN Huihua, TANG Waiwen. Influence of different load models on transient stability level of hunan power grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 29–33. (in Chinese))
- [15] 曹路, 励刚, 武寒. 马达负荷模型对华东电网暂态稳定性的影响分析[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 6–10. (CAO Lu, LI Gang, WU Han. Impact of induction motor model on transient stability of East China Power Grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 6–10. (in Chinese))
- [16] 张鹏飞, 罗承廉, 孟远景, 等. 河南电网送端和受端负荷模型对稳定极限的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 51–55.
(ZHANG Pengfei, LUO Chenglian, MENG Yuanjing, et al. Influence of load models in sending and receiving ends of Henan [J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 51–55. (in Chinese))
- [17] KE E W, HAQUE M E. Dynamic load modelling of a paper mill for small signal stability studies [J]. Iet Generation Transmission and Distribution, 2014, 8(1): 131–141.
- [18] WELLHÖFER S, HÖHN S, LUTHER M. Impact of load modeling on small signal stability investigations [C]//IEEE/PES. International Conference on Power System Technology. Sydney: IEEE, 2016: 1–6.
- [19] 陆子刚, 卫志农, 孙国强, 等. 计及负荷静态特性的电力系统静态状态估计算法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 88–94. (LU Zigang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A state estimation algorithm for power system considering static characteristics of load [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 88–94. (in Chinese))
- [20] 鞠平, 苏玮奕, 秦川. 基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 268–274. (JU Ping, SU Weiyi, QIN Chuan. Coordinated control strategy for the islanded microgrid with battery and controllable load [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) 2018, 46(3): 268–274. (in Chinese))
- [21] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [22] 鞠平, 陈谦, 熊传平, 等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6–9. (JU Ping, CHEN Qian, XIONG Chuaping, et al. Load clustering and synthetic modeling based on daily load curves [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 6–9. (in Chinese))
- [23] PATEL A, WEDEWARD K, SMITH M. Parameter estimation for inventory of load models in electric power systems [J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2014(1): 1–6.
- [24] VIGNESH V, CHAKRABARTI S, SRIVASTAVA S C. Classification and modelling of loads in power systems using SVM and optimization approach [C]//IEEE/PES. Power & Energy Society General Meeting, Denver: IEEE, 2015: 1–5.
- [25] 冯学峰, 吕琨璐. 综合负荷建模的研究现状[J]. 电气时代, 2017(10): 94–95, 98. (FENG Xuefeng, LYU Kunlu. Research status of comprehensive load modeling [J]. Electric Age, 2017(10): 94–95, 98. (in Chinese))
- [26] 王海潜, 乔黎伟, 张正利, 等. 空调负荷模型对电网仿真影响[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 31–35, 41. (WANG Haiqian, QIAO Liwei, ZHANG Zhengli, et al. Influence of air conditioners load model on simulation of power grid [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 31–35, 41. (in Chinese))

- [27] 高辉,徐晴,欧阳曾恺,等.含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J].电力工程技术,2018,37(4):21-26.(GAO Hui,XU Qing,OUYANG Zengkai,et al. Analysis of the optimal control strategy for source network load with multi-type distributed power source[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(4): 21-26. (in Chinese))
- [28] 高峰,谈韵,陶远鹏,等.电动汽车驱动充电一体化控制策略研究[J].电力工程技术,2018,37(2): 73-77,113.(GAO Feng,TAN Yun,TAO Yuanpeng,et al. Research on the integrated control strategy of electric vehicle driving and charging[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(2): 73-77,113. (in Chinese))
- [29] 吴峰,徐丹,秦川,等.近海可再生能源综合发电场的非机理等效建模[J].河海大学学报(自然科学版),2017,A5(1):82-89.(WU Feng,XU Dan,QIN Chuan,et al. Non-mechanism equivalent modeling of hybrid offshore renewable energy conversion farm[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences) 2017 A5(1):82-89. (in Chinese))
- [30] 王珂,姚建国,姚良忠,等.电力柔性负荷调度研究综述[J].电力系统自动化,2014,38(20): 127-135.(WANG Ke,YAO Jianguo,YAO Liangzhong,et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20): 127-135. (in Chinese))
- [31] 李兆伟,吴雪莲,曹路,等.抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J].电力系统自动化,2018,A2(22):91-97.(LI Zhaowei,WU Xuelian,CAO Lu,et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems,2018 A2(22):91-97. (in Chinese))
- [32] 欧阳森,李翔,刘平,等.低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验研究[J].电力自动化设备,2017,37(2): 211-218.(OUYANG Sen,LI Xiang,LIU Ping,et al. Experimental research on sensitivity of low voltage releaser to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2): 211-218. (in Chinese))
- [33] 赵良,郭强,覃琴,等.特高压同步电网稳定特性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(34): 47-51.(ZHAO Liang, GUO Qiang,QIN Qin,et al. Analysis on stability characteristics of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 47-51. (in Chinese))
- [34] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等.“9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J].电力系统自动化,2017,41(7): 149-155.(LI Zhaowei,WU Xuelian,ZHUANG Kanqin,et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7): 149-155. (in Chinese))
- [35] 邓福亮.电压暂降对负荷低压脱扣影响的研究[D].广东:华南理工大学,2015.
- [36] IAN G, YOSHUA B, AARON C. Deep learning[M]. Cambridge: MIT Press, 2016.
- [37] DIN G M U, MARNERIDES A K. Short term power load forecasting using Deep Neural Networks[C]//IEEE/PES. International Conference on Computing, NETWORKING and Communications, Santa Clara: IEEE, 2017: 594-598.
- [38] 梁智,孙国强,李虎成,等.基于VMD与PSO优化深度信念网络的短期负荷预测[J].电网技术,2018,42(2): 598-606.(LIANG Zhi,SUN Guoqiang,LI Hucheng,et al. Short-term load forecasting based on VMD and PSO optimized deep belief network[J]. Power System Technology,2018,42(2): 598-606. (in Chinese))
- [39] RYU S, NOH J, KIM H. Deep neural network based demand side short term load forecasting [C]//IEEE/PES. IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Sydney: IEEE, 2016: 3.
- [40] 鞠平,周孝信,陈维江,等.“智能电网+”研究综述[J].电力自动化设备,2018,38(5): 2-11.(JU Ping,ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang,et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5): 2-11. (in Chinese))
- [41] MIN Erxue, GUO Xifeng, LIU Qiang, et al. A survey of clustering with deep learning: from the perspective of network architecture[J]. IEEE Access, 2018, 6: 39501-39514.
- [42] SINGH S, MAJUMDAR A. Deep sparse coding for non-intrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4669-4678.

(收稿日期: 2018-11-02 编辑: 刘晓艳)