

城市电力饱和负荷分析技术及其应用研究综述

肖 欣¹,周渝慧¹,张 宁¹,韩新阳²,薛万磊³,尹 立¹,唐 鑫¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院,北京 100044;2. 国网能源研究院,北京 102209;
3. 国网山东省电力公司经济技术研究院,山东 济南 250021)

摘要: 综述了当前城市电力饱和负荷分析技术及其应用研究情况,阐述了研究饱和负荷的背景和意义,分析了城市电力负荷的特点,提出饱和负荷分析应包括规模、时间和空间 3 个部分。归纳了电力负荷趋于饱和的判据,比较了饱和负荷分析与传统负荷预测的异同。从分析对象和分析机理上对现有分析方法和数学模型进行了分类和概述,并总结了国内外基于饱和负荷分析结论的城市电网规划、电源布局、网源协调、网架优化等方面的应用情况。在此基础上,提出未来的研究应注重探索基于经济发展阶段的饱和负荷分析技术,并与电网规划有效衔接。

关键词: 电力负荷; 饱和; 负荷预测; “S”形曲线; 电网规划

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.025

0 引言

城市电力饱和负荷是近年来能源(电力负荷)预测和电网规划中提出的新概念。能源预测是电力系统规划、计划、用电、调度等部门的基础工作,众多学者进行了负荷预测的研究^[1]。城市电力负荷的变化与城市定位、经济水平、土地规划、产业布局等密切相关,城市电网规划应该摸准电力负荷发展的“天花板”,为电源、输电网和配电网的远期规划提供基础数据,避免重复建设和资源浪费。

电力负荷预测应充分考虑由于土地等外部资源约束而出现的电力负荷饱和状态,并加强对中长期/远景规划的详细分析和广泛论证^[2]。然而,由于部分电力规划设计期较短,未能与城市规划一并确立法定地位,导致电源、变电站、输电网等规划项目常常因为城市居民反对而出现落地困难窘境,或因城市功能定位、产业布局等发生变化而被迫进行较大的调整,造成配电线路频繁切改、输电走廊荒废,非常不利于城市电网和城市市政建设的长远健康发展。

研究城市电力饱和负荷、确定城市电力发展最终形态和规模,具有两方面重要意义:一是以城市电力饱和负荷分析结论作为城市电力中长期/远景规划的重要约束条件,进而借助城市用地规划为未来电力建设预留足够空间;二是以中长期/远景规划指导近期电网建设,减少因电力线路频繁改扩建而导致电网运行费用增加、城市市容市貌破坏,促进电力与城市协调发展。

1 饱和负荷

1.1 城市电力负荷的特点

大规模经济建设初期,城市的用电量和电力负

荷在经济高速发展的带动下较快地增长。但当城市的经济社会发展到一定阶段后,高耗能工业将逐步达到产量峰值并保持稳定^[3],经济发展态势收缩、产业结构调整、能源利用效率、人口和资源环境约束、能源消费总量控制、高能耗产业淘汰、技术升级和转移等多方面的因素将影响经济的持续快速增长,城市的电力负荷增长速度也将放缓甚至停止,呈现一种饱和状态。由于用电量与 GDP 呈正相关,可以根据人均用电量来判断经济发展阶段^[4]。通过研究发现,法、德、意、日、英、美等发达国家在进入发达经济阶段后,人均用电量和人均生活用电量增速减缓,甚至出现负增长,呈现用电饱和的状态。从一个小的区域来看,如果其规划建设用地性质已经确定,在城市规划得以逐步实施、地区充分发展后,负荷将随着用地的开发利用逐步趋于饱和,即负荷的变化规律呈现为“S”形曲线,如图 1 所示。由于区域中供电设备的容量有限,而且可用的土地面积也有限,故所研究区域的面积越小,“S”形曲线的特征越明显^[5-6]。

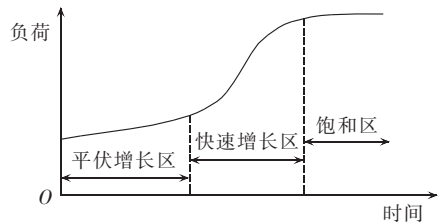


图 1 电力负荷“S”形曲线增长趋势

Fig.1 S-curve of power load increase

“S”形曲线分为 3 个阶段:平伏增长区、快速增长区和饱和区,分别表示负荷缓慢增长、快速增长以及负荷趋于饱和。通常使用逻辑斯蒂(Logistic)模型来拟合“S”形曲线^[7-8]:

$$x_t = \frac{1}{c + a e^{bt}} \quad c > 0, a > 0, b < 0 \quad (1)$$

收稿日期:2013-07-28;修回日期:2014-04-24

基金项目:国家电网公司科技项目

Project supported by Science & Technology Program of State Grid Corporation of China

其中, t 为研究时间; x_t 为电力负荷值; a 、 b 、 c 为常数。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x = \lim_{t \rightarrow \infty} x_t = \frac{1}{c}$, 反映了负荷增长趋于饱和的一般规律。

1.2 定义和判据

1.2.1 饱和负荷定义

区域充分发展后电力负荷将稳定在一定的范围内波动, 这就是该区域的饱和负荷^[9]。饱和负荷分析不仅要预测饱和负荷的规模, 还要分析其出现的时间和空间分布。影响电力饱和负荷的自然因素主要有地形、气候、地理位置; 社会因素主要包括人口流动、交通条件和政治因素^[10]。

1.2.2 负荷饱和判据

参考发达国家不同发展阶段经济和电力需求之间的关系, 一个城市的电力负荷水平达到饱和状态时, 该城市的电力负荷增长或经济社会发展应具有以下特征^[11-12]。

a. 城市电力负荷连续 5 年年增长率不超过 4%。随着经济增速降至临界点后趋于稳定, 城市电力负荷同比不出现明显变化, 此时的电力需求主要以各产业重复再生产耗电和居民生活用电为主。

b. 城市经济增长速度缓慢或者基本不增长, 城市化进程达到理想状态。城市化理论认为, 各个地区城市化水平存在极限点^[13]。城市用电水平也将随着城市规模趋于稳定而表现出平稳发展态势。

c. 城市土地性质变更较少, 产业结构趋于稳定。土地性质和产业结构是影响电力负荷的重要因素。如果一个城市的远景规划、土地用途(性质)变更比较少, 或者从低负荷密度向高负荷密度转变的土地比较少, 则可认为该地区已进入饱和阶段。

1.3 与传统电力负荷预测的关系

根据 IEEE PES 电力规划与实施专业委员会(PSPI)的框架^[14], 电力负荷预测与电力饱和负荷分析均属于能源预测框架下的同一分支, 预测系统的数据、输入、输出、模型均有类似。

电力负荷预测定义^[15]为在充分考虑重要自然和社会影响、系统运行特性等条件下, 研究或利用一套系统地处理过去与未来负荷的数学方法, 在一定精度内确定未来某特定时刻的负荷数值; 一般分为长期(≥ 10 a)、中期(≈ 5 a)、短期(≥ 1 d 且 ≤ 1 a)和超短期(≤ 1 h)4 种。在时间期限上, 饱和负荷应属于远期(超长期)的能源预测。文献^[16]在电力系统中长期负荷预测软件的开发中, 已经考虑到并增加了饱和负荷预测的功能。

但是, 传统、有效的中长期负荷预测方法, 如灰色系统, 在负荷按照“S”形曲线增长或增长处于饱和阶段时误差较大, 预测精度不能满足实际要求^[17]。同时, 饱和负荷分析与远期能源预测又存在不同: 远

期能源预测通常考虑某区域内一个给定的目标年度的电力负荷水平, 一般基于历史数据进行分析预测; 而饱和负荷分析是考虑某区域经济社会充分发展后的电力负荷水平及其出现年份和分布, 一般基于区域规划、发展定位等因素, 并结合分析者的能源预测经验进行分析后得出, 往往还需参考其他发达地区在不同经济发展阶段的经验值^[9]。

2 城市电力饱和负荷分析技术

2.1 概述

根据分析对象不同, 城市电力饱和负荷分析可分为饱和负荷规模分析、饱和负荷时间分析和饱和负荷空间分析 3 类。其中, 规模分析对象为城市电力负荷达到饱和时的用电量($\text{kW} \cdot \text{h}$)和最大用电负荷(kW); 时间分析对象为负荷达到饱和阶段的具体年度或置信区间; 空间分析对象为饱和阶段电力负荷在城市内的空间位置分布情况, 以便更好地布局电源点及线路走廊。

根据分析机理不同, 可分为经济参数模型法和负荷趋势模型法两大类。其中, 经济参数模型法是根据电力负荷和经济发展的关系, 通过经济发展、产业结构、市政建设、人口、居民生活水平等方面的参数分析, 对饱和负荷进行预测, 传统方法有单耗法、电力消费弹性系数法等。经济参数模型法又可分为宏观分析方法和微观分析方法 2 类^[18]; 宏观方法侧重于总量分析, 用于用电量、用电负荷和饱和时间的分析预测; 微观方法侧重于负荷的空间分布。在进行饱和负荷分析时, 应运用宏观分析方法进行总量控制, 运用微观分析方法进行修正调整, 形成饱和负荷分析的闭环工作流程。负荷趋势模型法是依据负荷历史数据, 探求负荷发展变化规律, 提炼计量模型, 按照变化规律分析电力负荷的发展和饱和情况^[19]。

2.2 经济参数模型法

2.2.1 宏观分析类

a. 人均用电量法^[2,20-21]

在对饱和阶段人口容量进行分析和预测的基础上, 参照经济发达国家和地区的经济发展和电量增长规律, 研究得出本地区电力需求增长表现饱和态势时的人均用电量和负荷特性指标, 并据此推算饱和负荷的大小, 其计算式为:

$$P_{L,s} = B_{\max} W_e / T \quad (2)$$

其中, $P_{L,s}$ 为城市饱和负荷大小; $B_{\max}$ 为城市规划最大人口容量; W_e 为人均用电量; T 为最大负荷利用小时数, 根据国内外经济发达城市经验值取值。

b. 负荷密度法^[12,22]

通过参照经济发达国家和地区主要功能区的负荷密度情况, 分析得出本地区电力需求增长表现饱

和态势时的饱和负荷密度,在此基础上结合城市土地规划推算出饱和负荷的大小,其计算式为:

$$P_{L,s} = DS + \Delta P \quad (3)$$

其中, D 为城市饱和负荷密度,根据国内外同类型城市发展情况并结合城市功能定位、产业分布、资源条件、产业结构等综合比较后取值; S 为城市规划建设用地面积,根据城市总体规划取值; ΔP 为预测修正量,指城市非建设用地(如绿地、水域)内的电力负荷。

c. 系统动力与计量经济组合模型^[23-27]。

饱和负荷受政治、经济、人口、环境等多方面影响,单一的预测方法很难提高预测的精度。系统动力学以定性分析为先导、定量分析为支持,从系统内部的机制、微观结构入手来分析研究系统内部结构与其动态行为的关系;而计量经济学是定量分析研究具有随机性特性的经济变量关系的有效手段。系统动力与计量经济组合模型是首先基于计量经济学找出电力需求的主要影响因素,在此基础上建立电力需求与其影响因子的计量方程,然后建立考虑各方面影响的系统动力学电力需求预测模型,最后将人口、经济、电力需求的子系统方程代入系统动力学模型,综合电力经济关系计量经济模型与电力负荷系统动力模型进行饱和和分析。组合模型为:

$$P_{L,s} = \omega_1 L_{ECE} + \omega_2 L_{ECS} \quad (4)$$

其中, L_{ECE} 为基于电力经济计量关系的负荷值; L_{ECS} 为基于电力系统动力模拟的负荷值; ω_1, ω_2 分别为 2 种值的权重,通过专家打分或误差分析得到。

2.2.2 微观分析类

a. 空间负荷法(用地仿真法)^[11,28-30]。

根据城市总体规划中的用地性质把每个规划区分为若干个地块,每种用地的负荷密度根据“城中心取高值,城郊结合区取中值,郊区取低值”的原则^[31],参照经济发达国家和地区主要功能区的负荷密度情况,对所处不同区域的不同用地性质地块取不同的负荷密度值,可以得出规划区各个地块的远期负荷预测值,将同一规划区内各个地块负荷预测值相加,即可得出规划区内饱和年负荷预测值。其计算式为:

$$P_{L,s} = \delta_m \sum_{m=1}^M D_{m,s} S_m V_m \quad (5)$$

其中, δ_m 为负荷同时率系数; $D_{m,s}$ 为第 m 个地块的饱和负荷密度; S_m 为第 m 个地块的规划用地面积; V_m 为第 m 个地块规划的建筑容积率; M 为地块数。

b. 辐射效应法^[32]。

各地块负荷密度之间存在辐射作用,一些负荷密度很高的地块会对周边区域的负荷密度有比较明显的拉抬作用;同样,负荷密度比较低的地块,也会延缓周边区域负荷的增长。辐射作用的本质含义是,负荷密度下降或上升的梯度(或方向导数)的模

不会过大。负荷密度是标量,负荷密度的辐射作用类似于其他标量场,因此,可将负荷密度的空间分布视为二维标量场。确定负荷密度标量场,需首先确定边界条件,再确定标量场中心点及其负荷密度,以及梯度函数 ∇u ,且有:

$$\nabla u = \frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{j} \quad (6)$$

其中, u 为负荷密度函数; x, y 为横、纵坐标变量。

式(6)要求标量场各方向势的变化是连续的。而各中心点之间的距离相对较远,中间有其他中区间隔,不能用式(6)计算。考虑中心点间辐射效应,要求各地块的负荷密度与其相邻地块平均负荷密度的偏差控制在一定范围内,即:

$$(1-r)\bar{D}_m \leq D_m \leq (1+r)\bar{D}_m \quad (7)$$

其中, D_m 为第 m 个地块负荷密度; $\bar{D}_m$ 为与第 m 个地块相邻各地块的平均负荷密度; r 为波动比例。

通过上述方法,可以同时考虑主中心点与其他中心点之间的辐射效应,也可以考虑各个中心点相互之间的辐射效应。

c. 蚁群元胞自动机模型^[33-34]。

该方法的核心是对各类土地元胞转换规则的深入挖掘。影响城市土地性质转变的因素相当于蚁群理论中的信息素,信息素作用于土地元胞的转移,从而计算得到城市用地性质转变的概率;再通过研究各类土地性质下的负荷密度变化规律,预测城市未来电力负荷;并通过“S”形曲线来判断达到饱和状态的时机。其模型为:

$$L(t) = \delta(t) \sum_{g=1}^G C_g(t) \varphi_g(t) \quad (8)$$

其中, $L(t)$ 为 t 时刻的城市用电负荷; $C_g(t)$ 为 t 时刻第 g 种类型土地的面积; $\varphi_g(t)$ 为 t 时刻第 g 种类型土地的负荷密度,对于每一个元胞,其密度可以看成是相同的; $\delta(t)$ 为 t 时刻各种负荷的同时率; G 为城市土地类型数。

2.3 负荷趋势模型法

a. 逻辑斯蒂曲线拟合^[8,30,35]。

逻辑斯蒂曲线是生长曲线模型的一种。生长曲线的特点是开始增长较为缓慢,以后在某一段时间内增长速度较快,当达到某一极限之后,增长速度又趋缓慢,这一特点与电力负荷的增长规律有共同之处,将逻辑斯蒂曲线应用于饱和负荷预测是一种合适的方法。逻辑斯蒂曲线方程变形后可得到 $y = P_{L,s}(1 + ae^{-bx})$, $P_{L,s}$ 即为饱和值。拟合逻辑斯蒂曲线可采用四点法,即根据实测数据的 4 个特殊数据点来估计饱和值。其基本计算方法为:

$$P_{L,s} = \frac{N_1 N_4 (N_2 + N_3) - N_2 N_3 (N_1 + N_4)}{N_1 N_4 - N_2 N_3} \quad (9)$$

$(x_1, N_1), (x_2, N_2), (x_3, N_3), (x_4, N_4)$ 为已知实测数

据,并且 (x_1, N_1) 、 (x_4, N_4) 为实测数据的首尾 2 点, (x_2, N_2) 、 (x_3, N_3) 为中间 2 点,并满足 $x_1 + x_4 = x_2 + x_3$ 。

为确保所得到饱和值的准确度,要求所选取的 4 个数据点具有一定的特殊性。根据取样法的要求,统计历史年的数据条数,确保其为 4 的倍数,然后从当年开始倒推。选取相同间隔的 4 个数据作为计算饱和值的点,且给定的历史年负荷数据越多(即所拟合的“S”形曲线上的已知点给得越多),利用该方法求得的饱和值越准确。

b. 灰色 Verhulst 模型^[16,36]。

传统的灰色 GM(1,1)模型比较适用于具有较强指数规律的负荷序列,描述单调的变化过程。而当负荷按照“S”形曲线进行增长或增长处于饱和阶段时,若采用该灰色模型则预测误差较大,预测精度不满足实际要求,为此将灰色 Verhulst 模型引入到负荷预测中来,很好地解决了该问题,同时保留了灰色预测方法的优势和特点。首先由原始样本数据序列 $x^{(0)}$ 分别求得一阶累加(1-AGO)的新数据序列 $x^{(1)}$ 以及紧邻均值生成序列 $z^{(1)}$,然后建立灰色 Verhulst 模型的白化微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + \alpha x^{(1)}(t) = \beta (x^{(1)}(t))^2 \quad (10)$$

其中, α 、 β 为参数项,其最小二乘估计为:

$$A = [\alpha \ \beta]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

取 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(0)$,求解微分方程(10)可得灰色 Verhulst 模型的事件响应式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{\alpha x^{(1)}(0)}{\beta x^{(1)}(0) + (\alpha - \beta x^{(1)}(0))e^{\alpha k}} \quad (12)$$

其中, $k=0,1,\dots$ 。

对式(12)做一阶累减还原(1-IAGO),得到原始序列 $x^{(0)}$ 的灰色 Verhulst 预测模型为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad k=0,1,\dots \quad (13)$$

在实际分析当中,常遇到原始序列 $x^{(0)}$ 本身成 S 行的过程,这样可取原始序列为 $x^{(1)}$,其 1-AGO 新序列为 $x^{(0)}$,建立 Verhulst 模型直接对 $x^{(1)}$ 进行模拟。

c. 非线性回归校正模型。

非线性回归模型是中长期负荷预测的一种有效的方法,对常规变化趋势的负荷有很好的拟合性,具有直观性强、计算简单、可检验等优点,但其对增长处于饱和阶段的负荷预测误差较大。通过对非线性

回归模型进行校正可以很好地解决这个问题。该模型的推导、构建流程及应用详见文献[37]。

3 主要应用

城市电力规划作为城市总体规划的组成部分,应合理安排城市电网电源,确定城市电网结构,布置规划区内电力设施建设用地位置、规模和形式,及各级高压线路走廊宽度、方位、地下电力管线的位置和走向,预留电力设施用地,以满足城市总体规划^[38]。基于饱和负荷分析的城市电网规划、电源布局、网源协调、网架优化已逐渐得到重视和应用。

文献[2]以济南电力饱和和负荷预测结果为基础,通过对煤炭资源、水资源和环保等条件约束下本地电厂最大允许装机容量和和机组最大可供出力的分析,给出了饱和负荷阶段济南市 110 kV 及以上电网的变电容量需求及其布局。文献[7]以苏州工业园区为例建立了以饱和负荷及目标网架指导电网中短期规划、建设的思路,将饱和负荷分析方法应用到其空间负荷预测中,取得了较好效果。文献[9]针对北京燕山石化电网饱和和负荷分析结论与负荷分布进行电力电量平衡,提出了大型工业区高压配电网建设的网架结构优化方法。文献[31]设计了一种具有“远见性”的电网规划方法,即先制定饱和年(未来 30 a 或更多)电网网架,再参照此网架和近景年(未来 5 a)负荷预测值制定近景年电网网架,弥补了常规电网规划方法“眼光短浅”的不足,尤其适合新开发区的电网规划,并结合安徽定远电网规划展示其具体实现过程。文献[39]对饱和负荷下的输电网规划进行研究,设计了一种基于风险度评估的方法,把影响电网规划的多种离散不确定性因素转变为各个多场景区间,利用多场景规划技术处理饱和负荷阶段输电网规划所面临的不确定因素。文献[40]采用空间负荷预测方法对泰安城区饱和负荷进行分析,在此基础上研究了变电站布点、接线方式和目标网架模型。文献[41]通过对济南市不同用地性质的分析,确定了饱和负荷在时间和空间上的具体分布情况,进而指导电源规划、站址规划、走廊规划等。

国内部分科研院所和电力公司在科研和规划专项中对饱和负荷分析进行了探索和应用。国网北京经济技术研究院在《输配电电压序列优化研究》^[42]中对中国主要电网远景年负荷的规模进行预测,并结合城市化进程和社会主义新农村建设,从多个角度分析预测各类典型地区饱和负荷密度的范围,并以此为据对重庆电网进行了输配电电压序列优化^[43]。河北省电力研究院在《河北南网远景 500 千伏目标网架研究》^[44]中以饱和负荷密度分析与饱和负荷需求预测结果为基础,进行了变电总容量需求测算,制定

了2015年、2020年、2030年及2030年以后的500 kV及以上电网的发展目标。江苏省电力公司南京供电公司在《南京主城饱和负荷研究暨电网专项规划研究》^[45]中形成城市规划和电网规划“闭环协调双向负责”机制,提高了城市建设对规划变电站站址及电力通道的预控能力,为解决城市发展核心区电力设施落实困难的突出问题提供有效途径。

4 结论与展望

分析城市电力饱和负荷,可以推知在当前城市总体规划的情景下该城市电网将达到的最大规模,并推算城市内不同地区电网发展的最终形态。以最终形态为目标来指导近期电网建设,可以避免今后不必要的电网改扩建工程,提高城市电网建设和维护资金的效用,增强电网企业的可持续发展能力,促进城市电网与城市经济社会的协调发展。未来的城市电力规划应充分考虑电力饱和负荷分析结论,注重电网与电源协调、输电网与配电网协调、新技术新设备应用等,规划出满足现代社会需求、适应科学发展的城市电力发展规划方案。

未来的饱和负荷研究工作中,应注重以下几点:

a. 应注重与经济社会发展的紧密联系,着力研究经济趋于饱和阶段的经济总量、产业结构、人口变化、消费需求、技术进步、功能定位、基础设施、公共服务等方面的指标体系和量化特征,构建工业化、城镇化、国际化进程与电力需求增长之间的定量关系;

b. 应注重进一步研究电力负荷饱和的科学依据,并结合地理信息系统、卫星遥感成像等技术对重点城市空间饱和负荷分布进行研究;

c. 应注重组合模型在饱和分析中的应用,研究组合模型的权重、精度,提高分析的科学性和可行性;

d. 应注重研究智能电网背景下,未来需求侧资源参与互动以及分布式电源、电动汽车、储能技术、节能技术对饱和负荷水平的深刻影响。

参考文献:

- [1] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):1-11.
KANG Chongqing,XIA Qing,ZHANG Boming. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(17):1-11.
- [2] 崔凯,李敬如,刘海波,等. 城市负荷饱和阶段电力规划方法及其在济南电网中的应用[J]. 电网技术,2007,31(增刊2):131-134.
CUI Kai,LI Jingru,LIU Haibo,et al. City's power planning methods at the stage of load saturation and its application in Ji'nan Power Grid[J]. Power System Technology,2007,31(Supplement 2):131-134.
- [3] 刘嘉,陈文颖,刘德顺. 中国能源服务需求预测模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(3):481-484.
LIU Jia,CHEN Wenying,LIU Deshun. China energy service de-

- mand projection model[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2010,50(3):481-484.
- [4] 胡兆光. 电力经济学引论[M]. 北京:清华大学出版社,2013:181-184.
- [5] LEE W H. Spatial electric load forecasting[M]. 2nd ed. Boca Raton,FL,USA:CRC Press,2002:91-101.
- [6] 胡列翔,徐谦,张全明,等. 电网发展的阶段论[J]. 浙江电力,2011(12):9-11.
HU Liexiang,XU Qian,ZHANG Quanming,et al. On stage of power grid development[J]. Zhejiang Electric Power,2011(12):9-11.
- [7] 马晓东. 苏州地区饱和负荷及目标网架研究[D]. 南京:东南大学,2006.
MA Xiaodong. Research on saturated load and goal grid framework in Suzhou City[D]. Nanjing:Southeast China University,2006.
- [8] JIA Yudong,LI Shenghu,TAN Yun,et al. Improved parametric estimation of logistic model for saturated load forecast[C]//IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai,China:IEEE,2012:1-4.
- [9] 左向红. 大型工业区高压配电网分析与规划研究[D]. 北京:华北电力大学,2005.
ZUO Xianghong. Analysis and planning study for large-scale industrial high-voltage distribution network[D]. Beijing:North China Electric Power University,2005.
- [10] 王芳东,林韩,温步瀛,等. 基于地理区位因素和经济曲线饱和态势分析的饱和负荷预测研究[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十六届学术年会暨中国电机工程学会电力系统专业委员会2010年年会论文集. 上海:中国电机工程学会,2010:1-6.
- [11] 江新琴,李喜兰. 基于空间饱和负荷密度的城市远景饱和负荷预测[J]. 福州大学学报:自然科学版,2008,36(4):532-536.
JIANG Xinqin,LI Xilan. City future saturated load forecasting based model of saturated load density[J]. Journal of Fuzhou University:Natural Science,2008,36(4):532-536.
- [12] 崔凯,李敬如,赵彪,等. 城市饱和负荷及其预测方法研究[J]. 电力技术经济,2008,20(6):34-38.
CUI Kai,LI Jingru,ZHAO Biao,et al. Research on city saturated load and its forecast methods[J]. Electric Power Technologic Economics,2008,20(6):34-38.
- [13] 陈彦光,罗静. 城市化水平与城市化速度的关系探讨——中国城市化速度和城市化水平饱和值的初步推断[J]. 地理研究,2006,25(6):1063-1072.
CHEN Yanguang,LUO Jing. Derivation of relations between urbanization level and velocity from logistic growth model[J]. Geographical Research,2006,25(6):1063-1072.
- [14] IEEE PES PSPI. Energy forecasting[EB/OL]. [2013-10-19]. <http://sites.ieee.org/pes-pspic/about-pspi/subcommittees/energy-forecasting/>.
- [15] 牛东晓,曹树华,卢建昌,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2009:2-3.
- [16] 史林军,唐国庆,马晓东,等. 基于面向对象的电力系统中长期负荷预测软件的开发[J]. 继电器,2007,35(14):59-62.
SHI Linjun,TANG Guoqing,MA Xiaodong,et al. Development of a power system mid-long term load forecasting software based on object oriented programming[J]. Relay,2007,35(14):59-62.
- [17] 张伏生,刘芳,赵文彬,等. 灰色 Verhulst 模型在中长期负荷预测中的应用[J]. 电网技术,2003,27(5):37-39.

- ZHANG Fusheng, LIU Fang, ZHAO Wenbin, et al. Application of grey Verhulst model in middle and long term load forecasting [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 37-39.
- [18] 崔凯, 张丽娟, 李敬如, 等. 天津市中心城区饱和负荷分析与预测[J]. 电力技术经济, 2008, 20(5): 32-36.
- CUI Kai, ZHANG Lijuan, LI Jingru, et al. Analysis and forecast of saturated load for the central city district of Tianjin [J]. Electric Power Technologic Economics, 2008, 20(5): 32-36.
- [19] 袁铁江, 袁建党, 晁勤, 等. 电力系统中长期负荷预测综合模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 143-146.
- YUAN Tiejia, YUAN Jiandang, CHAO Qin, et al. Study on the comprehensive model of mid-long term load forecasting [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 143-146.
- [20] 张丽娟, 张振高, 何云鹏, 等. 天津市中心城区和滨海新区饱和负荷预测分析[C]//2008年中国电机工程学会年会论文集. 西安: 中国电机工程学会, 2008: 1-19.
- [21] 王伟, 房婷婷. 人均用电量法在区域饱和负荷预测中的应用研究[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(1): 21-23.
- WANG Wei, FANG Tingting. The application of per-person electricity consumption method in saturation load forecasting [J]. Power Demand Side Management, 2012, 14(1): 21-23.
- [22] 何海英. 基于土地功能转换的城市饱和负荷预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- HE Haiying. Forecasting the urban saturated load based on the analysis of land-use change [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [23] 谭忠富, 张金良, 吴良器, 等. 中长期负荷预测的计量经济学与系统动力学组合模型[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 186-190.
- TAN Zhongfu, ZHANG Jinliang, WU Liangqi, et al. A model integrating econometric approach with system dynamics for long-term load forecasting [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 186-190.
- [24] 何永秀, 吴良器, 戴爱英, 等. 基于系统动力学与计量经济模型的城市饱和负荷综合预测方法[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(1): 21-25.
- HE Yongxiu, WU Liangqi, DAI Aiyong, et al. Combined saturation load forecast model based on system dynamics and econometrics [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(1): 21-25.
- [25] 王芳东, 林韩, 李传栋, 等. 基于经济曲线饱和态势分析的饱和负荷宏观预测研究[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1485-1490.
- WANG Fangdong, LIN Han, LI Chuandong, et al. Research on saturated load macroscopically forecast based on saturated situation analysis of economy curve [J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1485-1490.
- [26] 王芳东, 林韩, 李传栋, 等. 基于模糊综合评价法的电力负荷饱和程度分析[J]. 电力与电工, 2010, 30(3): 1-3.
- WANG Fangdong, LIN Han, LI Chuandong, et al. Analysis for the degree of electric load saturation based on fuzzy synthesis evaluation [J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2010, 30(3): 1-3.
- [27] 尚芳屹. 组合预测在区域级饱和负荷预测中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- SHANG Fangyi. Application of a combination model in regional saturation load forecasting [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [28] 王天华, 范明天, 王平洋, 等. 基于地理信息系统平台的配电网空间负荷预测[J]. 电网技术, 1999, 23(5): 42-47.
- WANG Tianhua, FAN Mingtian, WANG Pingyang, et al. Spatial load forecasting for distribution planning based on GIS platform [J]. Power System Technology, 1999, 23(5): 42-47.
- [29] 唐晓平, 王东, 刘向上, 等. 基于城市建设用地容积率的中心城区饱和负荷研究[C]//转型与重构——2011中国城市规划年会论文集. 南京: 中国城市规划学会, 2011: 5261-5267.
- [30] VASQUEZ-ARNEZ R L, JARDINI J A, CASOLARI R, et al. A methodology for electrical energy forecast and its spatial allocation over developing boroughs [C]//IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition. Chicago, IL, USA: IEEE, 2008: 1346-1351.
- [31] 张云飞, 刘宗歧, 郭国梁. 考虑饱和影响的近景年电网规划方法研究[J]. 现代电力, 2012, 29(3): 12-16.
- ZHANG Feifei, LIU Zongqi, GUO Guoliang. Research on power grid planning method by considering the influence of saturated years on the power grid in close-range years [J]. Modern Electric Power, 2012, 29(3): 12-16.
- [32] 梁锦照, 夏清. 基于标量场分析的远景负荷预测新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 91-95.
- LIANG Jinzhao, XIA Qing. A new method of long-term load forecasting based on scalar field analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 91-95.
- [33] 王晶, 冯显时, 郭红珍. 基于蚁群元胞自动机理论的城市饱和负荷预测[J]. 中国电力, 2011, 44(7): 17-20.
- WANG Jing, FENG Xianshi, GUO Hongzhen. Urban load saturation forecast based on ant cellular automata theory [J]. Electric Power, 2011, 44(7): 17-20.
- [34] 赵强, 景罗, 赵光俊, 等. 顾及空间异质性的多尺度空间负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 91-96.
- ZHAO Qiang, JING Luo, ZHAO Guangjun, et al. Multi-scale spatial load forecasting considering spatial heterogeneity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 91-96.
- [35] 肖峻, 杜柏均, 耿芳. 城市电力负荷饱和分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 54-58.
- XIAO Jun, DU Bojun, GENG Fang. A method for city power load saturated analyzing [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 54-58.
- [36] 柏承宇. GM(1,1)幂模型在中长期负荷预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 177-179.
- BAI Chengyu. Application of improved GM(1,1) power model to middle and long term load forecasting [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 177-179.
- [37] 赵海青. 非线性回归校正模型在突变负荷预测中的研究及应用[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(1): 88-91.
- ZHAO Haiqing. Research and application of nonlinear regression correct model in sudden change load forecasting [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(1): 88-91.
- [38] 杨卫红, 李敬如, 刘海波, 等. 适应和谐社会的城市电力规划[J]. 电力技术经济, 2007, 19(5): 10-13.
- YANG Weihong, LI Jingru, LIU Haibo, et al. Urban electric power planning adapting to the harmonious society [J]. Electric Power Technologic Economics, 2007, 19(5): 10-13.
- [39] 周建平, 林韩, 温步瀛. 基于风险评估的饱和负荷输电网规划[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十七届学术年会论文集. 秦皇岛: 中国电机工程学会, 2011: 1-6.
- [40] 王庆. 饱和负荷密度下变电站布点及接线方式研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

- WANG Qing. Study of substation distribution and connection ways based on the saturated load densities[D]. Baoding:North China Electric Power University,2012.
- [41] 于涛. 基于城市规划的电力规划研究——以济南市为例[D]. 济南:山东大学,2009.
- YU Tao. Study on power system planning based on urban planning—a case study of Ji'nan City[D]. Ji'nan:Shandong University,2009.
- [42] 郭剑波,李敬如,卜广全,等. 输配电电压序列优化研究[R]. 北京:国网北京经济技术研究院,2010.
- [43] 崔凯,聂端,张昊昱,等. 重庆电网输配电电压序列优化研究[J]. 能源技术经济,2010,22(7):45-48.
- CUI Kai,NIE Duan,ZHANG Haoyu,et al. Optimization of voltage sequence of power transmission and distribution for Chongqing Power Grid[J]. Energy Technology and Economics,2010,22(7):45-48.
- [44] 张明文. 河北南网远景 500 千伏目标网架研究[R]. 石家庄:河北省电力研究院,2012.

- [45] 江苏省电力公司南京供电公司. 南京主城饱和负荷研究暨电网专项规划研究[R]. 南京:江苏省电力公司南京供电公司,2012.

作者简介:



肖 欣

肖 欣(1989-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为电力市场与运营技术、电力系统可靠性分析(E-mail:xiaoxin0909@yeah.net);

周渝慧(1955-),女,重庆人,教授,研究方向为电力技术经济、电力市场运营、节能调度等;

张 宁(1989-),男,山东滨州人,博士研究生,研究方向为电力系统经济运行模拟、电力供需分析;

韩新阳(1972-),男,山西襄汾人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场分析预测、电力需求侧管理、电力市场营销、电力规划等。

Survey of saturated load analysis technology for urban power system and its application

XIAO Xin¹,ZHOU Yuhui¹,ZHANG Ning¹,HAN Xinyang²,XUE Wanlei³,YIN Li¹,TANG Xin¹

(1. School of Electrical Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China;

2. State Grid Energy Research Institute,Beijing 102209,China;

3. Electric Power Economic and Technology Research Institute,
State Grid Shandong Electric Power Company,Ji'nan 250021,China)

Abstract: The present saturated load analysis technology for urban power system and its application are summarized. The background and significance of saturated load research are expounded,the characteristics of urban power load are analyzed,and it is proposed to include three parts in the saturated load analysis,i.e. scale,temporality and spatiality. The criterions of load saturation are summarized,and the similarities and differences between the saturated load analysis and the traditional load forecast are compared. The current analysis methods and mathematical models are classified and summarized from the viewpoints of analysis object and mechanism and the applications of saturated load analysis in urban network planning,power source layout,grid-source coordination,network optimization,etc. are described,based on which,it is proposed that,the future research should focus on the saturated load analysis technology for economic development phases and its effective connection to network planning.

Key words: electric loads; saturation; electric load forecasting; S-curve; power network planning