

基于 Logistic 模型的电能替代电量预测

刘国静, 谈 健, 李 琥, 胡晓燕, 朱 磊

(国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘 要:随着电能替代战略的不断推进,电能替代电量规模将不断扩大,对未来电网中长期负荷构成将产生较大影响。现有电网中长期负荷预测方法对电能替代电量的考虑尚不够充分,有必要进行单独的分析预测。文中分析了政策对未来电能替代发展的重要影响作用,并给出了宏观层面电能替代电量的计算方法。在此基础上,基于 Logistic 模型分别对终端能源消费总量和电能占终端能源消费比例进行预测,在预测过程中充分结合目前已有的相关研究成果,最终获得电能替代电量预测结果。文中模型可作为传统中长期负荷预测方法的补充,用以指导未来电源、电网和相关能源规划。

关键词:电能替代; Logistic 模型; 电量预测

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)06-0039-05

0 引言

与发达国家相比,我国煤炭等化石能源占终端能源消费的比例偏高^[1],大量直燃煤、直燃油在终端消费环节的粗放、低效利用不仅引起了严重的环境污染,还造成能源资源的浪费,给当前日益严峻的环境保护和节能减排问题带来较大压力。电能具有清洁、高效的优点,为实现经济社会的绿色、可持续发展,我国提出了在终端能源消费环节实施电能替代的发展战略,积极引导以电能替代煤炭、石油等化石能源的直接消费,提高电能在终端能源消费中的比例^[2]。在各级政府及电网公司的推动下,用户参与电能替代的积极性不断提高。电锅炉、港口岸电、电动汽车、热泵等电能替代技术在生产制造、交通、建筑采暖等领域逐步得到更大范围的推广应用^[3-5]。随着电能替代战略的不断推进,电能替代电量必将对电网中长期负荷构成产生更大影响,有必要进行量化分析以指导未来电源、电网,乃至能源发展的相关规划。

电力系统负荷、电量的预测大致可分为参数估计方法和人工智能方法^[6]。文献[7]采用灰色模型进行中长期电量预测,并通过灰色预测模型系数进行优化修正提高了预测精度。文献[8]建立了电网售电量预测的季节自回归滑动平均模型(auto-regressive and moving average, ARMA)模型,能够有效处理售电量数据序列中的季节数据项。文献[9]基于用电行业分类进行中长期电量预测,首先设计了用电行业分类的原则和方法,并采用优选组合预测模型对各行业独立进行电量预测,最后通过多级协

调的方式对各行业预测结果进行修正处理,提高了总体预测精度。文献[10]提出了最小二乘支持向量机算法与占季比预测相结合的电量预测方法,采用最小二乘支持向量机算法对具有周期性规律的季度电量进行预测,采用曲线拟合外推算法对变化幅度较小的月度电量占季比进行预测,最终可获得月度售电量预测结果。上述这些方法主要针对电力消费总量的预测,未直接考虑电能替代电量对预测结果的影响。文献[11]参考用以评估环境压力的环境负荷方程(human impact of population, affluence and technology, IPAT),建立了电能替代电量与人口、经济增长和技术水平间的 IPAT 方程,采用多元非线性回归结合小波神经网络的方法对不同情景下的中长期电能替代电量进行了分析预测。文献[12]通过支持向量机算法实现了电能替代电量与各影响因素间的拟合分析,并采用粒子群优化算法进行支持向量机核函数参数和惩罚系数寻优,有效提高了预测精度。文献[11—12]为开展电能替代电量的单独预测研究提供了新思路,但模型中反映电能替代政策影响程度的相关参数设置较为困难,存在一定的主观性。

为把握未来电能替代电量规模的发展情况,本文分析了能源政策对未来电能替代发展的影响作用,给出了宏观层面电能替代电量的计算方法。结合相关能源政策规划,基于 Logistic 模型对终端能源消费总量和电能占终端能源消费比例分别进行预测,最终可获得未来电能替代电量预测结果。

1 电能替代影响因素

电能替代电量是电力消费总量的组成之一,特

收稿日期:2018-07-10;修回日期:2018-08-19

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5210K0170005)

指的是在一定时期内电能替代其他能源消费的部分。电能替代电量的规模主要受经济、人口、技术和能源政策的影响。具体而言,经济越发达、技术水平越高,电能替代其他能源的形式越多样,电能替代技术的应用范围越广。而人口影响了包括电能在内的终端能源消费总量,能源政策对电能、煤炭、石油等不同能源的选择偏好从一定程度上决定了终端能源消费结构。

在不同时期,电能替代发展的主要推动因素存在一定差异。自电力工业发展伊始,伴随社会各行业电气化水平的不断提高,电能实质也在同步替代其它能源。在这一时期,电能替代规模的扩大主要受经济发展、人口增长、技术进步等因素的推动,电能替代电量与国内生产总值(gross domestic product, GDP)、人口等因素间存在着较强相关性。传统的中长期负荷预测方法通过挖掘电力消费总量与 GDP、人口间的内在联系,实际已在电力消费总量的预测中间接考虑了电能替代电量的影响,但由于未直接考虑能源政策对未来电能替代发展的促进作用,预测结果将具有一定的保守性。

近年来,迫于环境保护和节能减排的压力,我国以清洁、低碳为能源发展目标,着力优化终端能源消费结构,能源政策对终端能源消费的影响日益凸显。以江苏省为例,江苏省通过强制淘汰小容量燃煤(油)锅炉、提高污染排放标准等措施限制高污染、高排放用能方式的发展,间接为电能替代创造了市场发展空间,同时明确将电能替代纳入能源发展规划,对电锅炉、电动汽车、港口岸电、热泵等电能替代技术提供设备购置补贴和运营补贴,积极推动电能替代发展^[13-15]。根据江苏省“十三·五”能源发展规划,“十三·五”期间江苏累计实现电能替代 600 亿 kW·h,年均替代电量约占全社会用电量 2% 左右。为落实电能替代规划,制定了《江苏省推进电能替代工作实施方案》,明确重点领域、任务、目标、工作举措。当前,能源政策已成为影响电能替代电量的重要因素,而传统的中长期负荷预测方法一般仅考虑宏观经济政策,对能源政策与电能替代电量间关系的分析讨论相对较少。

2 电能替代电量预测方法

2.1 电能替代电量计算方法

在微观上,具体某电能替代项目的替代电量可利用电能计量装置进行统计核算,本文主要研究宏观层面电能替代电量的分析预测方法。

在宏观上,电能是否在终端能源消费环节替代

其他能源,可通过电能占终端能源消费比例来反映。若电能占终端能源消费比例增长,则说明电能终端能源消费环节替代了其他能源;若该比例保持不变,则即使电力消费总量增长,也不能表示电能替代电量的增加。据此,电能替代电量可具体表示为如下形式:

$$D_{e,t} = Y_t(S_t - S_{t_0}) \quad (1)$$

式中: t_0 为选取的基准年; $D_{e,t}$ 为基准年后第 t 年相对基准年 t_0 的替代电量; Y_t 为第 t 年的终端能源消费总量; S_t, S_{t_0} 分别为第 t 年和基准年 t_0 电能占终端能源消费比例。

可见,在 S_{t_0} 给定的条件下,电能替代电量将由 Y_t, S_t 两个变量决定。目前对未来电能替代电量的发展规律尚缺乏清晰的认识,因此直接分析预测电能替代电量存在较大困难。但目前政府和专家学者对未来我国能源消费总量在何时达峰、电能占终端能源消费比例在远期的发展水平等已基本达成共识,为终端能源消费总量、电能占终端能源消费比例的分析预测奠定了良好基础。

为此,本文分别对终端能源消费总量、电能占终端能源消费比例进行预测,在此过程中充分结合相关规划以体现电能替代政策影响,而后根据式(1)间接获得电能替代电量预测值。

2.2 预测模型

随着经济结构不断优化,我国未来将逐渐进入以服务业为重点的后工业化时代,对能源消费的需求将自然减少,终端能源消费日趋饱和。类似,电气化水平在达到一定水平后将趋于稳定,电能占终端能源消费比例未来也将呈现饱和性。在对具有饱和增长特征变量的相关预测中,常采用 Logistic 模型^[16]。Logistic 模型表达式为:

$$\frac{dx}{dt} = rx(1 - \frac{x}{k}) \quad (2)$$

初始条件为:

$$x|_{t=t_0} = x_0 \quad (3)$$

式中: x 为待预测变量(具体是由终端能源消费总量、电能占终端能源消费比例等变量组成); t 为时间序列; r 为增长参数, r 在模型中为给定常数,并且有 $r>0$; k 为待预测变量 x 的饱和值。

对式(2)进行简单分析可知,待预测变量 x 增长的初期和中期其增长率较大,后续随着待预测变量 x 的增大,其增长率将逐渐减小,达到饱和值 k 后其增长率为 0,达到饱和。

为获取待预测变量 x 随时间变化的规律,对式(2)左右两边变形后可得:

$$\left[\frac{1}{x} + \frac{r/k}{r - (r/k)x} \right] dx = r dt \quad (4)$$

对式(4)进行积分后可得:

$$\ln |x| - \ln \left| r - \frac{r}{k}x \right| = rt + c \quad (5)$$

式中: c 为积分常数。将初始条件式(3)带入式(5)可得:

$$c = \ln \left| \frac{x_0}{r - (r/k)x_0} \right| - rt_0 \quad (6)$$

进一步将式(6)带入式(5)可得待预测变量 x 随时间变化曲线:

$$x = \frac{k}{1 + \left(\frac{k}{x_0} - 1 \right) e^{[-r(t-t_0)]}} \quad (7)$$

式(7)中未知参数为饱和值 k 和增长率 r , 需要根据历史数据进行拟合估计, 为此做如下假设:

$$Y = \ln \left(\frac{k - x}{x} \right) \quad (8)$$

$$e^a = \frac{k}{x_0} - 1 \quad (9)$$

式中: Y, e^a 为引入参数。对式(7)变形后可得:

$$Y = a - r(t - t_0) \quad (10)$$

式(10)为线性方程, 可根据历史数据进行参数拟合估计。

3 江苏实例分析

3.1 基础数据

以江苏省为例进行分析, 以验证本文方法的有效性。2005—2015 年江苏省终端能源消费总量、全社会用电量等数据如表 1 所示。

表 1 基础数据
Tab.1 Basic data

年份	终端能源消费总量/ 万 t(标准煤)	全社会用电量/ (亿 kW·h)	全社会用电量折合标 准煤/万 t	电能占终端消费 比例/%
2005	16 311.17	2 193.45	2 698.60	16.54
2006	17 860.58	2 569.75	3 161.56	17.70
2007	20 008.61	2 952.02	3 631.87	18.15
2008	21 245.30	3 118.32	3 836.47	18.06
2009	22 667.03	3 313.99	4 077.20	17.99
2010	24 267.83	3 864.37	4 754.33	19.59
2011	25 852.07	4 281.62	5 267.68	20.38
2012	27 112.25	4 580.90	5 635.88	20.79
2013	29 219.75	4 956.62	6 098.13	20.87
2014	29 753.16	5 012.54	6 166.93	20.73
2015	30 247.39	5 114.70	6 292.62	20.80

表 1 中, 2005—2015 年江苏省终端能源消费总量、全社会用电量取自江苏省统计年鉴。理论上, 电能可在终端环节的消费量为全社会用电扣除能源加工领域用电后的用电量, 由于江苏省能源资源相对匮乏, 能源加工行业在国民经济占比较小, 且缺乏该行业用电量数据权威公开的统计, 本文暂假设终端环节的电能消费量等于江苏省统计部门公布的全社会用电量。

各年份全社会用电量可采用热当量法折算为标准煤, 具体按照 1 kW·h 电能热值与 0.123 kg 标准煤热值相等进行折算。将终端能源消费总量、全社会用电量折算为统一量纲后, 可求得电能占终端能源消费比例。

由表 1 可知, 2005—2015 年江苏省终端能源消费总量保持逐年增长态势, 年均增长率达到 8.54%, 但增长速度总体呈下降趋势。2005—2015 年江苏省电能占终端能源消费比例总体呈上升趋势, 平均每年增长 0.43 个百分点。

3.2 终端能源消费总量预测

根据江苏省“十三·五”能源发展规划, 江苏省力争在 2025 年能源消费总量达峰。据此, 分别设定江苏省终端能源消费总量(标准煤)为 40 000 万 t, 38 000 万 t, 36 000 万 t, 34 000 万 t, 32 000 万 t。上述不同终端能源消费总量情况下, 终端能源消费总量模型参数计算结果如表 2 所示。

表 2 模型参数计算结果

Tab.2 Model parameter calculation result

参数	终端能源消费总量/万 t				
	40 000	38 000	36 000	34 000	32 000
r	0.156 4	0.171 3	0.192 4	0.225 1	0.287 1
a	0.347 6	0.273 6	0.200 6	0.137 9	0.123 7
R^2	0.993 1	0.993 8	0.993 7	0.991 1	0.978 5
达峰时间	2037	2034	2030	2026	2021

表 2 中, R^2 为拟合优度, 表示回归曲线对观测值的拟合程度, R^2 越接近 1 则拟合程度越高。对于本文存在截距的一元回归模型, R^2 的计算公式为:

$$R^2 = \frac{\left(\sum x_i y_i \right)^2}{\sum x_i^2 \sum y_i^2} \quad (11)$$

$$x_i = X_i - \bar{X} \quad (12)$$

$$y_i = Y_i - \bar{Y} \quad (13)$$

式中: X_i 为第 i 个自变量; Y_i 为第 i 个因变量。

按照江苏省能源消费 2025 年左右达峰的要求, 全省终端能源消费总量的饱和值约为 34 000 万 t。若对达峰要求适当放宽, 终端能源消费在 2030 年达

峰(全球能源消费总量预计 2030 年左右达峰^[1]), 则对应的饱和值约为 36 000 万 t。

将上述两种情况对应的饱和值 k 和增长率 r 带入到式(7)中可获得江苏省终端能源消费总量随时间变化曲线,如图 1 所示。

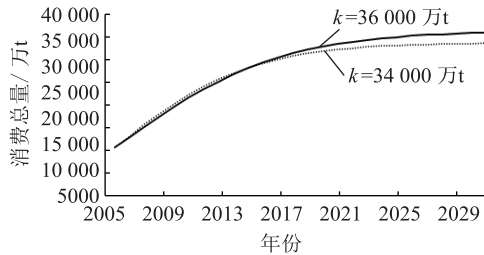


图 1 终端能源消费总量预测结果

Fig.1 The prediction result of terminal total energy consumption

3.3 电能占终端能源消费比例预测

根据相关研究,远期到 2050 年全球终端能源消费结构中电能占比将达 50%左右^[14]。据此,将江苏省电能占终端能源消费比例的饱和值设为 50%。根据表 1 中 2005—2015 年江苏省电能占终端能源消费比例的历史数据进行参数拟合,求得式(7)中的增长率参数 r 等于 0.038 2。电能占终端能源消费比例随时间变化曲线如图 2 所示。

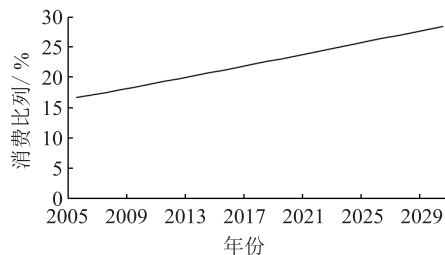


图 2 电能占终端能源消费比例预测结果

Fig.2 The prediction result of the proportion of electric energy in terminal energy consumption

由图 2 可知,2030 年之前江苏省电能占终端能源消费比例将保持持续稳定增长,2030 年电能占终端能源消费比例预计为 28.11%,略高于相关研究中 2030 年全球终端能源消费结构中电能占比为 25%的预测水平。

3.4 电能替代电量预测结果

综合江苏省终端能源消费总量和电能占终端能源消费比例的预测结果,以 2015 年作为基准年,江苏省能源消费总量分别在 2025 年,2030 年达峰两种情况下,未来江苏省电能替代电量规模如表 3 所示。由表 3 可知,随着未来江苏省终端能源消费总量和电能占终端能源消费比例的不提高,电能替代电量规模将保持持续增长,对未来电网负荷构

成将产生重要影响,有必要在电网中长期负荷预测中予以考虑。

表 3 电能替代电量预测结果

Tab.3 The prediction result of electric energy substitution

年份	2020 年/ (亿 kW·h)	2025 年/ (亿 kW·h)	2030 年/ (亿 kW·h)
2025 年达峰	628.3	1 295.1	1 958.4
2030 年达峰	646.4	1 352.9	2 061.4

4 结语

随着国家对节能减排和环境保护工作的重视,能源政策对各类能源的选择表现出明显偏好,政策推动成为促进未来电能替代发展的重要因素。本文模型能够较好描述终端能源消费的饱和增长特征,同时充分利用目前针对能源消费总量、电能占终端能源消费比例的已有研究成果指导未来电能替代电量的预测,提高了预测结果的可信性。

本文模型主要基于终端能源消费和电能占终端能源消费比例自身的发展规律,在后续研究中将进一步考虑人口、经济等外部因素对预测结果的影响作用。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
LIU Zhenya. Global energy interconnection[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2015.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局,财政部,等. 关于推进电能替代的指导意见(发改能源[2016]1054号)[Z]. 2016.
The National Development and Reform Commission, the National Energy Administration, the Ministry of Finance, et al. Guiding opinions on promoting electric energy substitution (NDRC [2016]1054)[Z]. 2016.
- [3] 葛平,杨斌. 固体蓄能供热装置在电能替代工作中的应用研究[J]. 电力需求侧管理, 2016(1):34-36.
GE Ping, YANG Bin. Application of solid storage heating device in the power substitution work[J]. Power Demand Side Management, 2016(1):34-36.
- [4] 王峰,周珏. 港口岸电电能替代技术与效益分析[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(3):35-37.
WANG Feng, ZHOU Jue. Port power substitution technique and benefit analysis[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(3):35-37.
- [5] 练林,曹荣,冯磊. 南京市供热区域外锅炉电能替代潜力调查[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(6):47-49.
LIAN Lin, CAO Rong, FENG Lei. Investigation of boilers energy alternative outside the region of Nanjing heating supply [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(6):47-49.
- [6] 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.
- [7] 鲁宝春, 赵深, 田盈, 等. 优化系数的 NGM(1,1,k) 模型在中长期电量预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015(12):98-103.
LU Baochun, ZHAO Shen, TIAN Ying, et al. Mid-long term electricity consumption forecasting based on improved NGM(1,1,k) gray model[J]. Power System Protection and Control, 2015(12):98-103.
- [8] 崔和瑞, 王娣. 基于季节 ARMA 模型的华北电网售电量预测研究[J]. 华东电力, 2009, 37(1):70-72.
CUI Herui, WANG Di. Study of electricity sales forecasting for north China power grid based on seasonal ARMA model[J]. East China Electric Power, 2009, 37(1):70-72.
- [9] 李翔, 欧阳森, 冯天瑞, 等. 一种基于用电行业分类的中长期电量预测方法[J]. 现代电力, 2015, 32(6):86-91.
LI Xiang, OU Yangsen, FENG Tianrui, et al. A medium and long term electricity demand forecasting method based on industry classification[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(6):86-91.
- [10] 杨柳, 吴延琳, 张超, 等. 改进最小二乘支持向量机电量预测算法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3):71-76.
YANG Liu, WU Yanlin, ZHANG Chao, et al. An improved electricity consumption prediction method of least squares support vector machine[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(3):71-76.
- [11] 孙毅, 周爽, 单葆国, 等. 多情景下的电能替代潜力分析[J]. 电网技术, 2017, 41(1):118-123.
SUN Yi, ZHOU Shuang, SHAN Baoguo, et al. Analysis of electric energy alternative potential under multi-scenario[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):118-123.
- [12] 孙毅, 石墨, 单葆国, 等. 基于粒子群优化支持向量机的电能替代潜力分析方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6):1767-1771.
SUN Yi, SHI Mo, SHAN Baoguo, et al. Electric energy substitution potential analysis method based on Particle swarm optimization support vector machine[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1767-1771.
- [13] 徐昱, 蒋燕萍, 郑正仙, 等. 电动汽车动力电池应用安全提升研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(6):53-57.
XU Yu, JIANG Yanping, ZHENG Zhengxian, et al. Study on safety performance improvement of EV power battery[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(6):53-57.
- [14] 杨扬, 秦桑, 郑锋, 等. 电动汽车充电站的充电定价策略研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(6):58-62.
YANG Yang, QIN Sang, ZHENG Feng, et al. Research on charging pricing strategy of electric vehicle charging station[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(6):58-62.
- [15] 赵书强, 周靖仁, 李志伟, 等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):105-112.
ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):105-112.
- [16] 沈运帷, 李扬, 焦系泽, 等. 新电改背景下需求响应成本效益分析及其融资渠道[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9):124-130, 138.
SHEN Yunwei, LI Yang, JIAO Xize, et al. Cost-benefit analysis and financing channels for demand response under electric reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):124-130, 138.

作者简介:



刘国静

刘国静(1988—),男,博士,工程师,主要从事综合能源规划工作(E-mail:liu.guojing@qq.com);

谈健(1974—),男,硕士,高级工程师,主要从事综合规划研究工作(E-mail:tanjian@js.sgcc.com.cn);

李琥(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事综合规划研究工作。

Forecast of Electric Energy Substitution Based on Logistic Model

LIU Guojing, TAN Jian, LI Hu, HU Xiaoyan, ZHU Lei

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: As the strategy of electric energy substitution continues to advance, the scale of electric energy substitution will continue to expand, and it will have a great impact on the constitution of the medium and long term power load. The existing medium and long term load forecasting method has not fully considered the electric energy substitution, and it is necessary to carry out a separate analysis. The important impact of the policy on the future development of electric energy substitution is analyzed, and the calculation method of electric energy substitution is given. On the basis of above, based on the Logistic model, the total amount of the terminal energy consumption and the proportion of the electricity in the terminal energy consumption are predicted respectively. In the process of forecasting, the existing research results are fully integrated and the credibility of the forecast results is improved. Finally, the forecast result of electric energy substitution can be obtained. This model can be used as a supplement to traditional medium and long term load forecasting and to guide future power, grid and associated energy planning.

Key words: electric energy substitution; Logistic model; electricity forecast

(编辑 钱悦)