

基于多因子考虑的地区电网电采暖负荷预测分析

胡志豪¹,姚锦松¹,龚立娇¹,孙开宁²,樊茂²,张鹏飞¹,常喜强^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院,新疆 石河子 832003;

2. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:冬季电采暖可以有效促进新能源的消纳,减少弃风、弃光现象。然而,大规模电采暖设备产生的谐波会影响电网质量,因此有必要对电采暖负荷进行分析和预测,以利于电网调度及安全运行,缓解电力系统负荷调峰和调频压力。为预测电采暖负荷,以某地区电采暖实际负荷为例,分析了影响电采暖负荷变动的4个因子即稳定负荷因子、气象敏感因子、随机负荷因子、日期类型因子,得出电采暖负荷变动主要影响因子为日期类型因子和气象敏感因子。因此,建立考虑日期类型的分别基于平均温度和基于人体舒适度的最小二乘法拟合预测模型。预测结果表明,两种模型都获得了较高的预测精度,可以用于地区负荷预测。

关键词:负荷预测;影响因子;电采暖;最小二乘法

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0033-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210207

Load Forecasting and Analysis of Electric Heating of Regional Power Grid Based on Multi-factor Consideration

Hu Zhihao¹, Yao Jinsong¹, Gong Lijiao¹, Sun Kaining², Fan Mao², Zhang Pengfei¹, Chang Xiqiang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Electric heating in winter can effectively promote the consumption of new energy and reduce wind and solar abandonment. However, the harmonics generated by large-scale electric heating equipment will affect the quality of power grid. Therefore, it is necessary to analyze and predict the electric heating load in order to alleviate the stress of grid dispatching, and relieve the load peak and frequency regulation pressure of power system. In order to predict the electric heating load, taking the actual electric heating load in a certain area for example, the four factors that affect the changes of electric heating load are analyzed, that is, stable load factor, weather sensitive factor, random load factor and date type factor. Finally, it is concluded that the main influencing factors of electric heating load changes are date type factors and weather sensitive factors. Therefore, a prediction model is established which considers the date type and is based on the average temperature and the least squares method of human comfort. The prediction results show that both models have obtained a high prediction accuracy, and both can be used for regional load forecasting.

Key words: load forecasting; impact factor; electric heating; least squares

0 引言

2016年国家能源局发布《关于电能替代的指导意见》,意见指出,在居民采暖领域要逐步推进煤改电工程,促使电能替代燃煤采暖,并根据替代方式的技术经济特点,因地制宜,分类推进^[1]。事实上,冬季采用电采暖方式既可以供暖,又可以有效促进新

能源的消纳,减少弃风、弃光现象,响应国家政策。同时还可以减少冬季因传统燃煤供暖而造成的空气污染问题,降低雾霾天气出现频率^[2]。近年来,电采暖负荷每年以递增的速度接入电网,大规模的电采暖设备向电网注入谐波分量,并在启动过程中造成电压暂降,直接影响电网设备的运行和增加线路损耗等^[3-5]。因此,研究电采暖负荷特性,建立有效的预测模型,变得尤为重要。

电采暖负荷受多种因素共同影响,包括经济因素、气象因素、日期类型因素、随机因素、政治因素、季节因素等。这里主要研究气象因素和日期类型因素。人体舒适度和平均温度是气象因素中重要的衡量指标,可以很好地反映气象条件对电采暖负荷的影响;不同的日期类型,如休息日和工作日也会造成电采暖负荷的波动。

负荷预测有多种方法,如回归分析法、时间序列法、BP 神经网络算法、卷积神经网络算法、支持向量机等。相较于上述算法,最小二乘法(least squares, LS)拟合简单,理论成熟且通用性强,因此选取最小二乘法拟合作为所提研究的预测方法。

下面研究某地区电采暖负荷特性,利用历史数据,考虑日期类型,分别建立基于平均温度和基于人体舒适度的 LS 预测模型。实际算例结果表明,这两种方法的预测精度较高,都可以用于地区负荷预测。

1 电采暖负荷模型构建分析

电采暖负荷变化与当地经济发展状况、气象条件、随机事件、节假日等因素有关。基于此,将电采暖负荷增量分为稳定负荷增量、气象敏感负荷增量、随机负荷增量、日期类型负荷增量 4 个部分^[6-7],即:

$$\begin{cases} P = (\lambda_s + \lambda_w + \lambda_r + \lambda_d)P \\ \lambda_s + \lambda_w + \lambda_r + \lambda_d = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为电采暖负荷变化量; λ_s 为稳定负荷因子; λ_w 为气象敏感因子; λ_r 为随机负荷因子; λ_d 为日期类型因子。

2 影响因子分析

2.1 稳定负荷因子 λ_s 分析

λ_s 为稳定负荷因子,它与当地经济发展水平息息相关,即地区的电采暖负荷特性变动与地区经济、用电结构变动相关^[8]。从中短期看,地区经济对电采暖负荷变动影响较小。研究的时间跨度不大,故认为 λ_s 对电采暖负荷变化影响权重较小。

2.2 气象敏感因子 λ_w 分析

λ_w 为气象敏感因子,此类因子与天气情况、降雨、气温、空气湿度、风速等密切相关。

图 1 为某地区 2019 年 10 月至 12 月电采暖负荷与气温关系图。总体上电采暖负荷随着时间推

移而递增,这与严冬时节来临,气温逐步下降有关。当气温从 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,电采暖负荷从 $12\ 000\ \text{MVA}$ 上升到约 $16\ 000\ \text{MVA}$,负荷增量较大。由此可得, λ_w 对电采暖负荷变动影响权重较大。

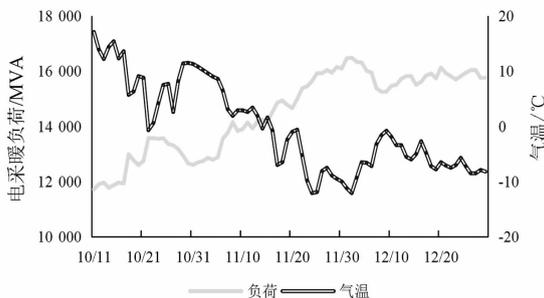


图 1 2019 年 10 月至 12 月电采暖负荷与气温

气象因子对电采暖负荷的影响主要包括室外温度、空气湿度、太阳辐射、风向和风速、降雨(雪)等,其变化规律无法掌握^[9]。从单一气象因子看,温度是影响电采暖负荷的最大因素,占 60% 以上;空气湿度和太阳辐射的影响较小,约占 1% ~ 5%^[10]。

同时,现在的研究表明,单一气象因子对负荷预测的精度易产生偏差。因此,越来越多的研究普遍考虑综合气象因子对电采暖负荷的影响。综合气象因子由数个单一气象因子耦合而成,主要有实感温度、温湿指数、寒湿指数及人体舒适度等指标^[11]。文献[12-13]基于人体舒适度进行负荷预测,预测结果符合预期,反映了人体舒适度和电采暖负荷的高相关性。

人体舒适度是指在不采取任何防寒或防暑措施的情况下,人体在自然环境中的舒适程度^[14],它的计算公式^[11]为:

$$S_D = 1.8T + 0.55(1 - R_h) - 3.2\sqrt{v} + 32 \quad (2)$$

式中: S_D 为人体舒适度指数; T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; R_h 为相对湿度,% ; v 为风速, m/s 。

综上,选取平均温度、人体舒适度两个指标来预测负荷。

2.3 随机负荷因子 λ_r 分析

λ_r 为随机负荷因子,往往由突发事件引起。由于突发事件不可预测,无法用公式衡量,同时它对整个负荷变动贡献相对较小,因此认为 $\lambda_r = 0$ ^[15]。

2.4 日期类型因子 λ_d 分析

λ_d 为日期类型因子,它与负荷一样具有周周期性。负荷的周周期性是指一周 7 天负荷变化所体现的规律^[16]。一般情况下,星期六、星期日属于休息

日,电采暖负荷较轻;而星期一至星期五为工作日,人们需要进行生产活动,电采暖负荷较高^[17-18]。

图2为某地区电采暖负荷星期一至星期日电采暖平均负荷趋势图。数据采集时间为2019年10月11日至2019年12月26日,共计77天,11周。研究图2可得,工作日的日均负荷为14 499 MVA,休息日的日均负荷为14 361 MVA,前者比后者多138 MVA。可知 λ_d 对电采暖负荷变动影响权重较大。

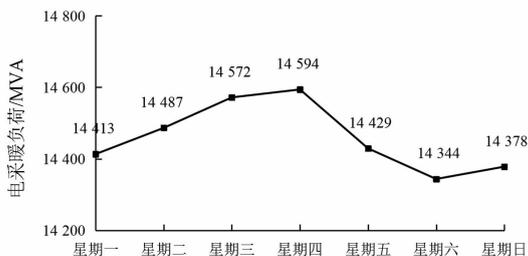


图2 星期一至星期日电采暖平均负荷变化

综上分析,在中短期内,日期类型因子 λ_d 、气象敏感因子 λ_w 会显著影响电采暖负荷变化,而随机负荷因子 λ_r 、稳定负荷因子 λ_s 对负荷变化影响较小。因此,电采暖负荷预测主要考虑 λ_w 和 λ_d 这两个因素。

3 负荷预测模型构建

3.1 样本数据预处理

通常情况下,负荷预测是基于历史数据的。但是由于传感器精度等原因导致负荷预测所采用的历史数据不一定准确。与此同时,突发事件也会影响负荷的大小^[19]。为避免预测结果的偏差,将对异常数据进行处理,选取其前2日及后2日负荷平均值作为新数据:

$$x_n = (x_{n-2} + x_{n-1} + x_{n+1} + x_{n+2})/4 \quad (3)$$

式中: x_n 为异常电采暖负荷; x_{n-2} 、 x_{n-1} 、 x_{n+1} 、 x_{n+2} 分别为异常负荷前2日、前1日、后1日、后2日的电采暖负荷数据。

3.2 预测模型方法

采用最小二乘法对电采暖数据进行线性拟合。最小二乘法是一种数学优化建模方法。它运用逼近原则寻求数据,让实测数据与估计数据平方和最小,即距离和最小,来寻测和匹配最佳的函数数据,从而拟合函数曲线^[20]。

最小二乘法是由勒让德在19世纪发现的,形式为

$$\text{目标函数} = \sum (\text{观测值} - \text{理论值})^2 \quad (4)$$

观测值为数据样本,理论值就是所假定的拟合函数。目标函数即是机器学习中的损失函数,最终目的是得到使目标函数最小化时的拟合函数的模型。样本 $h_\theta(x)$ 为 n 次的多项式拟合,公式为

$$h_\theta(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \theta_3 x^3 + \dots + \theta_n x^n \quad (5)$$

式中, θ_0 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_n 为参数。最小二乘法就是求:

$$\min \sum_{i=1}^n (h_\theta(x_i) - y_i)^2 \quad (6)$$

式中, y_i 为电采暖实际负荷。

3.3 预测模型的建立

采用最小二乘法线性拟合进行负荷预测流程具体如下:

1)对输入的历史负荷数据进行预处理,选取 N 组样本数据,对异常数据平均化处理。

2)区分日期类型,分别选取平均温度和人体舒适度两个指标,对电采暖负荷数据采用最小二乘法线性拟合获得预测模型。

3)进行负荷预测,并将实际负荷与预测负荷进行误差比较。平均绝对百分比误差(MAPE)是一种衡量预测误差的一个指标,其计算公式为^[20]

$$E_{\text{map}} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - P_i'|}{P_i} \quad (7)$$

式中: E_{map} 为平均绝对百分比误差; P_i 为第 i 个实际电采暖负荷值; P_i' 为第 i 个预测点的电采暖负荷值。

4 实际算例

所使用的每日电采暖负荷数据集来自某电力公司,气象数据集来自于天气网站 <http://www.meteomanz.com>,其包含以下气象因素:日最高温度、日最低温度、日平均温度、每日风向及平均风速、每日平均相对湿度等。

样本数据选取某地区2019年10月11日至2019年12月10日共计61日的电采暖负荷及天气数据。区分日期类型,分别采取平均温度和人体舒适度两个指标与电采暖负荷线性拟合建模。

4.1 基于平均温度分析

考虑日期类型,将电采暖负荷数据与平均温度线性拟合,分别得到两者之间的拟合关系,如图3、图4所示。式(8)、式(9)分别为基于平均温度的工作日电采暖负荷预测模型和基于平均温度的休息日

电采暖负荷预测模型。

$$P_1 = -173T_{av} + 14\ 472 \quad (8)$$

$$P_2 = -162T_{av} + 14\ 246 \quad (9)$$

式中： T_{av} 为平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； P_1 、 P_2 分别为基于平均温度的工作日和休息日的电采暖预测负荷，MVA。

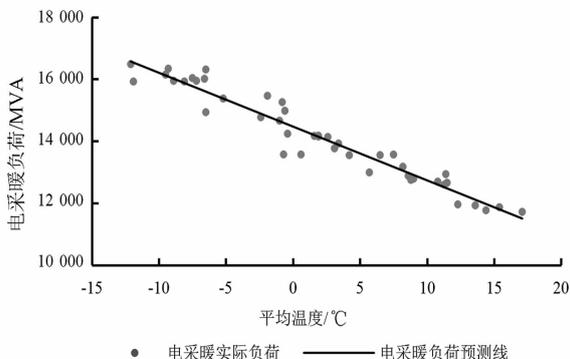


图 3 基于平均温度的工作日电采暖负荷预测

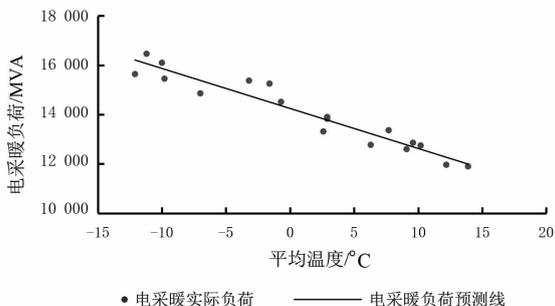


图 4 基于平均温度的休息日电采暖负荷预测

4.2 基于人体舒适度分析

考虑日期类型，将电采暖负荷数据与人体舒适度线性拟合，分别得到两者之间的拟合关系，如图 5、图 6 所示。式(10)、式(11)分别为基于人体舒适度的工作日电采暖负荷预测模型和基于人体舒适度的休息日电采暖负荷预测模型。

$$P_3 = -98S_D + 17\ 216 \quad (10)$$

$$P_4 = -90S_D + 16\ 754 \quad (11)$$

式中： S_D 为人体舒适度指数； P_3 、 P_4 分别为基于人体舒适度的工作日和休息日的电采暖预测负荷，MVA。

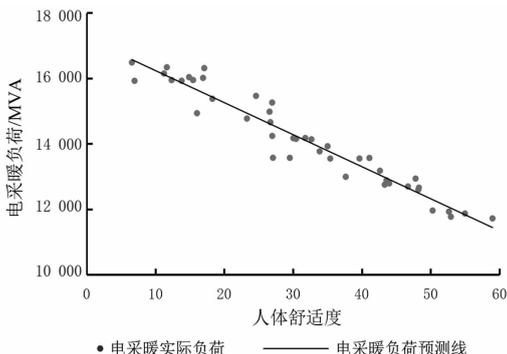


图 5 基于人体舒适度的工作日电采暖负荷预测

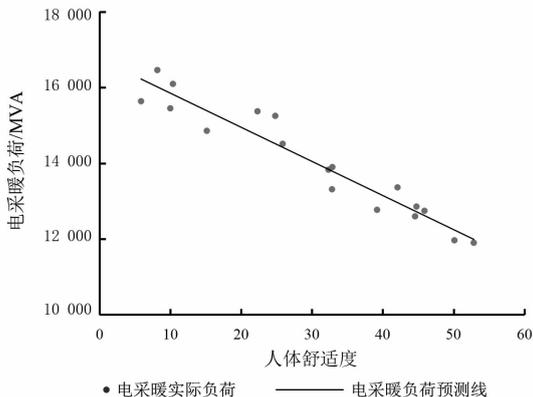


图 6 基于人体舒适度的休息日电采暖负荷预测

图 3 至图 6 描述了平均温度、人体舒适度与电采暖实际负荷的关系。随着平均气温、人体舒适度提高，电采暖负荷总体上呈下降趋势，下降趋势可近似看作一条直线。图 3 至图 6 中的直线是依据模型建立的电采暖负荷预测线，可用于负荷预测。

4.3 预测结果

表 1 为 2019 年 12 月 11 日至 2019 年 12 月 29 日负荷预测结果。表 2 为两种预测方法的 MAPE，两种预测模型的 MAPE 相近，且都小于 2%，达到了良好的预测效果。

表 1 电采暖负荷预测结果

日期	星期	实际负荷/ MVA	预测负荷 1/ MVA	预测负荷 2/ MVA
2019-12-11	星期三	15 504	15 262	15 269
2019-12-12	星期四	18 772	15 262	15 238
2019-12-13	星期五	15 822	15 626	15 525
2019-12-14	星期六	15 807	15 418	15 333
2019-12-15	星期日	15 503	15 056	14 978
2019-12-16	星期一	15 613	15 140	15 123
2019-12-17	星期二	15 839	15 505	15 491
2019-12-18	星期三	15 912	15 921	15 949
2019-12-19	星期四	15 741	16 025	16 021
2019-12-20	星期五	16 125	15 799	15 852
2019-12-21	星期六	15 927	15 397	15 412
2019-12-22	星期日	15 812	15 462	15 414
2019-12-23	星期一	15 698	15 886	15 880
2019-12-24	星期二	15 817	15 661	15 744
2019-12-25	星期三	15 939	15 921	15 939
2019-12-26	星期四	16 037	16 146	16 168
2019-12-27	星期五	16 036	16 146	16 132
2019-12-28	星期六	15 758	15 526	15 440
2019-12-29	星期日	15 769	15 575	15 454

注：预测负荷 1 为基于平均温度的电采暖负荷预测结果；预测负荷 2 为基于人体舒适度的电采暖负荷预测结果。

表2 负荷预测平均绝对百分比误差

预测方法	基于平均温度 预测/%	基于人体舒适度 预测/%
预测结果	1.38	1.59

5 结 语

前面对影响电采暖负荷变化的多个因子进行分析发现,日期类型因子 λ_d 、气象敏感因子 λ_w 会显著影响电采暖负荷变化,而随机负荷因子 λ_r 、稳定负荷因子 λ_s 对负荷变化影响较小。

因此,建立了考虑日期类型的基于平均温度的LS预测模型和考虑日期类型的基于人体舒适度的LS预测模型。由预测结果知,所提出的两种预测模型都能够准确反映实际负荷的变化趋势,精度较高,可应用于地区电采暖负荷预测。

参考文献

- [1] 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[J].核工业勘察院,2016(2):37-40.
- [2] 李香龙,张宝群,马龙飞,等.基于隐含数据挖掘的贝叶斯电采暖负荷预测[J].电测与仪表,2018,55(24):88-93.
- [3] 张宇泽,安瑞,全新宇,等.电采暖负荷接入对配电线路线损影响研究[J].电气技术与经济,2020(1):70-75.
- [4] 袁泽,宝海龙,周鹿鸣,等.规模化电采暖设备对配电网电能质量的影响分析[J].电测与仪表,2019,56(1):60-68.
- [5] 李伟,张帆,张磊,等.计及电采暖类型差异的“煤改电”工程谐波分析与评估[J].电网与清洁能源,2016,32(10):34-41.
- [6] 林扬宇,易弢,陈彬,等.考虑气象因素和日期类型的短期负荷预测[J].计算机仿真,2014,31(3):109-112.
- [7] 苏宜靖,谷炜,赵依,等.考虑气象因子的区域电网梅雨期负荷预测[J].浙江电力,2019,38(12):1-7.
- [8] 王宝,叶彬,石雪梅,等.基于用电结构变动的省级电网长期负荷特性预测[J].现代电力,2015,32(3):54-59.
- [9] 白珊,王硕,张丽娜,等.气象因素对供热系统采暖热负荷的影响分析[J].节能,2019,38(7):34-36.
- [10] 刘鹏飞,付波.基于遗传算法优化BP神经网络的短期热负荷预测方法研究[J].区域供热,2019(1):43-48.

- [11] 王惠中,刘轲,周佳.基于综合气象指数和日期类型的电力系统负荷预测[J].电网与清洁能源,2015,31(9):67-71.
- [12] 张伟.基于人体舒适度指数的配电网短期负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):74-79.
- [13] 秦海超,王玮,周晖,等.人体舒适度指数在短期电力负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):63-66.
- [14] 郑贤,唐伍斌,贝宇,等.桂林电网日负荷与气象因素的关系及其预测[J].气象,2008(10):96-101.
- [15] 林扬宇,易弢,陈彬,等.考虑气象因素和日期类型的短期负荷预测[J].计算机仿真,2014,31(3):109-112.
- [16] 王凌宜,王志敏,钱纹,等.融合日期类型的改进线性回归短期负荷预测模型[J].广东电力,2019,32(5):43-50.
- [17] 马立新,李渊.区间电力负荷特征提取及预测方法[J].控制工程,2015,22(4):645-648.
- [18] 苏适,周立栋,万筱钟,等.计及气象因素的用电负荷短期分时分类预测模型与方法[J].电力建设,2017,38(10):76-83.
- [19] 吴小伟.最小二乘法在地质测量中的应用[J].微处理机,2020,41(1):52-56.
- [20] 周巍,陈秋红,肖晶,等.人体舒适度指数对用电负荷的影响[J].电力需求侧管理,2004(3):54-56.

作者简介:

胡志豪(1995),男,硕士研究生,主要研究方向为清洁能源替代;

姚锦松(1994),男,硕士研究生,主要研究方向为泛在电力物联网及清洁能源替代;

龚立娇(1978),女,教授,博士生导师,主要从事能量采集、电能无线传输的研究;

孙开宁(1982),男,高级工程师,主要从事电力系统稳定控制、电力大数据研究工作;

樊茂(1985),男,高级工程师,主要从事电力运维、电力应急以及电力大数据分析工作;

张鹏飞(1998),男,硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输;

常喜强(1976),男,教授级高级工程师,主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期:2020-11-26)