

影响电力负荷避峰的关联因素分析

刘凌川, 段登伟, 邓 华
(成都电业局, 四川 成都 610016)

摘要:提高电力负荷避峰的效率既是需求侧管理的重要内容,也是改善电网运行的需要。分析了影响负荷避峰的多种因素,根据成都地区负荷避峰的实际情况,用灰色关联分析方法对各种关联因素进行了关联系数分析,确定了影响负荷避峰的因素序列,为负荷避峰管理提供了定量分析的依据。计算结果表明该方法能够较好分析出各种因素的作用大小。

关键词:电力负荷;避峰;需求侧管理;灰色理论

Abstract: Improving the efficiency of power peak load averting is an important part of demand side management as well as the necessary of power grid operation. The multiple factors which affect the load averting are analyzed. Based on the actual situation of load averting in Chengdu area, the grey relation analysis method is utilized to analyze the related factors. And the sequences of factors which influence load averting are determined also, which provide the supports for quantitative analysis on load management. Simulation results show that the proposed method is feasible for analyzing the effect of multiple factors.

Key words: power load; peak averting; demand side management; grey theory

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0069-05

近年来,中国电力负荷增长迅速,不少地区出现了电力供需的矛盾,特别是在迎峰度冬(夏)期间,高峰负荷往往受到发电能力和电网安全的限制,需要合理安排电力负荷避峰以充分利用电能,缓解电网压力。电力负荷避峰涉及到发、供电企业和用户各方的利益,既是电力调度部门关心的问题,也日益受到各方面的广泛关注。

负荷避峰是电力需求侧管理的重要内容,它与限电拉闸等负荷控制方法不同。拉闸限电往往是通过在很短的时间切除指定的电力负荷实现负荷控制;而负荷避峰则需要正确估计避峰量的大小,合理安排避峰时段,负荷下降需要一定的响应时间,不同性质的负荷响应时间也不相同。拉闸限电方法对生产生活的影 响较大,负荷避峰则主要通过调整生产时间来控制工业负荷,对人民生活用电影响很小。因此,在实际的负荷控制中,供电企业通常是采取“先避峰,后限电”的方法,以尽可能保证全社会有序用电。不仅如此,通过合理安排用电企业进行避峰用电也可以为企业节省一定的生产费用,市场条件下通过电价也可以实现负荷避峰^[1,2]。目前,湖北、江苏等地已开展了针对负荷高峰的需求侧管理工作并积累了一定的经验^[3,4]。文献[5]对发达国家的需求侧管理工作进

行了介绍,所提供的国外经验对中国开展需求侧管理工作有一定的参考价值。文献[6]指出中国开展电力需求侧管理有显著的效益,在分析传统负荷管理的基础上,介绍了开展需求侧管理(DSM)的主要措施,对基于 DSM 的负荷管理系统及其与电网调度、电力营销和信息管理的系统集成的相互关系进行论述。

实际上,影响负荷避峰的因素较多,比如提前通知时间、避峰时段、避峰量大小、温度和天气等等,这些影响因素相互关联且不易量化,因此如何评价各种因素对避峰效果的影响成为研究负荷避峰的难题之一。为了解决上述问题,这里引入灰色关联分析方法对成都电业局 2006~2007 年冬季的负荷避峰数据进行了分析,将电力负荷避峰的主要指标与避峰效果进行了关联分析,得到了相关因素对避峰能力影响情况的量化数据,并提出了进一步改进负荷避峰工作方法。

1 灰色关联分析方法

为了提高效率,减少不必要的工作量,使负荷避峰达到更理想的效果,就需要对各种因素进行分析。问题在于影响负荷避峰的各种因素相互交差、彼此关

联,在这些关联因素中,利用常规数学方法找出具有决定性作用的 1 种或多种因素比较困难。灰色关联分析法为解决这类关联问题提供了一种有效方法,利用这种方法可对影响结果的各种因素及其相对作用进行分析和比较,从而找出决定性的影响因素。灰色关联分析的主要步骤包括:

(1)分析与结果有关系的各种元素,用对结果有重要影响的各种元素的量化指标形成影响空间 $W(x_i', y_i')$ 。

(2)影响空间应具有可比性、可接近性和极性一致。为解决影响空间的可比性问题,可对 $W(x_i', y_i')$ 作数值变换,建立灰关联因子空间 $X(x_i)$ 。

(3)建立灰关联差异信息空间 Δ_G 。

$$\Delta_G = (\Delta, \zeta \Delta_{li}(\max), \Delta_{li}(\min))$$

式中, Δ 是差异信息集; ζ 是分辨系数 $\zeta \in [0, 1]$;

$\Delta_{li}(\max), \Delta_{li}(\min)$ 分别为 Δ 上的两级上环境参数和下环境参数。

其中,差异信息 Δ_0 的计算公式为:

$$\Delta_{0i} = |x_0(k) - x_i(k)|$$

环境参数为:

$$\Delta_{li}(\max) = \max_i \max_k \Delta_{li}(k)$$

$$\Delta_{li}(\min) = \min_i \min_k \Delta_{li}(k)$$

(4)计算灰关联系数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 及灰关联度 $\gamma(x_0, x_i)$ 。

灰关联系数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 的计算公式为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{li}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{li}(k)}{\Delta_{li}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{li}(k)}$$

灰关联度 $\gamma(x_0, x_i)$ 的计算公式为:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma(x_0(k), x_i(k))$$

(5)进行灰关联度排序。

若有 $\gamma(x_0, x_i) > \gamma(x_0, x_j) > \gamma(x_0, x_l) > \dots > \gamma(x_0, x_p)$, 则 $x_i > x_j > x_l > \dots > x_p$, 称为 x_i 强于 x_j, x_j 强于 x_l, \dots , 表示因子 x_j 对于参考列 x_0 的灰关联度小于 x_i 对于参考列 x_0 的灰关联度。

只要能够计算出影响负荷避峰的各种因素的灰关联度并对其进行关联度进行排序,就可以比较科学地分析出主要因素和次要因素,从而改进和提高负荷避峰工作。

2 成都地区负荷避峰方案

成都市作为省会城市实行负荷控制对社会经济的影响较大,为了合理安排负荷控制工作,相关部门根据不同时期制定了不同的负荷控制方案。如 2006~2007 年成都地区负荷控制实行“先错峰,后避峰,再限电”的方式,冬季枯水期采取四级负荷避峰预案。根据电网运行中负荷缺额的不同发布不同的避峰预警信息。为方便公众了解缺电信息、协调各部门的负荷管理工作,避峰方案采用黄、橙、红、黑四种颜色分别表示负荷缺额的紧迫程度。每种颜色分别代表不同的负荷避峰数量级,如表 1 所列,颜色越深相应的负荷避峰量越大。

表 1 2006 冬至 2007 春枯水期四川省电网避峰表

预警颜色	避峰用户数	最大避峰负荷 (kW)	占最大负荷比例 (%)	供需缺口 (MW)
黄色	718	228 088	15	1 000 以下
橙色	816	351 482	20	1 000~1 500
红色	1 512	532 925	25	1 500~2 000
黑色	1 713	717 275	30	2 000

表 2 2007 年 1、2 月份成都地区负荷避峰情况

日期	通知时间 (时、分)	避峰时段 (时、分)	避峰 (MW)	避峰方案	备注
1月 5日	12: 50	12: 50~24: 00	180		削计划
1月 6日	01: 40	2: 00~24: 00	180		削计划
1月 10日	21: 20	21: 20~24: 00	180		削计划
1月 11日	23: 38	0: 00~7: 00	180		削计划
	07: 50	7: 00~24: 00	180		削计划
1月 12日	08: 20				红色 避峰
1月 13日	07: 30	7: 30~17: 00	275		红色 削计划
1月 16日	01: 22	1: 45~24: 00	180		削计划
1月 18日	10: 10	10: 10~24: 00	170		削计划
1月 19日	00: 09	0: 15~23: 45	170		削计划
	08: 06				黑色
1月 23日	09: 26	9: 45~24: 00	150		削计划
	15: 22	15: 30~24: 00	100		削计划
	16: 00				黑色 超计划
1月 24日	11: 00				红色
1月 25日	09: 00				红色 避峰
2月 2日	08: 20	8: 45~24: 00	150		削计划
2月 11日	10: 36	10: 45~24: 00	165		削计划

2006 年冬季至 2007 年春季成都地区负荷避峰取得了一定的效果。尽量避免影响居民生活用电,更多采用避峰、错峰用电等方法进行负荷控制。2007 年 1 月到 2 月通过调度口径下达了一系列负荷避峰的通知(如表 2 所列),表中数据表明负荷避峰的安

排是根据电网运行情况,当日通知或提前一日通知进行避峰,通常负荷避峰指定了避峰量或避峰等级,但提前通知时间、避峰时段有明显的不同。如果能够正确分析评价各种相关因素对避峰的确切影响,将有利于提高负荷避峰的效率,改进和完善负荷避峰工作。

3 负荷避峰因素的关联分析

灰色关联分析方法已被成功用于多因素统计分析,对负荷避峰这类多因素问题同样可利用该方法进行分析。这里选取表 2、表 3 所列由调度口径统计的 14 天数据作为研究对象,其中表 3 列出了负荷避峰情况的原始数据。考虑到研究数据中天气数据不易精确量化,且当地冬季天气对避峰负荷的影响相对较小,故在后面的计算中不考虑天气因素的影响,而避峰负荷率则是由总避峰电能量和最大避峰负荷经过计算得到,不是一个独立的影响因素或结果,在计算

中也不再单独计及。以下的负荷避峰分析只选取了原始数据中的避峰小时数、提前通知时间、最低气温、最高气温、达到最大值的时间、计划避峰负荷、日最大负荷、日电能量、最大避峰负荷、总避峰电能量作为影响因素,分别设为 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$,将最大避峰负荷和总避峰电能量作为被影响的结果,分别设为 y_1, y_2 ,研究各影响因素 (x_1, x_2, \dots, x_8)对避峰结果 (y_1, y_2)的影响大小。从表 3 的数据中可以看出,负荷避峰通常是电网运行的实时情况提出的,有时提前通知避峰,有时则是从通知时刻起就要求避峰,没有进行提前通知。负荷避峰的持续时间也各不相同,持续避峰时间从 9~24 h 不等。由于各影响因素相互关联,负荷避峰的大小往往不是某个单独因素作用的结果,这里采用灰色关联分析方法,希望能从中找出产生作用最大的一种或多种因素,以便改进负荷避峰工作,提高工作效率。

表 3 负荷避峰情况的原始数据 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	达到最大值的时间 (h)	天气	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	避峰负荷率	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	11.17	0	6	阴间多云	3	7	180	3 292	6 414	19.3	183	388
1月 6日	22.00	0.333	10	阴有短时多云	3	8	180	3 303	6 137	-14.8	95	-309
1月 10日	2.67	0	1	多云间晴有霜	1	10	180	3 326	6 570	63.5	95	181
1月 11日	24.00	0.367	12	阴转零星小雨	3	6	180	3 315	6 464	22.8	262	1 433
1月 12日	15.67	0	11	阴转零星小雨	3	6	266	3 250	6 538	48	263	1 892
1月 13日	9.50	0	9	阴有间断性小雨	3	5	275	3 280	6 411	25.3	314	716
1月 16日	22.25	0.383	16	阴转零星小雨	3	6	180	3 335	6 368	37.1	445	3 634
1月 18日	13.82	0	13	阴转零星小雨	3	6	170	3 195	6 237	-9.2	83	-99.11
1月 19日	23.50	0.1	10	多云间阴	1	11	170	3 139	6 130	22.7	293	1 528
1月 23日	14.25	0.317	11	多云间阴	1	11	150	3 205	6 323	34.1	183	874
1月 24日	13.00	0	9	多云有雾	2	11	266	3 224	6 416	11.7	203	310
1月 25日	15.00	0	10	多云有雾	2	10	266	3 229	6 096	63.5	217	2 067
2月 2日	15.25	0.417	14	多云间阴有雾	5	14	150	2 851	5 702	42.7	391	2 505
2月 11日	13.25	0.15	12	多云间晴	5	18	165	2 488	4 948	61.9	792	6 371

表 4 选取的计算指标 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	达到最大值的时间 (h)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	1.00	0	3	7	6	180	3 292	6 414	183	388
1月 6日	1.97	0.333	3	8	10	180	3 303	6 137	95	-309
1月 10日	0.24	0	1	10	1	180	3 326	6 570	95	181
1月 11日	2.15	0.367	3	6	12	180	3 315	6 464	262	1 433
1月 12日	1.40	0	3	6	11	266	3 250	6 538	263	1 892
1月 13日	0.85	0	3	5	9	275	3 280	6 411	314	716
1月 16日	1.99	0.383	3	6	16	180	3 335	6 368	445	3 634
1月 18日	1.24	0	3	6	13	170	3 195	6 237	83	-99.11
1月 19日	2.10	0.1	1	11	10	170	3 139	6 130	293	1 528
1月 23日	1.28	0.317	1	11	11	150	3 205	6 323	183	874
1月 24日	1.16	0	2	11	9	266	3 224	6 416	203	310
1月 25日	1.34	0	2	10	10	266	3 229	6 096	217	2 067
2月 2日	1.37	0.417	5	14	14	150	2 851	5 702	391	2 505
2月 11日	1.19	0.15	5	18	12	165	2 488	4 948	792	6 371

表 5 影响因素与结果的关联系数

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	y_1	y_2	
x_1	0.00	0.641	0.667	0.63	0.608	0.654	0.648	0.672	0.579	0.624
x_2	0.64	0	0.596	0.628	0.7	0.687	0.595	0.57	0.647	0.609
x_3	0.67	0.596	0	0.484	0.644	0.597	0.659	0.654	0.598	0.587
x_4	0.63	0.628	0.484	0	0.673	0.596	0.551	0.57	0.572	0.539
x_5	0.61	0.7	0.644	0.673	0	0.597	0.656	0.664	0.625	0.554
x_6	0.65	0.687	0.597	0.596	0.597	0	0.564	0.571	0.56	0.585
x_7	0.65	0.595	0.659	0.551	0.656	0.564	0	0.725	0.662	0.63
x_8	0.67	0.57	0.654	0.57	0.664	0.571	0.725	0	0.661	0.626
y_1	0.58	0.647	0.598	0.572	0.625	0.56	0.662	0.661	0	0.62
y_2	0.62	0.609	0.587	0.539	0.554	0.585	0.63	0.626	0.62	0

从表 5 可以看出影响最大避峰负荷 y_1 的相关因素的关联系数从大到小的排序依次是： $\gamma(y_1, x_7) > \gamma(y_1, x_8) > \gamma(y_1, x_2) > \gamma(y_1, x_5) > \gamma(y_1, x_3) > \gamma(y_1, x_1) > \gamma(y_1, x_4) > \gamma(y_1, x_6)$ 。即对最大避峰负荷影响大小的排序为：日最大负荷，日电能量，提前通知时间，达到最大值的时间，最低气温，避峰小时数，最高气温，计划避峰负荷。同样可以得到影响总避峰电能量 y_2 的相关因素的关联系数排序依次是： $\gamma(y_2, x_7) > \gamma(y_2, x_8) > \gamma(y_2, x_1) > \gamma(y_2, x_2) > \gamma(y_2, x_3) > \gamma(y_2, x_6) > \gamma(y_2, x_5) > \gamma(y_2, x_4)$ ，各种因素从大到小排序为：日最大负荷，日电能量，避峰小时数，提前通知时间，最低气温，计划避峰负荷，达到最大值的时间，最高气温。

对上述结果进行分析表明：日最大负荷和日电能量依次为影响负荷避峰的两个最重要因素，因为两者反映了当天各类负荷的用电水平，在总用电负荷较高的条件下，其中的可避峰负荷也随之增加，避峰能力因此提高；日电能量中所包含的可避峰电能量也会随着总电能量的增加而增加。此外，避峰小时数是影响总避峰电能量的第三重要因素，因为避峰时间越长受影响的负荷越多。而影响最大避峰负荷的第三因素是提前通知时间，可见负荷避峰是需要一定的准备时间的。对总避峰电能量影响最小的是最高气温，而对最大避峰负荷影响最小的是计划避峰负荷，前者是因为冬季最低气温对用电的影响较最高气温的影响更大，后者是因为下达计划时未建立计划值与避峰负荷值之间的关联关系。

4 改进负荷避峰的建议

成都市作为省会城市在负荷避峰问题上有一定

困难，但通过以上的分析不难发现在提高负荷避峰能力方面还可以对负荷避峰工作进行一些针对性的改进措施。

(1) 在下达负荷避峰的计划前对当天负荷的避峰能力进行一个全面的分析，包括对当天用电能量的估计和用电负荷的预测，使下达的避峰负荷或避峰电能量与日电能量和日最大负荷之间建立更加紧密的关联关系，从而提高负荷避峰能力。

(2) 提前一定时间通知负荷避峰，便于用户安排生产，进行有规律的负荷控制，将有利于提高避峰负荷的数值。

(3) 如果需要提高总避峰电能量，则可以采取适当延长负荷避峰时间的方法。

(4) 冬季最低气温对负荷避峰的影响高于最高气温的影响，在分析负荷避峰能力时，应充分考虑最低气温的影响。

5 结 语

电网负荷避峰的时间、比例、负荷控制量的大小，都会造成相应的社会影响和经济影响，因此负荷避峰问题是涉及到电力企业社会责任和经济效益的重要问题，值得深入研究。前面根据成都地区电网负荷的特点，通过灰色关联分析方法，对影响负荷避峰的各种关联因素进行了分析。通过分析得到以下的结论：

- ① 计算得到的灰色关联系数比较合理地反映了各个因素对避峰结果的影响大小。
- ② 关联系数为评价负荷避峰手段提供了一种可以量化的方法。
- ③ 通过加强主要因素，改进负荷控制的各环节，可以提高负荷控制的效率。

参考文献

[1] 段登伟,刘俊勇,吴集光. 计及风险的配电公司最优分时零售电价模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, (3): 8-12.

[2] 段登伟,刘俊勇,刘继春,等. 基于激励原理的可中断负荷. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 143-148.

[3] 黄海峰,田华,吴巍. 2006 年湖北电网迎峰度夏电力需求侧管理 [J]. 湖北电力, 2005, 30(增1): 91-94.

[4] 田诺,仇新宇. 供需平衡时期电力供应应急预案编制的探索 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(1): 16-19.

[5] 中国赴欧洲电力需求侧管理培训团. 欧洲电力需求侧

管理对中国的启示(上)——来自中国赴欧洲电力需求侧管理的培训报告 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(2): 13-18.

[6] 王明俊. 市场环境下的负荷管理和需求侧管理 [J]. 电网技术, 2005, 29(5): 1-5.

作者简介:

刘凌川 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力运行管理工作;

段登伟 (1974—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电网调度管理工作, 研究方向为电力市场、需求侧管理;

邓 华 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护工作。

(收稿日期: 2008-10-29)

(上接第 41 页)

由文献 [9] 可知, 四川本地的低频振荡模式有 6 个, 将 2 个区域间模式列于表 2。

按 3.1 中方法, 在川云潭 31 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的托托电 G3 机组功角曲线上可以检测到频率为 0.21 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

表 2 四川电网区域间主导模式

序号	模式	频率 (Hz)	衰减阻尼比 (%)
1	$-0.0389 \pm j1.333$	0.21	2.9
2	$-0.0706 \pm j2.576$	0.41	2.7

同样, 在川二滩 04 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的鲁荷泽厂 5 号机组功角曲线上, 可以检测到频率为 0.41 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

4 结 论

介绍了 Prony 方法的理论基础和 Prony 算法主要特点及其适用范围, 通过试验信号证明了 Prony 方法适于分析振荡信号。最后通过仿真验证, 证明 Prony 算法完全可以分析低频振荡数据特征, 是一种有效的分析工具。

参考文献

[1] 吴敬儒,徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.

[2] 王海林,黎岚,吴安平,高万良,四川“十一五”电网规划及远景展望 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 5-7.

[3] 董航,刘涤尘,邹江峰. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97-100.

[4] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 43(11): 38-41.

[5] 芦晶晶,郭剑,田芳,吴中习. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.

[6] 刘剑,刘天琪. Prony 在电力系统稳定控制领域中的应用 [J]. 现代电力, 2005, 22(6): 27-31.

[7] 曹维,翁斌伟,陈陈. 电力系统暂态变量的 Prony 分析 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 56-60.

[8] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.

[9] 邓集祥,贺建明,姚天亮. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.

作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

李国庆 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

姚天亮 (1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2008-12-10)