

基于模糊推理算法的电力负荷预测系统的研究

针对时间因素、季节因素和随机因素对短期电力负荷的影响，以某一地区电力负荷历史数据为基础，利用模糊推理算法对短期电力负荷进行预测，实现电力负荷短期预测值的自适应调整，实时保证电力系统的供需平衡。对本地区进行短期电力负荷预测仿真试验，试验结果表明，使用模糊推理算法的短期电力负荷预测系统具有较高的准确度。

陈江艳^{1,2}/1.三峡大学科技学院 2.国网湖北省电力公司宜昌供电公司

电力系统短期负荷预测作为电力负荷管理系统中的重要部分，是实现电力生产系统高效生产调度和规划的依据^[1]。负荷预测结果的准确性直接影响电力系统运行的经济性和稳定性。

短期电力负荷特点和影响因素系数

由于电力系统中每个用电体在不同时段的用电方式、消耗的电能不同，因此电力系统负荷具有随机性。但这种变化受时间因素、天气因素和随机因素的影响又呈现出一定的规律性，使得电力系统负荷的短期预测成为可能^[2]。对于短期（24 h）负荷的预测值，其影响因素的影响系数直接决定负荷变化。

1. 时间因素系数

时间因素包括日类型和时间段，其中日类型包括工作日、休息日和节假日等，时间段包括早、中、晚，日类型和当日时间段决定时间因素影响系数。

2. 天气因素系数

天气因素包括在相同的日类型前提下的天气状况，天气状况直接影响天气因素影响系数。

3. 随机因素系数

随机因素是难以预测的、非经常出现的事件，其具有很强的突发性，与时间因素和天气因素不相关^[4]，但又是必须要考虑的一个重要因素。

模糊推理系统

模糊控制算法的过程：对系统采集到的准确偏差值和偏差率进行模糊化处理；再根据实际推理过程中积累的经验或相关专家建立的推理规则库进行模糊推理，得到一个模糊化的输出，并将其通过解模糊化转换为准确量，进而实现数据的模糊推理。模糊推理基本原理图如图1所示。

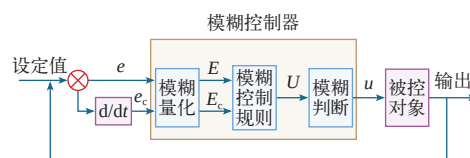


图1 模糊推理基本原理图

图1中， e 、 e_c 分别为系统偏差和偏差变化率，为准确量，是模糊控制器的输入； E 、 E_c 分别为经模糊化处理后偏差和偏差变化率的模糊量； U 为根据合理的推理规则或实际经验进行模糊决策得到模糊控制量； u 为模糊量的控制作用经模糊判决后得到的准确的控制作用来控制被控对象。

电力负荷模糊预测系统的设计

为了使短期电力负荷预测结果达到要求，本模糊预测系统采用二维输入、三维输出模式，把短期电力负荷预测



陈江艳/讲师

关键词/Keywords

短期负荷预测 ·
模糊推理 ·
模糊预测系统 ·
自适应 ·

值与实际需求负荷值之差 e 及其变化率 e_c 作为模糊预测系统的输入，负荷需求的3个影响因素系数 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 作为输出^[3]。电力负荷模糊预测系统不断检测并计算偏差 e 及其变化率 e_c 的值，然后根据专家整理好的模糊关系对 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 进行修改，以实现同时对3个影响因素系数的自适应调整，进而通过影响系数调节器对短期负荷进行预测。模糊预测系统结构图如图2所示。

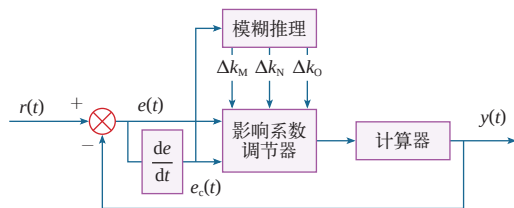


图2 模糊预测系统结构图

1. 输入输出语言变量的模糊化

设定短期电力负荷预测值与实际需求负荷值之差 e 及其变化率 e_c 模糊化为 E 、 E_c ，其中输入偏差 e 的基本论域为 $[-e, e]$ ， E 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ ，输入偏差变化率 e_c 基本论域为 $[-e_c, e_c]$ ， E_c 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ 。

输出 Δk_M 的基本论域 $[-m, m]$ ，量化论域 $\Delta k_M = [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ ，同理，输出 Δk_N 、 Δk_O 的模糊量化原理与 Δk_M 类似，不再详述。

2. 确定输入输出变量的模糊子集及其隶属度函数

输入变量 E/E_c 、输出变量 $\Delta k_M/\Delta k_N/\Delta k_O$ 的模糊子集分别为： $= [NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$ ，其中NB、NM、NS、ZO、PS、PM和PB分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。

通过隶属函数实现准确量的模糊化，本系统中输入、输出变量 E 、 E_c 、 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 的隶属函数均采用三角形隶属函数，如图3所示。

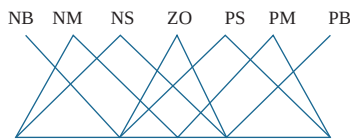


图3 三角形隶属度函数

根据三角形隶属函数的曲线特征，得到输入变量 e 、 e_c 和输出变量 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 的隶属函数，如表1、表2所示。

表1 e 、 e_c 隶属函数表

e/e_c	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
ZO	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

表2 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 隶属函数表

$\Delta k_M/\Delta k_N/\Delta k_O$	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB	0	0	0	0	0.2	0.6	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
ZO	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0.2	0	0	0	0

3. 制定模糊规则求其模糊关系 R 以及模糊控制表

总结专家和现场工程人员的技术知识和操作经验，获取3个调整参数模糊推理规则，得到针对 $\Delta k_M/\Delta k_N/\Delta k_O$ 自整定的模糊推理表，如表3所示。

应用Mamdani型推理规则既if...then...的模糊推理规则，根据模糊条件语言所描述的逻辑实现模糊推理。

由模糊控制表得到 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 对应的49个模糊关系，然后分别对49个模糊关系取“并”运算，即可得到由输入 e 、 e_c 到输出 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 的模糊关系 R ，即

$$R_M / R_N / R_O = \bigcup_{i=1}^{49} R_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, 49 \tag{1}$$

以 Δk_M 为例，根据模糊推理规则得出 Δk_M ，即

$$\Delta k_M = (EE_c)R_M \tag{2}$$

由Mamdani型模糊推理所采用if...then...的模糊规则可得

$$\begin{aligned} R_1 &= (NB_E PB_{\Delta k_M})(NB_{E_c} PB_{\Delta k_M}) \\ &= (NB_E^T PB_{\Delta k_M})(NB_{E_c}^T PB_{\Delta k_M}) \end{aligned}$$

表3 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 模糊推理表

E_c	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NB	PS/Z/NM	Z/Z/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NS/NM	PM/NS/NM	Z/Z/NS	Z/Z/Z
NS	PM/NB/Z	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PM/NS/NM	Z/Z/NS	PS/PS/NS	NS/PS/Z
Z	PM/NM/Z	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/Z
PS	PS/NM/Z	PS/NS/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NM/PS/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z
PM	PS/Z/PB	Z/Z/PS	NS/PS/PS	NM/NM/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/P/PB
PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

$$= (NB_E^T PB_{\Delta k_M})(NB_{E_c}^T PB_{\Delta k_M})^T \quad (3)$$

根据检测系统得到的实际误差量 e 和其误差变化 e_c ，得出控制量 Δk_{M_i} 为

$$\Delta k_{M_i} = e(NB_E PB_{\Delta k_M})e_c(NB_{E_c} PB_{\Delta k_M}) \quad (4)$$

同理，求出控制量 Δk_{M_2} 、 Δk_{M_3} 、 $\dots$ 、 $\Delta k_{M_{49}}$ ，则控制量为模糊集合 Δk_M ，即

$$\Delta k_M = \Delta k_{M_1} + \Delta k_{M_2} + \dots + \Delta k_{M_{49}} \quad (5)$$

采用平均最大隶属度法判决，将控制量由模糊量变成准确量。得到 Δk_M 的模糊推理查询表，如表4所示。依此类推得到 Δk_N 、 Δk_O 的模糊控制查询表。

表4 Δk_M 模糊推理查询表

E_c	Δk_M	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	0	0	
-2	3	3	2	1	1	0	-1	
-1	2	2	2	1	0	-1	-1	
0	2	2	1	0	-1	-2	-2	
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2	
2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	
3	0	0	-2	-2	-2	-3	-3	

4. 模糊参数计算

电力负荷预测系统在运行过程中不断地计算短期电力负荷预测值与实际需求负荷值偏差 e 和偏差变化率 e_c ，并对其模糊化，然后通过模糊控制查询表得到 Δk_M 、 Δk_N 和 Δk_O 的值，根据式(5)得出最佳的影响系数值，完成对影响系数的调整。

$$\begin{aligned} k_M &= k'_M + \{E, E_c\} \Delta k_M \\ k_N &= k'_N + \{E, E_c\} \Delta k_N \\ k_O &= k'_O + \{E, E_c\} \Delta k_O \end{aligned} \quad (6)$$

模糊负荷预测系统仿真和分析

为了验证电力负荷模糊预测系统的效果，采用宜昌市某地区电力负荷系统中2014年8月1日~9月30日间每天24个整点负荷数据和对应的24点气象信息作为传统算法和模糊推理算法的数据样本，分别使用传统算法和模糊推理算法对2014年10月1日、10月9日24个整点电力负荷进行预测。结果如表5、表6所示。

表5 2014年10月1日整点负荷预测结果

时刻	实际值 /MW	传统算法 预测值/MW 误差 (%)	本文算法 预测值/MW 误差 (%)
0 : 00	752.972	763.379 -1.38	738.258 1.86
1 : 00	678.634	654.526 3.67	699.265 1.33
2 : 00	661.848	629.347 4.84	652.846 1.36
3 : 00	637.868	605.536 5.02	642.568 -0.78
4 : 00	640.266	615.734 3.91	635.377 0.78
5 : 00	700.216	731.266 -4.43	692.233 1.14
6 : 00	705.012	725.032 -2.84	710.523 -0.71
7 : 00	791.34	765.017 3.29	802.677 -1.39
8 : 00	750.574	720.165 4.02	735.688 2.23
9 : 00	769.758	738.266 4.03	752.654 2.21
10 : 00	858.484	825.368 3.85	850.356 0.93
11 : 00	841.698	796.145 5.35	836.599 0.59
12 : 00	733.788	765.317 -4.37	720.355 1.77
13 : 00	693.022	668.044 3.61	688.877 0.72
14 : 00	681.032	645.388 5.29	675.299 0.88
15 : 00	688.226	647.537 5.96	688.599 3.34
16 : 00	893.358	842.087 5.71	856.14 4.14
17 : 00	685.828	708.367 -3.36	678.211 1.02
18 : 00	1 237.899	1 167.244 5.66	1 230.908 0.57
19 : 00	1 222.98	1 175.368 3.85	1 212.768 0.82
20 : 00	1 396.99	1 332.55 4.58	1 387.188 0.65

(续)

时刻	实际值	传统算法		本文算法	
	/MW	预测值/MW	误差 (%)	预测值/MW	误差 (%)
22 : 00	1 336.288	1 285.237	3.82	1 293.155	3.22
23 : 00	1 268.566	1 201.236	5.28	1 245.788	1.82

表6 2014年10月9日整点负荷预测结果

时刻	实际值	传统算法		本文算法	
	/MW	预测值/MW	误差 (%)	预测值/MW	误差 (%)
0 : 00	812.582	790.366	2.27	803.544	1.11
1 : 00	738.354	75.211	4.47	752.089	- 1.89
2 : 00	611.253	654.12	2.24	680.145	- 2.87
3 : 00	687.788	712.359	- 3.65	670.233	2.39
4 : 00	710.599	684.478	3.66	689.255	1.69
5 : 00	780.213	743.677	4.74	775.234	0.64
6 : 00	785.35	819.56	- 4.33	776.366	1.15
7 : 00	791.76	820.644	- 3.68	783.176	0.99
8 : 00	820.55	855.211	- 4.77	809.044	1.34
9 : 00	859.749	835.076	2.79	850.123	1.05
10 : 00	908.479	875.097	3.63	900.099	0.88
11 : 00	1 021.219	970.87	4.99	1 005.211	1.57
12 : 00	833.569	800.215	3.96	855.155	- 2.64
13 : 00	773.142	725.211	6.21	751.144	2.85
14 : 00	788.68	750.055	4.82	780.033	1.02
15 : 00	701.12	660.922	5.85	692.233	1.28
16 : 00	893.358	842.087	5.71	856.14	4.14
17 : 00	695.299	727.012	- 4.61	687.266	1.15
18 : 00	1 237.899	1 167.244	5.66	1 230.908	0.57
19 : 00	1 432.455	1 375.022	3.98	1 423	0.63
20 : 00	1 396.99	1 332.55	4.58	1 387.188	0.65
21 : 00	1 584.577	1 509.089	4.73	1 560.244	1.52
22 : 00	1 336.288	1 285.237	3.82	1 293.155	3.22
23 : 00	1 268.566	1 201.236	5.28	1 245.788	1.82

通过表5、表6 的预测比较和误差分析，工作日负荷预测结果较节假日好，这主要是因为节假日的负荷有更大的随机性，而且缺少足够的资料反映节假日的各种特殊活动。本文预测模型无论对工作日还是节假日进行预测，所获得的结果都明显优于传统算法预测模型，且预测时间短，准确度较高。

图4、图5分别为2014年10月1日和2014年10月9日的整点负荷预测结果误差对比图。其中红色曲线表示使用模糊推理算法的预测误差，蓝色曲线表示使用传统算法的预测误差。根据该曲线图可以表明，电力负荷模糊预测系统预测的负荷数值接

近实际需求数值，使用该方法的电力负荷预测系统是可行的，该算法大大提高了负荷预测的准确度和稳定性，这对短期负荷预测来说是至关重要的。

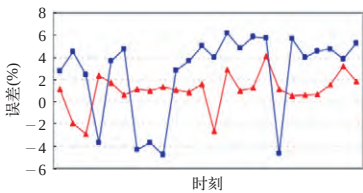


图4 2014年10月1日整点负荷预测结果误差曲线

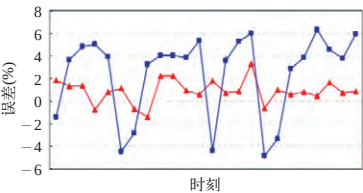


图5 2014年10月9日整点负荷预测结果误差曲线

结束语

基于模糊推理的电力负荷预测系统，在短期电力负荷预测中及时跟踪负荷模式的变化，客观地描述负荷预测影响因素系数变化，快速给出预测负荷数值。实际数据测试结果验证了模糊预测技术应用于短期负荷预测的可行性。通过对模糊预测技术应用于短期负荷预测方法的有力尝试，充实了负荷预测的理论和实践，该技术有待于进一步的深入研究，朝着实用化方向发展。

参考文献

[1] 王学申，刘刚．电力系统负荷预测方法分析及应用[J]．中国科技信息，2011 (11) : 23-25.

[2] 周虎，江岳春，陈旭．模糊聚类分析和代数算法结合的短期负荷预测[J]．电力系统及其自动化学报，2011，23 (3) : 101-105.

[3] 王欣，王巍．基于神经元网络和模糊专家系统的电力短期负荷预测[J]．沈阳工程学院学报：自然科学版，2010，6 (4) : 318-320.

[4] Falvo Maria Carmen, Martirano Luigi, Sbordone Danilo. Sustainable energy microsystems for a smart grid [C]. Berlin Heidelberg Springer: Neural Nets and Surroundings, SIST19 2013; 259-269.

(收稿日期：2015-01-10) EA