基于最大熵的电网停电事故损失负荷预测

曹　娜[1],曹爽爽[1],于　群[1],贺　庆[2]
(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266590;2. 中国电力科学研究院,北京 100085)

摘　要:损失负荷作为评估停电事故危险等级的主要指标之一,其预测问题对停电事故预防工作有重要的实际意义。基于熵理论,分析了停电事故的最大熵特征,提出了损失负荷的最大熵预测模型。以 GS 电网为例,综合考虑损失负荷的历史数据与仿真数据,利用最大熵预测模型对电网停电事故进行预测,给出不同预测年限下的损失负荷预测结果。通过与其他方法的预测结果及事故实际数据的比较分析,验证了所提预测模型的有效性。

关键词:损失负荷;最大熵;预测模型;历史数据;仿真数据

中图分类号:TM732　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-3767(2017)05-0065-07

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.010

Lost Load Forecasting of Power Grid Blackouts Based on Maximum Entropy

CAO Na[1], CAO Shuangshuang[1], YU Qun[1], HE Qing[2]
(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. China Electric Power Science Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Since lost load is one of the main indexes to evaluate the risk grade of power grid blackouts, its forecasting has important practical significance for the prevention of blackouts. Based on the entropy theory, this paper analyzed the maximum entropy characteristics of blackouts and put forward the maximum entropy prediction model. With the example of GS power grid, this model was used to forecast power blackouts by taking both the historical data and simulation data of lost load into consideration, and forecasting results of lost load under different forecast periods were given. The validity of the proposed model was verified by comparing the results predicted by this model and by other methods and the actual data of blackouts.

Key words: lost load; maximum entropy; prediction model; historical data; simulation data

随着经济和科技的发展,电力负荷的需求大量增加。而近年来,大规模停电事故时有发生,负荷损失量巨大,不仅会造成机组停运,系统瘫痪等严重的经济影响,也会导致交通瘫痪、通信中断等多方面的社会影

收稿日期:2016-05-19
基金项目:国家电网公司 2014 年科技项目
作者简介:曹　娜(1971—),女,山东泰安人,副教授,博士,主要从事电力系统运行与控制等方面研究.
E-mail:caona_2006@163.com
曹爽爽(1990—),女,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化等,本文通信作者.
E-mail:15054200309@163.com
于　群(1970—),男,山东淄博人,教授,博士,主要从事电力系统安全分析、电力系统继电保护方面的研究.
E-mail:yuqun_70@163.com
贺　庆(1977—),男,湖北荆门人,高级工程师,博士,主要从事电力系统分析方面的研究.

响[1-2]。损失负荷对衡量停电事故的风险具有重要的意义，有效地预测停电事故的损失负荷，对电力系统部门做好用电安排、事故机组备用等工作有重要的指导意义，因此电力研究学者采用不同方法对停电事故损失负荷进行了研究。

文献[3]以采用截断处理后的停电事故调查数据为基础，通过建立改进的 Tobit 模型，得到停电损失的估算函数，计算出区域电网内的某次停电事故给各类用户造成的损失。文献[4]提出了一种考虑故障特性的电网风险评估方法，建立基于云模型的输电故障概率预测模型，对电网输电线路的故障概率进行预测，进而通过效用理论计算广义负荷损失风险指标。文献[5]考虑电力用户重要程度的不同，引入供电优先级因子，由永久性故障的两类负荷损失定义计算出电网停电事故失负荷风险指标，对配电网的安全可靠性进行了评估。文献[6]基于停电事故的自组织临界性提出了极值方法，采用损失负荷的历史数据对未来停电事故中可能造成的最大损失负荷数据做出预测。极值方法从停电事故的宏观特性出发，避免了模型停运率、失效率等元件性问题，对于规模庞大、结构复杂的实际电网更有实际应用性。但极值方法也存在一些不足之处：一方面，采用极值方法预测时必须明确未来停电事故发生的概率，不同概率下损失负荷的数据相差较大，而判定停电事故发生的概率是极其困难的；另一方面，虽然多年来的历史数据在某种程度上可作为未来事故的参考，但由于电网的不断发展，历史数据可能与未来停电事故数据相差较大，预测时若只采用历史数据可能会使预测结果不准确。

参考极值方法预测问题的宏观角度，本文从停电事故的宏观特性出发，基于熵理论分析了事故发生时电力系统的最大熵特征，提出了损失负荷的最大熵预测模型。以 GS 电网为例，综合利用历史数据和仿真数据，建立未来停电事故损失负荷的最大熵预测模型，所提模型既考虑了历史数据对未来停电事故预测的重要性，又涵盖了电网发展对未来停电事故造成的影响，同时也避免了极值方法难以确定事故发生概率的问题。

1 损失负荷预测模型

熵是由克劳修斯首先提出，用于表示热力学过程中热量转化为功的程度；之后，玻尔兹曼用熵度量系统的混乱程度[7]。而对于一个广义的复杂系统来说，熵可作为状态分布混乱性和无序性的量度[8]，系统的有序程度越低，则其熵越大；反之，系统的有序程度越高，其熵就越小[9]。

电网作为一个复杂系统，由安全稳定运行到事故发生的过程可用熵来描述：电网在正常运行时，状态稳定有序，其熵处于较小水平；当电网发生故障扰动时，稳定状态被打破，电网朝着混乱无序状态发展，其熵增大。当切除故障线路或对电网采取相应的保护措施后，相当于对电网系统增加负熵（有序程度），电网系统的熵减小，又重新回归稳定状态；但微小的故障扰动也可能会引起连锁反应，导致故障蔓延，从而使系统的混乱程度增大，熵增大，直到引起大面积停电事故的发生，熵达到最大值。因此，停电事故与电网的最大熵有一致性的行为，可用最大熵描述停电事故的发生。而停电事故本身是一个抽象的事件，损失负荷是停电事故严重程度的直接表征量，所以可认为损失负荷数据的产生与电网的最大熵值同时出现，因此本文通过电网的最大熵探寻停电事故损失负荷的规律。

设停电事故的损失负荷为 x 时，发生概率为 $p(x)$，则根据以上的分析和熵的定义[10]，停电事故发生时其熵有最大值，如式(1)所示。

$$\mathrm{MAX}(H) = -K\sum_{i=1}^{n} p(x)\log(p(x)) , \tag{1}$$

其中 K 为常数。

设 x_M 为电网总负荷，x_0 为损失负荷最小值，则停电事故概率有以下条件：

$$\int_{x_0}^{x_M} p(x)\mathrm{d}x = 1 , \tag{2}$$

并且实际事故发生时，损失负荷较小的停电事故发生次数多，概率大，损失负荷 x 较大的停电事故发生次数少，概率小。根据以上条件，采用拉格朗日未定乘子法[10]经相关计算得到在熵最大时，停电事故损失负荷 x 的预测模型：

$$P=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\int_{x_0}^{x_M}(x-x_0)^{\alpha-1}\exp(\beta(x-x_0))\mathrm{d}x\ , \tag{3}$$

其中 P 为电网停电事故发生的概率；$T=\frac{1}{P}$，T 为事故发生的预测年限，预测年限指未来某一程度的事故出现的平均时间。α 为形状参数，β 为尺度参数，$x_0\leqslant x<x_m$；$\alpha,\beta>0$，分别由下式计算得到：

$$\alpha=4/C_s^2\ ,\ \beta=2/(\bar{x}C_vC_s)\ ,\ x_0=\bar{x}(1-2C_v/C_s) \tag{4}$$

其中 $\bar{x}$ 为损失负荷 x 的数学期望，C_v 为偏差系数，C_s 为偏态系数，由式(5)可以计算得到。

$$C_v=\frac{1}{\bar{x}}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\ ,\ C_s=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3/(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2)^{\frac{3}{2}}\ 。 \tag{5}$$

2　电网算例

本文以 GS 电网为例，说明最大熵预测模型在损失负荷预测中的应用。以 2012 年 GS 电网数据为基础，对电网进行线路合并、等值等简化。简化后的电网有 80 条线路，其中 330 kV 线路 72 条，800 kV 线路 8 条，67 个等值节点，13 台等值发电机组，装机容量 7 579 MW。

2.1　历史数据模型

对 GS 电网的损失负荷历史数据进行统计[1,11-14]，建立停电事故的时间序列，如图 1 所示。以年为单位对停电事故的时间序列进行时间划分，选取每个时间单位内停电事故的最大损失负荷作为样本数据建立最大熵预测模型，其数据如表 1 所示。

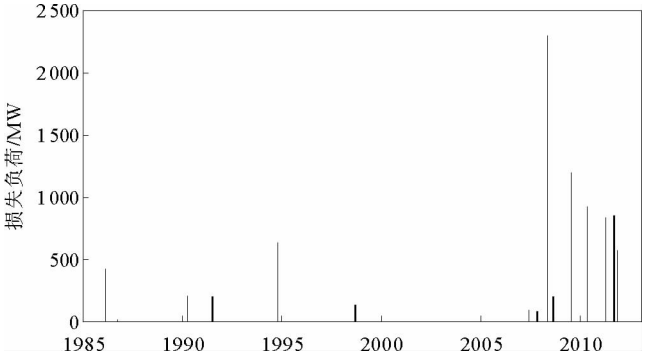

图 1　GS 电网停电事故时间序列

Fig. 1　Time series of blackouts in GS power grid

传统上，采用历史数据做样本对事物的未来状况进行预测时都是同等地对待每个时期的数据，认为各时期的历史数据有相同的重要性[15]。但远期的电网与未来电网相差较大，其历史数据对未来事故预测的有用信息较少，参考性越小；近期的电网与未来电网接近，其历史数据有用信息较多，参考性也较大。因此，根据历史数据的新旧程度，本文引入新鲜度函数对其赋予不同的时间权重，以便说明不同时期历史数据的重要性。

根据相关文献[16]中的研究与介绍，本文选取的新鲜度函数：

$$\rho(t)=\frac{2}{\pi}\arctan t\quad(t=1,\ 2,\ 3\cdots n), \tag{6}$$

对选取的历史数据样本依据式(6)计算时间权重并计算权后数据 x_i，其数据如表 1 所示。

表 1　GS 网停电事故损失负荷历史数据最大值及相关数据

Tab. 1　Maximum lost load data of blackouts in GS power grid and related data

时间单位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大值/ MW	920	1 200	840	2 300	94	130	640	200	210	420
时间权重	0.936 5	0.929 6	0.920 8	0.909 7	0.894 9	0.874 3	0.844 0	0.795 2	0.704 8	0.500 0
权后数据/ MW	861.6	1 115.5	773.5	2 092.3	83.9	113.7	540.2	159.0	148.0	210.3

将权后数据 x_i 降序排列，即：$x_1\geqslant x_2\geqslant$，…，$\geqslant x_n$，其数学期望的经验频率为 $i/(n+1)$，由频率代替概率的观点[17]，得到损失负荷的各项概率为：

$$p_i = \frac{i}{n+1}, \tag{7}$$

由权后数据 x_i 与其对应的概率 p_i 得到停电事故损失负荷的散点图，如图 4 中所示。

采用权后数据 x_i 及式(4)、(5)计算得到预测模型的方程参数：$\alpha=1.000\,0$，$\beta=0.001\,7$，$a_0=5.850\,0$，因此损失负荷 x 的预测模型为：

$$P_x = \frac{0.001\,7}{\Gamma(1)}\int_{5.850\,0}^{7\,579}\exp(-0.001\,7(x-5.850\,0))\,\mathrm{d}x\ 。 \tag{8}$$

其所表示的损失负荷概率曲线如图 4 所示。

2.2 仿真数据模型

电网停电事故的仿真数据是基于电网当前状态下得到的，与未来停电事故最为接近，可作为预测的重要参考。根据文献[1]的介绍，采用 GS 电网数据建立 SOC-Power Failure model Ⅰ 模型进行多次停电事故仿真，仿真流程如图 2 所示。

在事故仿真中，采用直流潮流方法计算线路初始潮流 P_i，设负载率 μ_i 为 0.55～0.9 的随机数，由 $P_{i,\max}=P_i/u_i$ 计算线路的极限传输容量 $P_{i,\max}$，并对初始潮流较小的线路按照 $P_{i,\max}=1.4P_i/u_i$ 适当增大其线路极限容量，线路停运概率模型采用简化的过负荷保护动作折线模型[18]。在统计停电事故历史资料时发现，实际电网中每年所发生的大小事故约 3～5 次，所以本文以平均 4 次停电事故为一个时间单位(采样点)。本文计划选取 30 个时间单位的损失负荷数据作为样本数据，根据图 2 的仿真流程，采用 MATLAB 进行 $C_i=120$ 次停电事故仿真，得到停电事故的时间序列如图 3 所示。

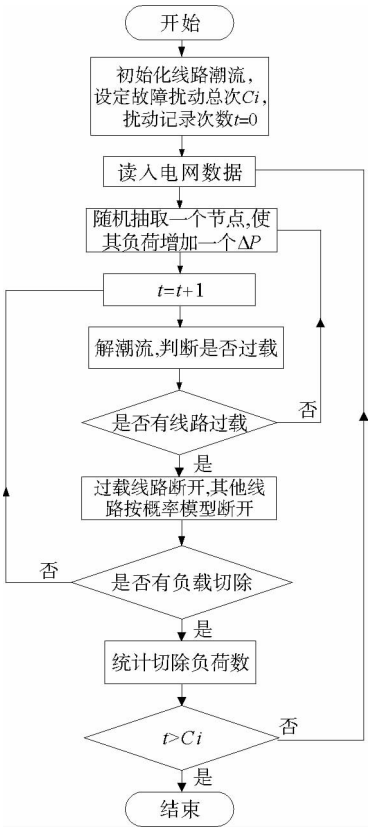

图 2 停电事故 SOC-Power Failure model Ⅰ 模型仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of SOC-Power Failure model Ⅰ simulation

选取每个时间单位内停电事故的最大损失负荷作为仿真数据的样本数据 y_i，如表 2 所示。

根据选取的仿真数据样本 y_i 采用 2.1 节中历史数据预测模型的方法计算得到仿真数据模型为：

$$P_y = \frac{0.003\,4^{4.93}}{\Gamma(4.93)}\int_0^{7\,579}(y-35)^{3.93}\exp(-0.0034(y-35))\mathrm{d}y。 \tag{9}$$

其所表示的损失负荷概率曲线如图 4 所示。

2.3 组合模型

停电事故的历史数据是对停电事故的真实反映，对未来事故预测有着重要的参考性，但由于电网是不断发展变化的，所以仅依靠历史数据对未来停电事故进行预测是不准确的；停电事故的仿真数据与未来停电事故的实际情况较为贴近，但仿真中只涉及了负荷扰动故障，缺少对事故其他影响因数的考虑，因此单纯依靠仿真数据对事故进行预测缺乏实际性。本文采用预测有效度理论对得到的历史数据模型和仿真数据模型进行组合，以组合模型作为最终的损

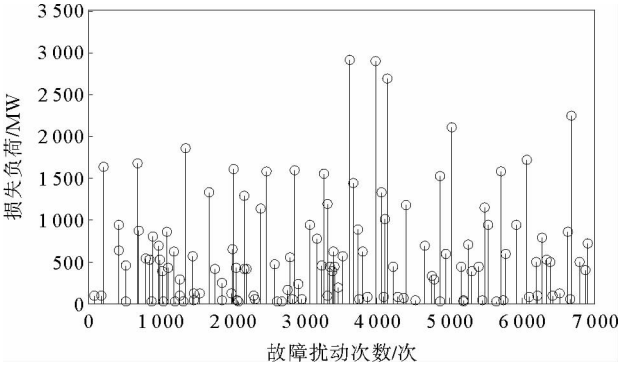

图 3 GS 电网停电事故仿真时间序列图

Fig. 3 Time series of blackouts simulation in GS power grid

失负荷预测模型。

预测有效度理论是采用预测精度的均值及反映其离散程度的均方差反应预测模型的有效度[19]，适用于对多种单一模型的组合。根据文献[19]中的预测有效度的计算方法计算得到历史数据模型的有效度为0.338，仿真数据模型的有效度为0.662，所得到的损失负荷预测模型为：

$$P = 0.338P_x + 0.662P_y。\tag{10}$$

其所表示的损失负荷概率曲线如图4中所示。

表2　GS电网停电事故损失负荷仿真数据最大值

Tab. 2　Maximum lost load data of blackouts simulation in GS power grid

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大值/MW	1 638	936	1 608	621	1 543	1 517	618	2 457	691	2 896
采样点	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
最大值/MW	855	1 147	1 537	1 770	1 173	691	854	1 856	1 330	1 342
采样点	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
最大值/MW	1 279	1 573	1 589	1 186	1 964	2 690	1 179	2 109	1 719	2 246

当选定事故发生的概率 P 后，由式(10)可反向计算，得到概率为 P 时停电事故可能造成的最大损失负荷，即预测年限为 $T=\frac{1}{P}$ 时的最大损失负荷值，数据结果如表3中所示。

3　预测结果的比较与分析

文献[6,20]根据停电事故的自组织临界性提出了极值方法和广义极值方法，在规定的年限 T 内和给定的概率 P 下同样对停电事故损失负荷做了定量预测。为了便于比较和分析，将各方法的预测结果列入表3。

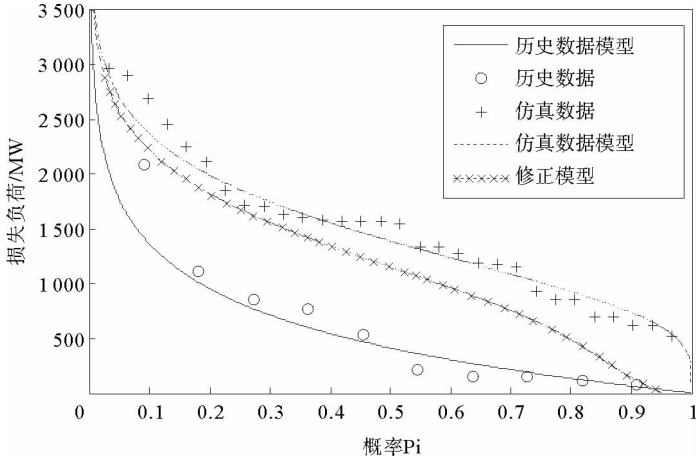

图4　GS电网停电事故损失负荷概率曲线图

Fig. 4　Lost load probability graph of blackouts in GS power grid

表3　GS电网停电事故损失负荷预测数据

Tab. 3　Predicted lost load data of blackouts in GS power grid

预测年限 T/年	最大熵预测值/MW	极值预测值/MW		广义极值预测值/MW	
		P=0.7	P=0.8	P=0.7	P=0.8
2	1 153	1 301	1 188	1 216	1 099
3	1 484	1 630	1 518	1 428	1 337
4	1 680	1 787	1 723	1 636	1 523
5	1 821	1 926	1 854	1 931	1 777
10	2 214	2 287	2 109	2 289	2 117

由表 3 的结果可以看出，根据最大熵预测模型计算的 GS 电网在预测年限 $T=2$、$T=5$ 时损失负荷数据分别为 1 153 和 1 821 MW，表示 GS 电网在未来两年内停电事故可能造成的最大损失负荷为 1 153 MW，未来五年内停电事故可能造成的最大损失负荷为 1 821 MW，并且预测年限 T 越大，其对应的停电事故损失负荷预测数据也会越大。

此外，根据最大熵预测模型得到的损失负荷数据在 $T=2\sim5$ 年的预测结果分别为 1 153、1 484、1 680、1 821 MW，与采用极值方法在概率为 0.8 时的预测结果 1 188、1 518、1 723、1 854 MW 基本相同；预测年限 $T=10$ 的预测结果 2 214 MW 与极值方法下概率为 0.7 时的预测结果 2 109 MW 也基本相近。从表 3 中的数据也可以看出，在不同概率下将本文的预测结果与广义极值方法的预测结果进行比较，两种方法的预测结果基本相符。

预测模型的准确性和可信性都需要通过实际事故数据进行验证。为了更加客观、具体地说明本文预测结果的准确性，对 GS 电网 2013—2014 年内发生的停电事故数据[21-22]进行统计，得到统计数据如表 4 所示。

由表 4 中的事故统计数据可知，在 2013—2014 两年内，GS 电网最严重的停电事故是 2013 年发生的 3·16 事故，其造成的损失负荷为 1 200 MW，与采用最大熵预测模型计算的预测年限 $T=2$ 时的损失负荷数据 1 153 MW 基本相符。

通过以上的分析和比较可知，基于熵理论和损失负荷的特征所推导的最大熵预测模型可以用于分析和预测电网未来不同年限下的停电事故损失负荷数据，其预测结果不仅与极值方法、广义极值方法的预测结果一致，与事故实际数据也基本相同，验证了本文所提模型的正确性。

表 4　2013—2014 年 GS 电网事故损失负荷数据

Tab. 4　Lost load data of blackouts in GS power grid from 2013 to 2014

年份	事故	损失负荷/MW
2013	GS 电网 3·16 事故	1 200
2014	GS 电网 6·18 事故	92
2014	GS 电网 8·15 事故	680
2014	GS 电网 10·19 事故	178

4　结论

本研究将熵理论应用到停电事故的风险评估中，提出了最大熵预测模型，该模型从宏观的角度出发，避免了以往元件级分析方法的复杂性，综合考虑了历史数据和仿真数据的影响，更适用于现代大规模实际电网。该预测模型可用于对电网停电事故的进行定量评估，为电网事故的风险等级划分以及电网事故预警提供一定的依据。

参考文献：

[1]郭剑波，于群，贺庆. 电力系统复杂性理论初探[M]. 北京：科学出版社，2012：1-2.

[2]梁志峰，葛睿，董昱. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术，2013，37(7)：1841-1848.
LIANG Zhifeng，GE Rui，DONG Yu. Analysis of large-scale blackout occurred on July 30 and July 31，2012 in India and its lessons to China's power grid dispatch and operation[J]. Power System Technology，2013，37(7)：1841-1848.

[3]毛安家，熊超中，张粒子，等. 基于改进 Tobit 模型的负荷停电损失估算方法[J]. 电力系统自动化，2010，34(9)：29-33.
MAO Anjia，XIONG Chaozhong，ZHANG Lizi，et al. A customers outage cost assessment approach based on the improved Tobit model[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(9)：29-33.

[4]巫伟南，杨军，胡文平，等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备，2014，34(6)：129-134.
WU Weinan，YANG Jun，HU Wenping，et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment，2014，34(6)：129-134.

[5]刘若溪，张建华，吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(15)：89-95.
LIU Ruoxi，ZHANG Jianhua，WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control，2011，39(15)：89-95.

[6]于群,郭剑波.电网停电事故的自组织临界性及其极值分析[J].电力系统自动化,2007,31(3):1-3.
YU Qun,GUO Jianbo. Self- organized criticality and extreme statistics analysis of electric power system blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(3):1-3.
[7]鲍际刚,夏树涛,刘鑫吉,等.信息·熵·经济学[M].北京:经济科学出版社,2013:19-23.
[8]李勇,刘俊勇,刘晓宇,等.基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J].电力系统自动化,2012,36(19):11-16.
LI Yong,LIU Junyong,LIU Xiaoyu,et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(19):11-16.
[9]曹一家,王光增,曹丽华,等.基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J].电力系统自动化,2011,35(7):1-6.
CAO Yijia,WANG Guangzeng,CAO Lihua,et al. An identification model self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(7):1-6.
[10]邱菀华.管理决策熵学及其应用[M].北京:中国电力出版社,2010:140-172.
[11]国家电力调度通信中心.电网典型事故分析(1999-2007)[M].北京:中国电力出版社,2008.
[12]国家电力调度通信中心.全国电网典型事故分析(1988-1998)[M].北京:中国电力出版社,1999.
[13]国家电网公司安全监察部.国家电网公司2008年安全生产事故报告[M].北京:中国电力出版社,2009.
[14]国家电网公司安全监察部.国家电网公司2011年安全生产事故报告[M].北京:中国电力出版社,2012.
[15]殷春武.组合预测中新旧历史数据对组合权重影响仿真分析[J].科学技术与工程,2012,12(27):6960-6963.
YING Chunwu. The impact simulation analysis to the combination weight of new and historical data in combination forecasting[J]. Science Technology and Engineering,2012,12(27):6960-6963.
[16]孙广强,姚建刚,谢宇翔,等.基于新鲜度函数和预测有效度的模糊自适应变权重中长期电力负荷组合预测[J].电网技术,2009,33(9):103-107.
SUN Guangqiang,YAO Jiangang,XIE Yuxiang,et al. Combination forecast of medium- and long-term load using fuzzy adaptive variable weight based on fresh degree function and forecasting availability[J]. Power System Technology,2009,33(9):103-107.
[17]叶守泽.水文水利计算[M].武汉:武汉大学出版社,2013:10.
[18]马懿.基于MATPOWER的电网大停电事故分析[D].青岛:山东科技大学,2011:22-23.
[19]尹星露,肖先勇,孙晓璐.基于预测有效度和马尔科夫-云模型的母线负荷预测模型筛选与变权重组合预测[J].电力自动化设备,2015,35(3):114-119.
YIN Xinglu,XIAO Xianyong,SUN Xiaolu. Bus load forecasting model selection and variable weights combination forecasting based on forecasting effectiveness and Markov chain-cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):114-119.
[20]于群,石良,曹娜,等.广义极值理论在大停电事故损失负荷预测中的应用[J].电力系统自动化,2016,40(8):71-77.
YU Qun,SHI Liang,CAO Na,et al. Application of generalized extreme value distribution in predicting power loss of large-scale blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(8):71-77.
[21]国家能源局.2013年全国电力安全生产情况通报[EQ/OL].(2014-01-08)/[2017-05-19]http://www.nea.gov.cn/index.htm.
[22]国家能源局.2014年全国电力安全生产情况通报[EQ/OL].(2015-01-05)/[2017-05-30]http://www.nea.gov.cn/index.htm,(2015-01-05).

(责任编辑:傅　游)