

[状态评估]

计及不确定性因素概率特性的配电网运行状态评估

文/耿晶晶
国网上海奉贤供电公司

首先分析配电网未来时刻运行的不确定性因素。然后综合考虑配电网当前时刻的运行信息和未来时刻的不确定运行信息，采用动态概率潮流计算确定未来时刻的评估指标。最后基于最保守原则选择基础层评估指标计算值，利用属性数学对配电网的运行状态进行辨识。实例表明，该模型能够准确计及未来不确定性运行因素并较稳妥地评估配电网当前时刻的运行状态。

随着分布式电源、电动汽车等多元负荷的大量接入，以及网架结构的不断优化，配电网呈现出一定的间歇性和随机性，这对配电网的安全可靠供电及电能质量等提出了更高的要求。自愈能够快速切除故障并恢复供电，因此实时掌握配电网的运行状态并预测分析变化趋势变得尤为重要。

电网运行状态评估在传统输电电网中的应用已经比较成熟^[1-5]，但在配电网中的应用研究还有待发展。文献[6-9]建立了基于电网单一特性的配电网运行状态评估模型，但均未建立一个综合的状态评估模型。文献[1,10]从安全性、可靠性和优质性等多个方面建立配电网综合运行状态评估模型，但都只考虑配电网当前时刻运行状态。配电网未来时刻的运行存在诸多的不确定性因素，因此在评估当前配电网的运行状态时还需计及未来时刻的不确定性因素，才能在发现配电网运行可能存在的安全隐患或线路绝缘下降等信息后及时对配电网的运行方式进行改变调整，使配电网运行于更健康的状态。

配电网运行不确定性因素分析

配电网的运行状态主要取决于其网络拓扑结构与参数、电气运行参数和可能引起故障的各种扰动

等。经归纳整理，可以从电源、网络和负荷三个方面分析配电网的运行状态是否可能从优化或正常状态进入异常、恢复甚至是紧急状态。

(1) 因配电网有功和无功电源过/欠量或变化超出允许范围所引起的运行异常情景

1) 如配电网负荷较大时电压偏低，则说明无功电源补偿量不足；如配电网负荷较小时电压偏高，则说明无功电源补偿量过剩。

2) 间歇性分布式电源出力的波动幅度超出允许范围，会导致配电网的电压发生剧烈波动，导致配电网的潮流发生波动甚至越限，最严重时会引起电网的低频振荡。

(2) 配电网正常调度的开关设备操作和发生故障后继电保护装置的动作，配电网供电网架结构发生变化，会减弱配电网自身结构的坚强度

(3) 因配电网过负荷较严重、过负荷时间或负荷变化超出允许范围引起的状态异常^[2]

1) 负荷上升或下降速度过快，变化速率超出允许范围，配电网的容量和响应急剧下降，导致其备用容量快速减小。

2) 在大型赛事或重大庆典的结束前后，对配电网负荷上升还是下降的趋势和程度难以准确把

握，因把握方向错误会导致配电网的运行状态趋于恶化。

配电网电源的出力、网络的运行方式和电力用户的负荷均存在很大的不确定性，与配电网的运行状态影响关系如图1所示。仅仅关注电压和功率变化的随机性对运行状态变化产生的影响。

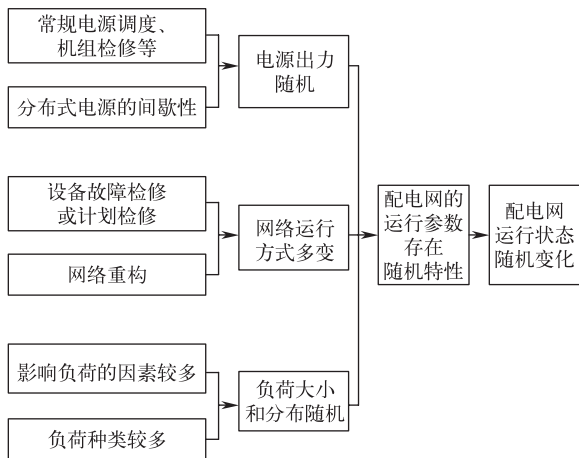


图1 配电网运行不确定性因素与运行状态变化关系分析

配电网运行不确定性因素的概率特性建模

由于配电网的运行参数存在随机特性，认为未来某一时刻配电网的状态变量（节点电压、支路电流等）也可以视为随机变量，因此采用动态概率潮流方法计算配电网状态变量的概率特性。文献[12]将随机变量的概率分布随时间的变化而变化的模型称为动态概率模型，动态概率变量为规律波动成分与随机波动成分的叠加。仅仅考虑电力负荷的随机性，在已建立负荷动态概率模型的基础上，将未来时刻的负荷预测值作为动态概率变量的规律波动部分，而将历史实际运行与历史预测的负荷之差作为动态概率变量的随机波动部分，同时采用正态分布^[13]近似反映其不确定性，均值和方差在一定程度上可以描述这些随机状态变量的概率分布特性，即

$$Y_i \sim \text{Normal}(\mu, \sigma) \quad (1)$$

式中， μ 为状态参数的期望值； σ 为状态参数的方差。

假设经动态概率潮流计算得到配电网某个状态参数 i （连续型随机变量 I ）的概率密度函数为 $p(i)$ ，如果积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} ip(i)di$ 绝对收敛，则称此积分结果为 I 的数学期望 $E(I)$ ， $E(I)=\int_{-\infty}^{+\infty} if(i)di$ ^[5]。

计及不确定性的配电网运行状态属性区间辨识

通过动态概率潮流计算得到未来某一时刻所有状态变量的概率密度函数后，这些状态变量呈正太分布，落入任意一个区间均存在一定的概率：假设状态变量 i 取值的某个区间为 $[a, b]$ ，则该状态变量落入区间 $[a, b]$ 的概率^[14]为

$$P(i) = \int_a^b p(i)di \quad (2)$$

由文献[1]可知，配电网运行状态评估指标分类标准矩阵存在五个分段区间，分别计算落入这五个区间的概率值为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 。

设第 k 等级的分类标准区间为 $[a_k, b_k]$ ，采用近似期望公式计算未来时刻该状态变量的评估指标值。公式为

$$E(k) = \sum_{i=1}^K \int_{a_k}^{b_k} ip(i)di \quad (3)$$

基于当前时刻配电网的运行参数可以得到当前时刻的评估指标值；基于未来时刻配电网预测运行参数及其不确定性，可以得到未来时刻的评估指标值。本文基于最保守原则将较差的评估指标值代入指标体系计算，即当前时刻的运行参数与未来时刻的运行参数相比较差时，采用当前时刻的评估指标值；当前时刻的运行参数与未来时刻的运行参数相比较好时，则采用未来时刻的评估指标值。计及不确定性的配电网运行状态属性区间评估模型与文献[1]中不计及不确定性的评估模型类似，此处不再赘述。计及不确定运行信息的配电网运行状态评估流程如图2所示。

算例分析

为了验证所提出的计及不确定性的配电网运行状态属性区间辨识模型的准确性，采用文献[1]中的实际配电网为例进行分析。

选取该配电网2021年6月20日三个时刻的运行状态进行评估，这三个时刻为8:30，17:30和11:30，分别简称为时刻1、时刻2和时刻3。在计及不确定性时需要考虑未来时刻的运行信息，假设未来时刻从当前时刻往后推30 min，即评估周期为30 min，因此需要考虑的未来时刻分别为9:00整、18:00和24:00整，分别简称为时刻4、时刻5和时刻6。综合考虑当前时刻和未来时刻的运行信息，对时刻1、时刻2和时刻3的运行状态做综合评估，并

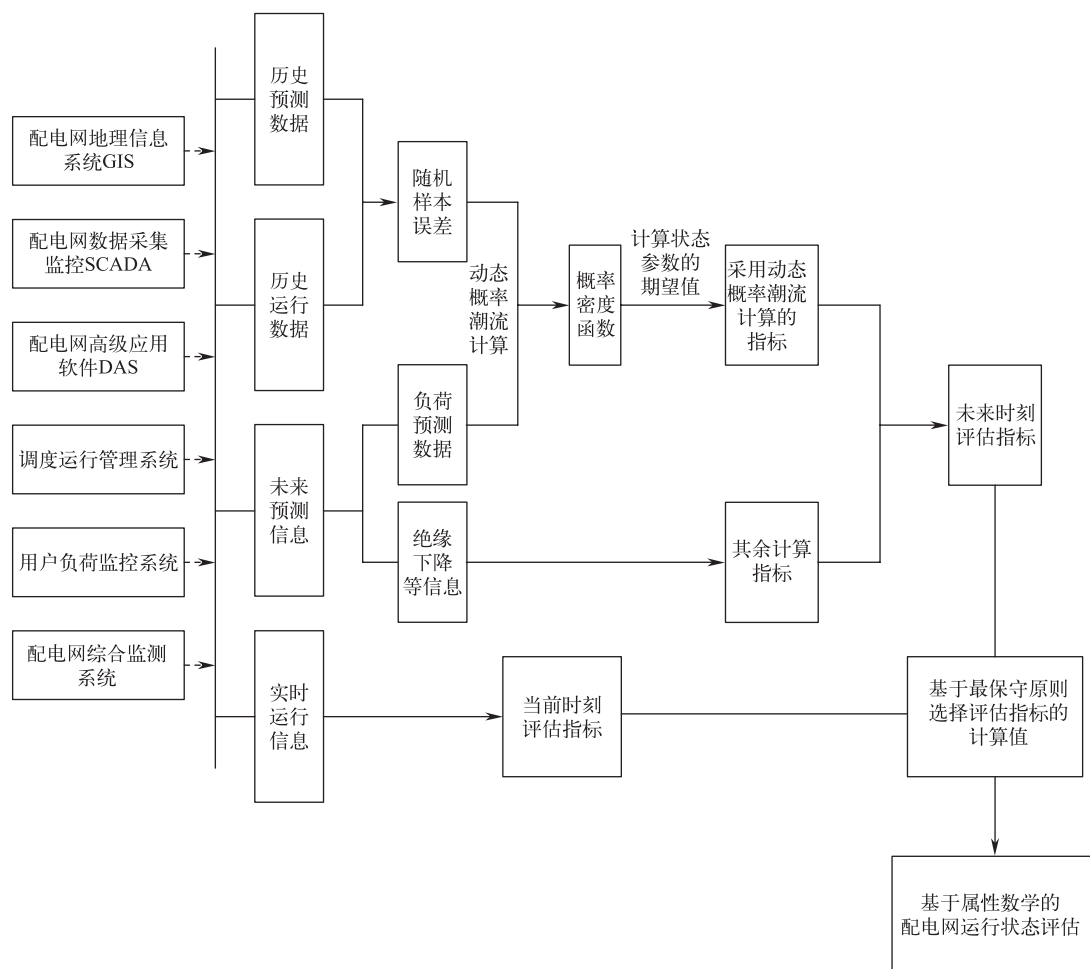


图2 计及不确定性的配电网运行状态评估流程

对两种评估结果做分析比较。

1. 未来时刻的基础评估指标计算

通过对基础评估数据的准备和分析工作，获得配电网运行状态评估所需的历史负荷预测数据、历史实际运行负荷数据、未来时刻的负荷预测数据，以历史负荷预测数据和历史实际运行负荷数据之差作为未来时刻负荷预测与实际运行负荷数据的误差样本，基于动态概率潮流计算配电网运行参数的概率密度函数，通过积分计算五个近似期望值，下限和上限分别为对应运行状态评估指标的最小值和最大值，最后对五个近似期望值累加求和，将得到的未来三个时刻的基础层评估指标计算结果列于表1中。在前文中提到，仅仅关注电压和功率的随机特性对配电网的运行状态变化所带来的影响，因此考虑未来时刻不确定运行信息的基础层评估指标只包含最严重电压、过负荷倍数、电压偏差、网络损耗率和功率因数。

表1 未来时刻基础层评估指标计算结果

基础层 评估指标	未来时刻		
	时刻4	时刻5	时刻6
最严重电压	0.939 5	0.953 5	0.991 8
过负荷倍数	1.098 1	0.671 9	0.430 8
电压偏差	0.008 2	0.005 1	0.003 2
网络损耗率	0.031	0.036	0.023
功率因数	0.844 4	0.845 2	0.845 7

将表1中的数据一致化处理后的结果见表2。

表2 未来时刻基础层评估指标一致化处理结果

基础层 评估指标	未来时刻		
	时刻4	时刻5	时刻6
最严重电压	0.939 5	0.953 5	0.991 8
过负荷倍数	0.431 0	0.960 0	0.615 0
电压偏差	0.992 0	0.995 0	0.997 0
网络损耗率	0.969 0	0.964 0	0.977 0
功率因数	0.844 4	0.845 2	0.845 7

2. 基于最保守原则选择基础层评估指标计算值

结合文献[1]和表2，为了确保配电网安全可靠运行、提高预警作用，基于最保守原则选择基础层评估指标计算值。以上所有评估指标计算值均已经过一致化处理，最终形成的基础层评估指标计算值见表3。

表3 基于最保守原则的基础层评估指标计算值			
基础层 评估指标	时刻		
	时刻1	时刻2	时刻3
最严重电压	0.919	0.936	0.992
过负荷倍数	0.431	0.924	0.615
故障概率	0.45	0.925	0.99
失电负荷占比	0.998	1	1
电压偏差	0.370	0.517	0.947
频率偏差	49.92	49.95	49.99
网络损耗率	0.951	0.958	0.960
功率因数	0.844	0.841	0.846
供电半径	9.5	9.5	9.5

3. 准则层评估指标的属性辨识

1) 基础层评估指标值矩阵规格化处理

计算表3中的基础层评估指标的下界隶属度和上界隶属度，结果见表4、表5。

2) 基础层评估指标权重计算

基础层评估指标的权重计算结果见文献[1]。

3) 准则层评估指标的综合属性测度计算

配电网运行状态评估指标体系的准则层存在四

个评估指标，因此需要分别计算，准则层评估指标的下界属性测度和上界属性测度见表6、表7。

表4 基础层评估指标值的下界隶属度			
基础层 评估指标	时刻		
	时刻2	时刻4	时刻6
最严重电压	0.937 8	0.955 1	1
过负荷倍数	0.463 4	0.993 5	0.661 3
故障概率	0.450 5	0.925 9	0.991 0
失电负荷占比	0.999 0	1	1
电压偏差	0.377 6	0.527 6	0.966 3
频率偏差	0.999 4	1	1
网络损耗率	1	1	1
功率因数	0.937 8	0.934 4	0.940 0
供电半径	0.791 7	0.791 7	0.791 7

表5 基础层评估指标值的上界隶属度			
基础层 评估指标	时刻		
	时刻2	时刻4	时刻6
最严重电压	0.918 2	0.935 4	0.991 9
过负荷倍数	0.419 4	0.922 4	0.607 1
故障概率	0	0.625 0	0.950 0
失电负荷占比	0.960 0	1	1
电压偏差	0.363 6	0.512 1	0.946 5
频率偏差	0.920 0	0.950 0	0.990 0
网络损耗率	0.755 0	0.790 0	0.800 0
功率因数	0.480 0	0.470 0	0.487 6
供电半径	0.541 7	0.541 7	0.541 7

表6 准则层评估指标的下界属性测度										
时刻	安全性评估状态					可靠性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.000 8	0.000 9	0.133 8	0.820 8	0.043 7	0.009 3	0.432 6	0.245 3	0.178 7	0.134 1
2	0.000 1	0.000 1	0.011 7	0.080 0	0.908 1	0.000 0	0.142 9	0.307 7	0.312 9	0.236 4
3	0.000 5	0.000 6	0.081 4	0.558 9	0.358 6	0.000 0	0.098 5	0.212 2	0.301 2	0.388 1
时刻	优质性评估状态					经济性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.029 0	0.363 7	0.469 2	0.081 9	0.056 1	0.000 0	0.052 6	0.203 7	0.422 5	0.321 2
2	0.004 7	0.059 1	0.723 2	0.126 3	0.086 8	0.000 0	0.053 1	0.205 7	0.421 0	0.320 1
3	0.000 0	0.000 4	0.082 2	0.485 0	0.432 4	0.000 0	0.052 2	0.202 3	0.423 4	0.322 0

表7 准则层评估指标的上界属性测度										
时刻	安全性评估状态					可靠性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.001 0	0.134 6	0.785 9	0.048 1	0.030 4	0.719 1	0.189 6	0.050 0	0.021 7	0.019 6
2	0.000 1	0.008 8	0.057 5	0.571 9	0.361 7	0.001 3	0.262 5	0.366 3	0.181 9	0.188 1
3	0.000 5	0.066 9	0.436 5	0.289 5	0.206 7	0.000 0	0.008 6	0.063 8	0.456 0	0.471 5
时刻	优质性评估状态					经济性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.105 8	0.463 4	0.171 8	0.147 3	0.111 7	0.001 5	0.095 3	0.403 4	0.465 5	0.034 3
2	0.012 0	0.489 1	0.181 3	0.180 6	0.137 0	0.001 5	0.097 0	0.394 7	0.455 6	0.051 2
3	0.000 0	0.023 2	0.280 5	0.361 5	0.334 8	0.001 4	0.090 7	0.394 7	0.455 5	0.057 7

结合表6、表7及文献[1]可以计算得到准则层评估指标的综合属性测度，见表8。

表8 准则层评估指标的综合属性测度

时刻	安全性评估状态					可靠性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.000 9	0.067 7	0.459 8	0.434 4	0.037 1	0.364 2	0.311 1	0.147 6	0.100 2	0.076 9
2	0.000 1	0.004 4	0.034 6	0.326 0	0.635 0	0.000 6	0.202 7	0.337 0	0.247 4	0.212 3
3	0.000 5	0.033 7	0.259 0	0.424 2	0.282 6	0.000 0	0.053 6	0.138 0	0.378 6	0.429 8
时刻	优质性评估状态					经济性评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.067 4	0.413 6	0.320 5	0.114 6	0.083 9	0.000 8	0.073 9	0.303 5	0.444 0	0.177 8
2	0.008 4	0.274 1	0.452 2	0.153 4	0.111 9	0.000 8	0.075 1	0.300 2	0.438 3	0.185 6
3	0.000 0	0.011 8	0.181 3	0.423 2	0.383 6	0.000 7	0.071 5	0.298 5	0.439 5	0.189 8

4) 准则层评估指标的属性辨识

经级别特征公式^[1]计算，准则层评估指标的属性辨识结果见表9。

表9 准则层评估指标的属性辨识结果

时刻	准则层评估指标			
	安全	可靠	优质	经济
1	3.439 0	2.214 4	2.734 1	3.724 2
2	4.591 3	3.468 0	3.086 4	3.733 0
3	3.954 7	4.184 6	4.178 6	3.746 2

4. 配电网运行状态辨识

1) 将表9中准则层评估指标的辨识结果作为准则层评估指标的输入。

2) 计算准则层评估指标的下界隶属度和上界隶属度，结果见表10、表11。

3) 准则层评估指标权重计算

准则层评估指标的权重计算结果见文献[1]所示。

表10 准则层评估指标值的下界隶属度

准则层评估指标	时刻1	时刻2	时刻3
安全	0.762 2	1	0.923 3
可靠	0.379 5	0.771 3	0.995 2
优质	0.541 9	0.652 0	0.993 3
经济	0.851 3	0.854 1	0.858 2

表11 准则层评估指标值的上界隶属度

准则层评估指标	时刻1	时刻2	时刻3
安全	0.512 2	0.872 3	0.673 3
可靠	0.129 5	0.521 3	0.745 2
优质	0.291 9	0.402 0	0.743 3
经济	0.601 3	0.604 1	0.608 2

4) 目标层评估指标的综合属性测度计算

目标层评估指标的下界属性测度和上界属性测度见表12、表13。

表12 目标层评估指标的下界属性测度

时刻	配电网运行状态评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.003 0	0.036 6	0.362 1	0.538 4	0.059 9
2	0.000 2	0.003 0	0.094 6	0.343 3	0.558 8
3	0.000 1	0.001 3	0.040 1	0.191 5	0.766 9

表13 目标层评估指标的上界属性测度

时刻	配电网运行状态评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.036 5	0.361 4	0.537 4	0.059 8	0.004 9
2	0.002 6	0.080 7	0.292 8	0.476 5	0.147 4
3	0.001 2	0.037 8	0.180 2	0.721 6	0.059 2

利用文献[1]公式(18)，由表12和表13可得目标层评估指标的综合属性测度矩阵，见表14。

表14 目标层评估指标的综合属性测度

时刻	配电网运行状态评估状态				
	紧急	恢复	异常	正常	优化
1	0.019 7	0.199 0	0.449 8	0.299 1	0.032 4
2	0.001 4	0.041 9	0.193 7	0.409 9	0.353 1
3	0.000 7	0.019 5	0.110 2	0.456 6	0.413 1

5. 配电网运行状态辨识

经级别特征值公式^[1]和置信度准则公式^[1]分别对配电网的运行状态进行辨识，配电网的运行状态辨识结果见表15：使用级别特征值公式的运行状态辨识结果分别为“异常状态”“正常状态”和“优化状态”；使用置信度准则公式的运行状态辨识结果分别为“异常状态”“正常状态”和“正常状态”。

表15 计及不确定性的运行状态辨识结果

识别公式	时刻		
	时刻1	时刻2	时刻3
级别特征值	3.125 5	4.071 3	4.261 8
置信度准则	3	4	4

将时刻1、时刻2和时刻3在不计及不确定运行信息时的配电网运行状态辨识结果列于表16中。

表16 不计及不确定性的运行状态辨识结果

识别公式	时刻		
	时刻2	时刻4	时刻6
级别特征值	3.145 3	4.109 0	4.534 8
置信度准则	3	4	5

结论分析

由表15可以看出，采用不同的辨识公式进行配电网运行状态评估时，时刻1和时刻2的评估结果一致，均分别为“异常状态”和“正常状态”，而时刻3的评估结果却不一致，使用级别特征值公式辨识的评估结果为“优化状态”，使用置信度准则公式辨识的评估结果为“正常状态”，这是因为采用置信度准则公式辨识时置信度的阈值设置为0.6，使得评估结果倾向于保守和稳妥。使用级别特征值公式辨识时刻3的运行状态，评估结果计算值为4.2618，此计算结果略大于“正常状态”和“优化状态”的临界值4.2，因此使用级别特征值公式和置信度准则公式辨识的运行状态结果均是可信的，置信度准则公式辨识的结果更倾向于保守和稳妥。

对比表15和表16可以看出，使用级别特征值公式辨识配电网的运行状态评估时，时刻1和时刻2在计及不确定性和不计及不确定性的评估结果差异不大，且在计及不确定性之后的评估结果计算值略降，这是因为在选取评估指标计算值时基于的是最保守原则；并且这两个时刻的未来时刻负荷变化幅度不是非常明显，使得评估结果与不计及不确定性时的评估结果差异很小。但在时刻3，计及不确定性和不计及不确定性的评估结果差异相对较大。在23:30的下一个未来时刻为24:00整，此时由于大部分居民休息使得负荷下降明显，使配电网的负载率降低，配电网轻载导致经济运行水平下降，因此在评估23:30的运行状态时，计及了未来时刻配电网负荷水平低的因素，使评估结果计算值下降，落入“正常状态”和“优化状态”的临界状态附近，而在使用置信度公式辨识时，该时刻的运行状态直接进入“正常状态”。EA

(收稿日期：2024-12-09)

参考文献

[1] 马淑淑. 基于属性数学的配电网运行状态评估[J]. 中国电力, 2019, 52(2):104-110, 118.

[2] 廖瑞金, 王有元, 刘航, 等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3454-3464.

[3] 丁明, 李生虎, 吴红斌, 等. 基于充分性和安全性的电力系统运行状态分析和量化评价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 47-53.

[4] 陈发广, 周步祥, 曾澜钰. 基于多信息融合的变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 140-144.

[5] 韩富春, 董邦洲, 贾雷亮, 等. 基于贝叶斯网络的架空输电线路运行状态评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 101-104.

[6] 王源山. 考虑分布式电源的配电系统可靠性研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[7] 刘健, 司玉芳. 考虑负荷变化的配电网网架安全评估及其应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 70-75.

[8] 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, 15(39): 90-95.

[9] 梁海峰, 刘子嫣. 基于AHP—熵权法—模糊综合分析的智能配电网综合效益评估[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(1):48-55.

[10] 吴争荣, 俞小勇, 董旭柱, 等. 基于状态估计的配电网实时态势感知与评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 140-145.

[11] 谭熙静. 复杂配电网健康诊断及隐藏故障识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[12] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 20-25.

[13] 冯玉国. 水质综合评价灰色理论模型及其应用[J]. 重庆环境学, 1995, 17(4): 31-33.

[14] 印凡成. 概率论与数理统计[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.