

# 电力系统运行状态分析和识别方法研究

程向辉<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 杨嘉湜<sup>2</sup>, 王民昆<sup>2</sup>

(1 四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 电力系统运行状态的识别对于电力系统的安全运行具有重要意义, 在已有的关于电力系统运行状态划分的基础上, 提出判断电力系统运行状态关键性的实用量化指标, 采用基于信息熵的算法, 对实例集进行分析和学习, 构建决策树用以对电力系统运行状态进行状态识别和判断。

**关键词:** 电力系统; 运行状态; 信息熵; 决策树; 状态识别

**Abstract:** The identification of the operating condition of power system has a great significance to the safe operation of the grid. Based on the existing division of operating conditions of power system, the key quantitative indicators are proposed practically for determining the operating condition of power system. Using information entropy algorithm, the example set is analyzed and learned, and the decision tree are established, which is used to identify and estimate the operating condition of the power system.

**Key words:** power system; operating condition; information entropy; decision trees; state identification

**中图分类号:** TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0019-04

## 0 引言

随着电力系统的不断发展, 电力系统规模的增大导致电力系统运行受各类外部因素影响增强, 同时电力系统作为一个时变动态大系统, 面对各种突发事件导致其运行状态发生变化的几率也急剧增大, 电力系统相关部门对这些突发事件的响应将直接影响电力系统乃至整个社会生产生活的方方面面。因此对电力系统运行状态的识别和判断就显得格外重要, 可为系统安全运行提供预警信息, 在突发事件发生时做出最快的响应, 减少损失。

电力系统中的各类运行参数可作为对电力系统的运行状态判断的实用量化指标, 而仅有这些是不够的, 应充分考虑各类因素对电力系统运行状态的影响, 加以量化, 并通过分析电力系统各类运行状态关键特征, 确定了一系列量化判断指标, 针对大量数据和样本集, 采用决策树学习算法 [1] 建立了基于决策树的电力系统运行状态识别方法。这一框架和方法对于电力系统状态运行中进行调度决策和预警、防范事故风险和突发事件的应急响应有着重要意义。

## 1 电力系统运行状态划分简析

1967 年 Dylliaco 划分和定义了电力系统的 5 种运行状态<sup>[1]</sup>: 正常运行状态、警戒状态、紧急状态、系统崩溃和恢复状态。在考虑安全性和经济性的相互交叉、系统的静态和动态性能、故障原因和故障后果等特点后, 基于概率充分性和稳定性计算, 文献 [2] 将电力系统运行状态划分为 8 种: ①安全正常状态。②预警正常状态。③静态紧急状态。④动态紧急状态。⑤静态极端紧急状态。⑥动态极端紧急状态。⑦崩溃/危机状态。⑧恢复状态。8 种运行状态及相互转化路径如图 1 所示。

并在此基础上考虑电力系统实际运行情况、电力调度部门对信息的采纳和对各类事件的响应, 不考虑恢复状态, 将系统运行划分为 4 种状态: ①安全状态。电力系统的频率和各母线电压均在正常运行允许的范围内; 各电源设备和输变电设备又均在参数允许范围内运行; 系统内的发电设备和输变电设备均有足够的备用容量。②预警状态。系统某些运行参数处于临界状态或处于轻度越限状态, 使其对外界的抗干扰能力下降了, 但系统仍能继续正常运行。此时电力调

度部门采取预防性控制措施(如增加发电机的输出功率、调整负荷、改变运行方式等),即能使系统恢复到正常状态。③紧急状态。系统的某些重要参数越限(如变压器过负荷、系统的电压或频率超过或低于允许值)、出现少量的负荷丢失。此时电力调度部门必须及时采取正确而且有效的紧急控制措施。④崩溃(应急)状态。系统的某些运行参数发生严重越限或出现不可控制的切负荷(如切除一级负荷),停电持续时间、停电容量(占系统容量比例)及停电波及范围(停电负荷点数)等都达到应急预案启动条件。

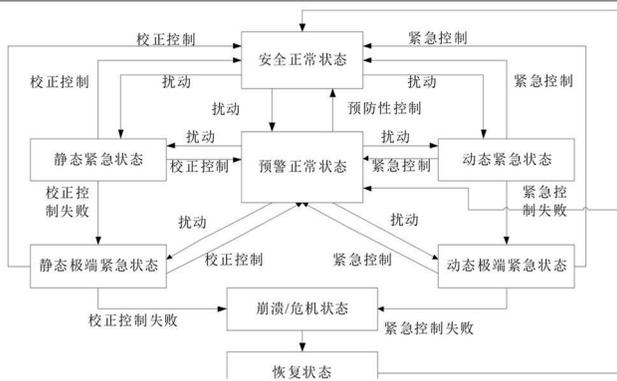


图 1 基于概率充分性和稳定性计算的详细状态定义

## 2 评价系统运行状态的指标

评价电力系统状态的依据有:重要电厂、机组、关键线路、枢纽变电所的严重故障对系统运行状态的影响;功角失稳、电压失稳、频率失稳、节点电压越界、线路过载等动态和静态安全遭受破坏的可能性、严重程度和持续时间;系统切负荷的位置、范围、比例、性质等。

文献 [3] 将安全指标分为两类。第一类,只用给定运行状态下的某些量的大小或者一些量对另一些量的变化关系作为该运行状态的安全性衡量指标,称为状态指标,这类指标主要有以下几种:①电压幅值,以负荷节点或母线电压幅值  $V$  作为安全指标。②灵敏度指标,以某些物理量的变化关系作为安全指标,如  $dQ/dV$ ,  $d\Delta Q/dV$ ,  $dP/dV$ ,  $dQ_C/dQ_V$ ,  $dV/dE$  等 [4,5]。③潮流雅可比矩阵指标,潮流雅可比矩阵最小奇异值  $\delta_{\min}$ ,潮流雅可比矩阵最小模特征值,潮流雅可比矩阵的行列式值 [6]。④频率幅值。以系统频率作为安全指标。第二类,以正常运行状态下和临界状态下某些物理量的差值作为电压稳定性的安全性衡量指标,这一类指标常被称为裕度指标。裕度指标主要有:电压

偏差  $\Delta V = V - V_{CT}$ , 频率偏差  $\Delta F = F - F_{CT}$ , 临界负荷节点的有功负荷差  $\Delta P = P_{CT} - P$  和无功负荷差  $\Delta Q = Q_{CT} - Q$  [4] 等,其中下标“CT”表示相应量为临界状态下的值。

此外,在序贯仿真基础上,静态安全和动态安全评估得到的概率综合评估指标也可作为是判断运行状态的主要依据。主要风险指标有:最大停电功率  $P_{Fmax} WM$ ;最大停电时间  $T_{Fmaxh}$ ;最大停电电量  $E_{Fmax} WMh$ ;停电概率  $P_F$ ;年均停电次数  $F_F$  次/a;年均停电时间  $T_F h/a$ ;年均停电电量  $E_{FM} Wh/a$ ;均次停电时间  $T_{FM} h$  次;均次停电电量  $E_{FM} MWh$  次;年缺电比例  $P_{ENS}$ ;系统失稳概率  $P_{US}$  等,这些指标的计算方法见文献 [7,8]。

对于电网运行状态的分析,不同角度和不同层面采用的分析方法和判别指标都不尽相同。

## 3 电力系统应对措施决策和启动过程

电力系统是一个复杂的系统,在正常情况下,电力系统通过保持相对的稳定性和可控性来达到它的目的和功能;但在某些特殊的情况下,由于电力系统的内因和外因发生了急剧变化,电力系统的稳定性和可控性就会遭到破坏,电力系统的运行状态就会出现异常情况,便会导致电力事故的发生。因此这里针对电力预警和应急调度而将电力系统运行状态划分为以上四种运行状态并提出决策树的识别方法,其目的就是把监控过程中得到的相关运行状态的信息进行分类和处理,结合对应事件的启动条件,尽量及时准确的做出是否启动应急预案和措施的决策。

首先是预警信号的发布,通过对电力事件的初步分析评估,得到描述事件的指标与参数,并且对事件的发生、发展与演化有了基本的了解。根据已经掌握的信息,对是否发布预警信号进行决策,若反应的信息显示已经达到了需要预警的程度,就发布预警信号,提醒相关部门做好突发事件的应急准备;若没有达到预警程度,则继续对该事件进行监控,观察时间的相关信息。其次是分级建立启动阈值,若预警信号发布,说明该事件已经发展到了一定的程度,这时就应分级建立启动阈值,因为应急预案和措施是针对不同的事件和级别制定和实施的,所以需要建立不同等级的启动阈值,作为启动对应措施的标准 [9]。

电力调度人员针对电力系统出现的各种不同情

况、关键参数和指标的变化而采取对应的措施,这与决策树的思想具有明显的相似性,则可将决策树的思想 and 算法运用于对电力系统运行状态的识别。

## 4 基于决策树系统运行状态识别方法

### 4.1 基于信息增益决策树算法的描述

决策树的实现是以信息论原理<sup>[10]</sup>为基础的。在决策树形成的过程中,最重要的部分是对分裂属性的选择。比较常用的一种方法是计算信息,信息增益的原理来自信息论,它是使某个属性用来分割训练集而导致的期望熵值降低。因此,信息增益越大的属性分裂数据集的可能性越大。决策树的形成就是递归的对数据集中的每个节点进行分裂,直到节点的所有类别都属于同一类或没有多余的属性来划分训练样本集。ID3 算法<sup>[11,12]</sup>的具体算法如下。

设 S 为一个包含 s 个数据样本的集合,类别属性可以取 m 个不同的值,对应于 m 个不同的类别  $C_i$ ,  $i = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。假设  $s_i$  为类别  $C_i$  中的样本个数,那么要对一个给定数据对象进行分类所需要的信息量为

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = - \sum_{i=1}^{m} P_i \log(P_i) \quad (1)$$

设一个属性 A 取 v 个不同的值  $\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$ , 利用属性 A 可以将集合 S 划分为 v 个子集  $\{S_1, S_2, \dots, S_v\}$ , 其中  $S_j$  包含了 S 集中属性 A 取值  $a_j$  的数据样本,若属性 A 被选为测试属性(用于对当前样本集进行划分),设  $S_{ij}$  为子集  $S_j$  中属于  $C_i$  类别的样本集,利用属性 A 划分当前样本集所需要的信息熵。

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{S_{j1} + S_{j2} + \dots + S_{jm}}{S} I(S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jm})$$

$$= \sum_{j=1}^v \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S} P_{ij} \log(P_{ij}) \quad (2)$$

其中,  $P_{ij} = S_{ij} / |S_j|$  即为子集  $S_j$  中任一个数据样本属于类别  $C_i$  的概率。这样利用属性 A 对当前分支结点进行相应样本集合划分所获得的信息增益<sup>[13]</sup>为

$$Gain(A) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (3)$$

计算出各属性的信息增益后,选取信息增益最大的属性作为结点向下生成决策树。

### 4.2 电力系统运行状态决策树的建立及算例

建立决策树的第一步,需要对典型事故和历史事故数据进行预处理。采用统计学和人工智能相结合的数据挖掘方法<sup>[12]</sup>,在对大量的数据进行分析后可

以从中找出一些对决策有帮助的数据,形成样本集 S。这里结合实际和分析以往各电网运行状态,取一组样本集,运行状态分别为安全、预警、紧急和应急 4 类共 1362 个样本作为算例。样本集中各种运行状态所占比例如图 2。

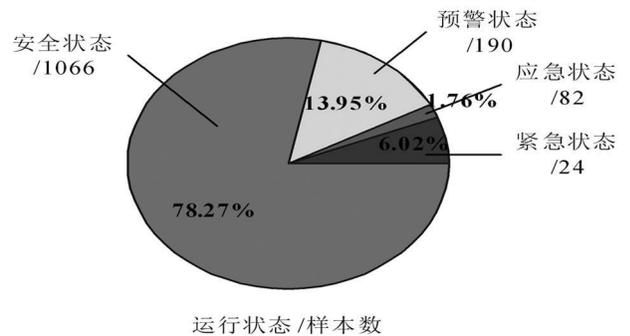


图 2 样本集运行状态比例

同时决策树算法中需要对一个属性取 n 个不同的值,则应取 n-1 个阈值,将其离散化为 n 个等级,而等级的划分和指标的选择同样是需要结合具体电力系统的特征及历史数据的分析来确定的。这里是从电力系统预警和调度角度出发,对出现的各类电力事件进行分析,选取负荷丢失率、频率偏差、电压偏差、线路潮流和备用容量作为识别电力系统运行状态的几个关键指标,进行等级划分:(1)参照文献[14]将负荷丢失率划分(无、轻度、II 级、I 级);(2)频率偏差划分(正常、一定、严重),阈值为  $\pm 0.05 \text{ Hz}$ ,  $\pm 0.2 \text{ Hz}$  或  $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ,  $\pm 1 \text{ Hz}$ <sup>[15]</sup>;(3)电压偏差划分(正常、A 级、B 级、C 级),阈值为  $\leq \pm 5\%$ ,  $\leq +7\%$ ,  $\leq -10\%$ ,  $\leq \pm 10\%$ <sup>[16]</sup>;(4)线路潮流划分(正常、过载);(5)备用容量(充足、紧缺),用以分析该识别方法的可行性。

由样本集选择根节点属性并训练构造决策树由样本集计算信息熵,初始熵值为

$$I(s_1, s_2, s_3, s_4) = I(1066, 190, 82, 24) = 0.3070$$

分别选用各指标作为测试的根节点属性,计算其信息熵及信息增益。计算结果如表 1。

表 1 决策树信息计算结果

属性 A	信息熵值 E	信息增益 I
负荷丢失率 (A1)	0.2249	0.0821
频率偏差 (A2)	0.2266	0.0804
电压偏差 (A3)	0.2397	0.0673
线路潮流 (A4)	0.2423	0.0647
备用 (A5)	0.2612	0.0458

属性 A1 即负荷丢失率具有最高信息增益,被选为根节点。引出分支,递归地使用上述 ID3 算法过

程,一直到叶节点处(熵值为 0)为止。此时得到结论,每个叶结点中的实例都属于同一类(即同一运行状态),从而形成判断电力系统运行状态的决策树。得到的决策树例子如图 3 所示(方框表示内结点,椭圆框表示叶结点)。

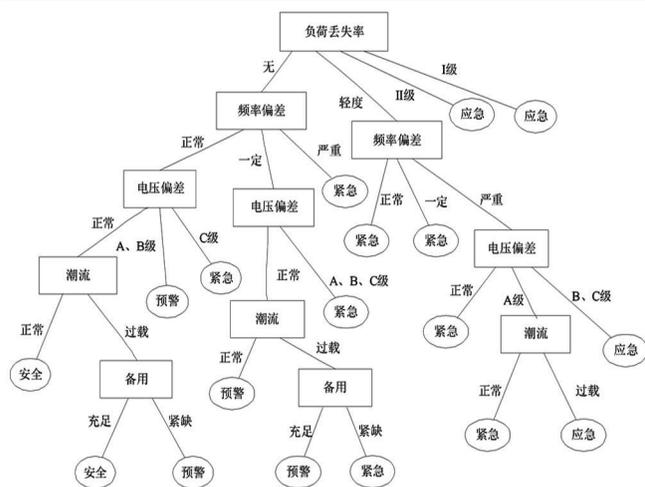


图 3 电网运行状态识别决策树例子

结果分析:在选取的样本集中紧急和应急的运行状态分别达到了 6.02%和 1.76%,出现这样较高的比例,是出于对大的自然灾害(如:地震、台风、雷电、泥石流和冰冻雨雪灾害等)的考虑,同时还与设置的状态条件阈值有关,比较具有典型性。通过对选取样本的学习和计算结果,可以归纳出所举出的电力系统运行状态的一些规律:选用的评价指标中,对电力系统运行状态影响最大的属性是负荷丢失率,其次是频率偏差,之后分别是电压偏差、线路潮流和备用。在决策树建立完成之后,利用监测所得到的信息可以很容易判断出电网处于的运行状态,从而迅速的启用不同的应对措施,保障电力系统的安全运行。

## 5 结 语

电力系统在运行过程中会出现各种影响运行状态的因素和事件,运行状态具有时变性,运行状态的恶化对电网安全是巨大的威胁,针对这些问题,提出了电力系统运行几种状态的定义、应急措施启动条件和基于决策树的电力系统运行状态的识别方法。该方法可作为电力调度人员发布预警和应急信号的决策依据。随着决策树算法的发展,可以选用更适合、更精确的决策树算法用于电力系统运行状态的识别。

## 参考文献

- [1] A. A. Fouad Qin Zhou V. Vittal System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Transactions on Power Systems 1994, 9(2): 1009—1015.
- [1] Dy Liacco T. E. The adaptive reliability control system [J]. IEEE Trans on PAS 1967, 86(3): PAS—86.
- [2] 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): 43—49.
- [3] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化. 1994, 18(9): 36—41.
- [4] Idulkar C S et al Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schems for AC Transm ission Systems [J]. IEEE PES SM 1988. 575—3.
- [5] Schuelter R A. Voltage Stability and Security Assessment [J]. EPRI EI—5967, 1988. 8.
- [6] Tiranuchit A. Thomas R J A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power System [J]. IEEE Trans Vol PWRS—3, NO. 1, Feb. 1988.
- [7] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20—25.
- [8] Ding Ming Li Shenghu Research on integrated evaluation framework of probabilistic adequacy and stability of composite power systems [C]. International Conference on Power System Technology Proceedings (Power Con 2002, Kunming China): 2067—2071.
- [9] 张睿, 陈安, 崔玉泉. 现代应急管理中的监控与启动机制 [J]. 电力系统自动化, 2009, 4(2): 12—19.
- [10] Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication [J]. Bell System Technical Journal 1948, (27): 379—423, 623—656.
- [11] Margaret H Dunham 著, 郭崇慧, 田凤占等译. 数据挖掘教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] 夏火松. 数据仓库与数据挖掘技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 姜丹. 信息理论与编码 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [14] 中华人民共和国国务院. 国家处置电网大面积停电事件应急预案 [EB/OL]. [2006—01—24]. [http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content\\_168998.htm](http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content_168998.htm).
- [15] 国家技术监督局. 电能质量电力系统频率允许偏差 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [16] 林海雪. 新国家标准《电能质量 电压波动和闪变》介绍 [J]. 供用电, 2001, 18(6): 4—10.

(收稿日期: 2009—11—04)