

基于电力系统复杂网络特征的线路脆弱性风险分析

苏慧玲, 李 扬

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出了一种从电力系统复杂网络特征角度分析线路脆弱性风险的方法。该方法首先采用自下而上的层次聚类法挖掘线路脆弱性的层次风险,并以电力系统的复杂网络特征为条件属性,以电力系统线路脆弱性为决策属性,建立系统样本决策表;然后采用基于贪婪启发式算法的ID3决策树数据挖掘法,建立线路脆弱性的精细化决策表;最后根据决策树建立电力系统线路脆弱性的层次风险模型,各层次所含线路的脆弱性风险与层次聚类法所得层次风险水平一致。IEEE 39节点算例结果表明电力系统复杂网络特征的分布情况决定了系统脆弱性线路风险大小。

关键词: 层次风险; 复杂网络特征; 电力系统; 线路脆弱性; 决策树; 层次聚类; 数据挖掘; 风险

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.018

0 引言

现代电力系统是一个复杂的网络系统。电力系统连锁故障以及大停电事故,如系统失步、过负荷、电压异常等的发生一般不是由一个简单原因引起,而是一系列因素相互影响、发展及扩大的后果^[1-2]。现有文献采用风险理论从不同角度分析了电力系统连锁故障发生的概率水平,如系统可靠性角度^[3-4]、继电保护的隐故障^[5]等,但是这类故障往往很难准确预测其演化过程^[6]。通过对历史数据的分析发现,复杂网络系统中的自组织性以及幂律特性同样存在于电力系统网络中。正是由于这些复杂网络特性,电力系统连锁故障能够在一定条件下演变恶化,导致大停电灾难性故障的发生^[7-9]。

传统电力系统安全分析方法无法满足从系统的角度解释电网演化的内在机制,电力系统脆弱性作为传统电力系统安全分析方法的拓展,一方面适应国内智能大电网发展的安全性研究的需求,另一方面对于提高电力系统安全运行水平以及探索大规模连锁故障或者大停电事故等电力系统灾变事故的发生机理具有重要的研究价值。

在复杂网络理论中,元件的脆弱性是指因元件去除而引起网络传输效率的改变量^[10]。在电力系统中,以供电负荷的大小来量化电网的传输效率,采用系统元件故障退出运行引起的失负荷率评估电力系统的脆弱性^[11]。结合电力系统功率分布的实际特点,通过改进的电力系统复杂网络特征来研究电力系统的脆弱性是可行的^[12]。但电力系统元件脆弱性的风险水平和影响其风险大小的本质因素仍是电力

系统脆弱性研究需要进一步探索的问题,这对于控制和改善电力系统脆弱性、提高电网的安全可靠水平具有重要的意义。

由于风险表达的是一种损害的可能概率,不是确定概念下的结果。对于一个样本集合而言,将样本集合按照某种规则进行分类处理,并据此分析各分类的风险概率,然后得到各分类样本的风险分析结果,比直接对样本个体进行风险分析的结果更具代表性,符合风险概率的不确定内涵的分析要求,具有实际意义。

因此,文中首先分层聚类处理电力系统的复杂网络特征以及 $N-k$ 情况下的线路脆弱性,以减少属性值的个数,提高属性值的适应能力;然后采用ID3决策树挖掘法得到具有泛化能力的决策树,通过对决策规则的提取及其分布概率的计算,建立电力系统线路脆弱性分层聚类后的层次风险模型。所提模型综合考虑了电力系统复杂网络特征,克服了简单考虑线路的某一网络特征的不足之处,从电力系统的供电效率(即系统失负荷率)角度,通过线路脆弱性的层次风险概率得到该层次所含线路的脆弱性风险水平。

1 电力系统复杂网络特征

衡量复杂网络特征的基本测度有平均路径长度、聚类系数、节点度以及节点/边介数^[13-14]。其中节点度表示与该节点相连的节点数,描述系统网络结构的局部特征。直观上,一个节点的度值越大就意味着这个节点在某种意义上越“重要”;聚类系数表示了节点的邻接节点之间的连接关系;节点/边介数表示网络中节点之间的最短路径通过该节点/边的次数,介数可以用来衡量节点/边在整个网络中传输信息、物质或能量的作用和影响力,是一个全局几何量。

收稿日期:2013-05-07;修回日期:2013-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277028)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277028)

功率分布是电力网络区别于其他领域复杂网络的独有特征。文献[12]结合准稳态功率分布因子^[15]同时考虑电力系统供需平衡建立了电力系统的复杂网络特征,不仅能从拓扑结构上反映节点之间的拓扑连接关系,而且能反映实际系统有功潮流的分布特点。本文采用该文献电力系统复杂网络特征模型,研究线路脆弱性的风险水平。

2 $N-k$ 预想事故情况下线路脆弱性模型

基于复杂网络理论中元件脆弱性概念^[10],文献[12]以系统的最小失负荷率来衡量线路的脆弱性,其中,最小失负荷率的计算是采用直流优化潮流法并考虑机组出力约束、节点允许失负荷约束以及线路传输有功约束。

电力系统是一个复杂的非线性网络系统,各元件之间存在着复杂的连接关系,其中长程连接的存在被认为是连锁故障的诱因之一,元件彼此之间相互影响。在 $N-k$ 预想事故情况下 k 个元件同时故障,由文献[12]能够得到故障集的脆弱性,却无法辨识在 $N-k$ ($k > 1$) 预想事故情况下具体元件的脆弱性。令故障集 F 包含 k 个元件,建立线路 c_i 脆弱性模型如式(2)所示。

$$F = \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \quad k > 1 \quad (1)$$

$$V(c_i) = \frac{\sum V_k(F|c_i \in F, k)}{\text{num}(F|c_i \in F, k)} \quad (2)$$

其中, F 表示 $N-k$ 预想事故情况下的故障集; c_1, c_2, \dots, c_k 表示故障集 F 中的元素,代表系统中某一条线路; $V_k(F|c_i \in F, k)$ 表示在 $N-k$ 预想事故情况下故障集 F 包含 c_i 时的脆弱性; $\text{num}(F|c_i \in F, k)$ 表示 $N-k$ 故障情况下包含 c_i 的故障集 F 个数。

3 ID3 决策树挖掘

决策表 $S = \langle U, R, V, f \rangle$, $R = C \cup \{d\}$ 是属性集合,子集 C 和 $\{d\}$ 分别是条件属性和决策属性集; $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是有限的对象集合即论域; V 是属性的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数。一个决策表包含了大量样本的信息,其中每一个样本代表一条基本决策规则。由决策表可以得到一个决策规则集合,但是该规则集合只是机械地记录了样本的情况。决策树是知识发现工具箱中一种重要的数据挖掘方法。将选择出的特征属性即条件属性和决策属性作为决策表的输入属性,自动生成可伸缩性、可解释性和泛化能力好的决策树,然后从决策树中提取精细化决策规则^[16]。

ID3 学习算法是一种启发式贪婪算法。本文基于信息熵的概念,采用 ID3 算法建立决策树,根据决策树得到的决策规则挖掘线路的脆弱性风险。

3.1 基于层次聚类的连续属性离散化

连续属性的离散化是机器学习和数据挖掘的重要预处理步骤,直接影响学习的效果。离散化是在连续属性的值域范围内选择若干个分割点,从而把整个属性值域分为若干个子区间,每个子区间用一个符号值代替^[17]。层次聚类是根据研究对象之间的相似程度进行分区划分,使得在同一个分区内的对象具有较高的相似度,而不同层次分区内的对象具有较低的相似度。

采用欧几里得距离衡量连续属性值之间的相似度,基于自下而上的层次聚类法^[18]将每个对象均为一个分区,逐步将这些分区进行合并,直到分区合并并在层次顶端或满足终止条件为止。连续属性的离散化实现了属性值的合并,减少了属性值的个数,降低了问题的复杂度。

此处,文中是以直到合并并在层次顶端为止来确定属性分区。关于离散化区间数选取的处理则是根据属性值在聚类过程中的分区情况来确定的,具有既不覆盖关键信息又能反映属性值的分布特点。

3.2 ID3 决策树

决策树是利用树形图进行决策的方法,树的每个内部结点代表属性的类别,其分支代表属性的取值,树的每个叶结点代表决策属性的取值。树的最高层结点就是根结点。从决策树的根结点到叶结点的一条路径就形成了对相应对象的分类知识,可用 IF-THEN 分类规则的形式加以表示^[19]。

通常使用信息增益方法来帮助确定生成每个结点时所应采用的合适属性。

定义 1 一个离散随机变量 X 的熵定义为:

$$H(X) = - \sum_{x \in X} p(x) \log_2 p(x) \quad (3)$$

其中, $p(x)$ 表示数据对象 x 属于类别 X 的概率。

定义 2 假设一个属性 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 包含了集合 S 中属性 A 取 a_j 值的数据样本。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 中属于类别 C_i 的样本数。那么利用属性 A 划分当前样本集所需要的信息熵定义为:

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{mj}}{s} H(s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{mj}) \quad (4)$$

其中, s 为样本数 s_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, v$) 的总和, m 为集合 S 的分类数。 $E(A)$ 计算结果越小, 就表示其子集划分结果越“纯”。

定义 3 对于一个给定子集 S_j , 它的信息熵为:

$$H(s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{mj}) = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (5)$$

其中, $p_{ij} = \frac{s_{ij}}{|S_j|}$, 即为子集 S_j 中任一个数据样本属于

类别 C_i 的概率, $|S_j|$ 表示子集 S_j 中 $s_{ij}(i=1,2,\dots,m)$ 的总和。

定义 4 利用属性 A 对当前分支结点进行相应样本集合划分, 所获得的信息增益为:

$$\text{Gain}(A) = H(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (6)$$

其中, s_1, s_2, \dots, s_m 表示以类别划分集合 S 所得各子集的样本数。

$\text{Gain}(A)$ 被认为是根据属性 A 取值进行样本集合划分所获得的(信息)熵的减少(量)。

ID3 决策树法计算每个属性的信息增益, 并从中选出信息增益最大的属性作为分支结点。所产生的结点被标记为相应的属性, 并根据该属性的不同取值分别产生相应的(决策树)分支, 每个分支代表一个被划分的样本子集。

3.3 线路脆弱性的层次风险模型

通常风险的概念是指某一特定危险情况发生的可能性和后果的组合^[20]。电力系统的脆弱性与其复杂网络特征紧密相关。这里关于线路脆弱性的层次风险是从线路复杂网络特征的分布情况来考虑线路脆弱性的概率情况, 并以线路脆弱性表示危险情况的后果。借用决策表的形式, 以与线路相关的复杂网络特征为条件属性, 以线路的脆弱性为决策属性, 建立决策表。

首先, 由连续属性离散化后的决策表, 采用概率统计法可以得到连续属性离散化结果的概率分布情况, 以用于反映连续属性在不同区间的分布情况; 其次, 精细化决策表, 决策树是决策表的精细化结果。从决策树的根结点到任一叶结点所形成的一条路径就构成一条决策规则。

以属性类别表示树结点, 以属性取值表示树枝, 以决策属性值表示叶结点, 根据 ID3 决策树的精细化决策规则, 由连续属性离散化结果的概率分布情况, 建立线路脆弱性分层聚类后的层次风险如下。

设连续属性 A_1, A_2, \dots, A_n , 其中 A_1, A_2, \dots, A_{n-1} 表示条件属性, A_n 表示决策属性, 将连续属性 $A_i(i=1, 2, \dots, n)$ 值由大至小排序, 基于层次聚类法将其离散分区表示, 采用概率统计法得到离散化结果的概率分布 p_{jAi} , 其中下标 j 表示离散分区序号。

决策树提取决策规则 Rule_l 表示如下:

$$\text{Rule}_l: A_i \rightarrow j_{Ai} \rightarrow \dots \rightarrow A_p \rightarrow j_{Ap} \quad (7)$$

$i, p \in [1, 2, \dots, n-1]; j \in [1, 2, \dots, J]; l=1, 2, \dots, M$ 其中, A_i 表示条件属性, 对应决策树中的结点; j_{Ai} 表示条件属性 A_i 的属性取值, 对应决策树中的树枝; J 表示离散分区数; M 表示决策规则总数。

该决策规则对应的决策属性取值, 即对应决策树中的叶结点, 表示如下:

$$\text{Rule}_l \Rightarrow j_{An} \quad (8)$$

其中, j_{An} 表示决策属于 A_n 的离散化分区值。

该决策规则的分布概率为:

$$P_{\text{Rule}_l} = p_{j_{Ai}} \cdots p_{j_{Ap}} \quad (9)$$

根据式(8)、(9), 得到线路脆弱性在对应离散分区下的层次风险:

$$P_j = \sum_{l=1}^M P_{\text{Rule}_l}(j_{An}) \quad (10)$$

通过式(10)可以得到线路脆弱性在各聚类层次的风险大小, 系统各线路的脆弱性风险水平取其所在层次的风险水平。

需要说明的是, 本文从电力系统复杂网络特征的角度建立线路脆弱性的风险模型, 侧重从电网结构特征的角度研究线路脆弱性的风险情况, 暂未考虑系统的负载水平以及发电和负荷注入的变化。

3.4 算法流程

在现代电力系统网络中, 节点和线路之间存在复杂的连接关系, 它们均对电力系统的脆弱性有不同程度的影响, 如果仅从线路或节点的角度来衡量它们的脆弱性, 显然忽略了节点和线路之间相互影响的复杂关系。将节点和线路的复杂网络特征作为条件属性, 将线路的脆弱性作为决策属性, 以决策表的形式表示, 通过 ID3 决策树法实现对决策表的精简。根据连续属性的离散化结果, 采用概率统计方法可以得到连续属性离散分区的概率分布, 结合决策规则, 由第 3.3 节可以得到线路脆弱性的层次风险水平。图 1 所示为算法分析流程。

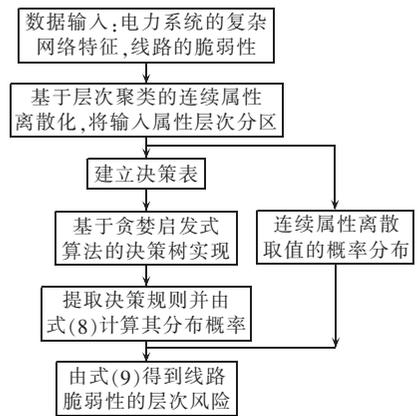


图 1 线路脆弱性层次风险挖掘流程

Fig.1 Flowchart of line vulnerability hierarchical risk discovery

4 算例分析

本文采用 IEEE 39 节点算例来分析验证, 网络结构图见图 2, 对图中线路进行编号如表 1 所示。该系统线路总数为 46, 其中将变压器支路等效视为线路。将线路首末端节点的度及其介数、线路的介数作为条件属性, 分别以标号 1、2、3、4、5 表示; 以 $N-k$ 情况下的线路脆弱性为决策属性, 其中 k 取 1、2、3。

在层次聚类的连续属性离散过程中,选取离散分区数 $J=6$,离散分区序号越大对应连续属性值越小,反之则越大,各离散化属性的取值分别采用所在分区的分区序号表示。决策树是以输入属性即条件属性和决策属性为树结点,其中决策属性的离散化取值为叶结点,条件属性的离散化取值为树枝。

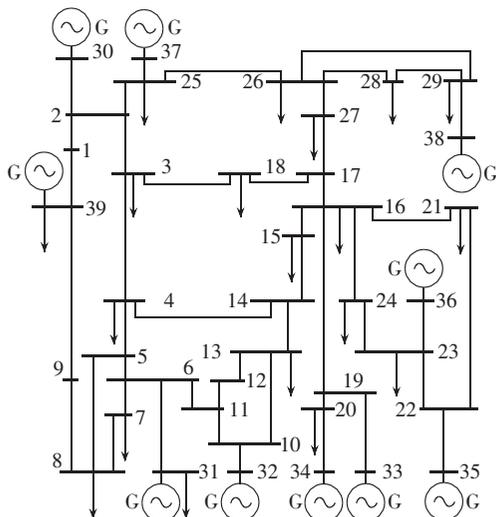


图 2 IEEE 39 节点系统

Fig.2 IEEE 39-bus system

表 1 线路序号对应节点标号

Tab.1 Line number and corresponding node mark

线路序号	始端节点	末端节点	线路序号	始端节点	末端节点
1	1	2	24	14	15
2	1	39	25	15	16
3	2	3	26	16	17
4	2	25	27	16	19
5	2	30	28	16	21
6	3	4	29	16	24
7	3	18	30	17	18
8	4	5	31	17	27
9	4	14	32	19	20
10	5	6	33	19	33
11	5	8	34	20	34
12	6	7	35	21	22
13	6	11	36	22	23
14	6	31	37	22	35
15	7	8	38	23	24
16	8	9	39	23	36
17	9	39	40	25	26
18	10	11	41	25	37
19	10	13	42	26	27
20	10	32	43	26	28
21	12	11	44	26	29
22	12	13	45	28	29
23	13	14	46	29	38

4.1 线路脆弱性分布特点

由 2 节可得 $N-k$ 情况下线路的脆弱性,将其由大至小排列,如图 3 所示。将图 3 数据结果采用第 3.1 节所示离散化方法进行离散化分区表示,结果如表 2 所示。由表 2 可知,线路 46、39、37 表现出较

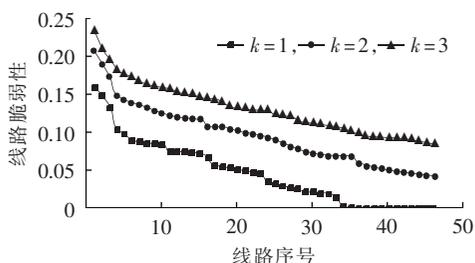


图 3 $N-k$ 情况下的线路脆弱性

Fig.3 Line vulnerability in $N-k$ condition

强的脆弱性,分别位于分区 1、2、3。结合电网结构图,这些线路连接发电节点,且周围负荷分布较为密集,如线路 46 连接发电节点 38,为邻负荷节点 26、27、28、29 供电 91.3%;线路 39 连接发电节点 36,主要供电给负荷节点 23、24;线路 37 连接发电节点 35,主要供电负荷节点为 21、23,这些线路故障退出运行将直接影响系统的供电能力。而线路 14、20、33、34、41 也直接连接发电节点,但其周围负荷节点较为分散,因此这些线路故障退出运行对供电负荷的破坏影响相对线路 46、39、37 而言有所降低,其脆弱性位于分区 4。此外,在电力系统中重要的功率传送线路的脆弱性也不容忽视,如发变单元的出线线路 10、12、13、18、19、27、35、38、45 以及直接连接重要负荷的线路 3、9、11、25、42,其脆弱性位于分区 4。因此,可以得到,在电力系统中负荷密集区的发电厂的出线及其变压器支路的脆弱性最高,其次是系统中重要的发电厂出线及其变压器支路以及重要的功率传送线路,最后是与次要负荷和发电机相连的线路以及系统中次要的功率传送线路。本文以发电厂的实际供电与最大供电能力之比来衡量发电厂的重要性,以负荷的大小表示负荷的重要性。

由表 2 中线路脆弱性分区情况可知,系统线路大部分分布在分区 4、5、6,分区 1、2、3 则分布较少的线路,而分区 1、2、3 在电力系统网络中最脆弱,分区 4、5、6 具有低脆弱性。该分布特点有助于重点关注系统中少部分的较脆弱线路。

4.2 决策规则的建立及分析

根据图 1,在连续属性离散化的基础上,建立 $N-k$ 情况下线路脆弱性的决策表。以 $k=1$ 情况下部分样本信息来表示决策表的构造,如表 3 所示。样本信息为系统所有线路的连续属性的离散化信息,样本数为系统线路的总数。

由第 3 节可知,表 3 所示决策规则机械地记录了系统样本的情况。采用 ID3 决策树法精细化决策规则,如表 4 所示,表中“*”表示对应条件属性可忽略。需要说明的是,当某一决策属性值对应样本信息较为丰富时,该方法能够实现去冗余,因此能够从有限样本中选择最能描述其特点的

表 2 $N-k$ 情况下线路的脆弱性分区
Tab.2 Line vulnerability partition in $N-k$ condition

分区 序号	线路序号		
	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1	46	46	46
2	39	39	39
3	37	37	37
4	3, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 23, 25, 27, 33, 34, 35, 38, 41, 42, 45	9, 10, 13, 14, 19, 20, 23, 27, 33, 34, 35, 41	14, 33, 34
5	4, 5, 8, 15, 26, 28, 30, 32, 43, 44	1, 3, 4, 5, 8, 11, 12, 15, 18, 25, 26, 28, 30, 32, 38, 40, 42, 43, 44, 45	1, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 23, 25, 28, 35, 38, 41, 42, 44, 45
6	1, 2, 6, 7, 16, 17, 21, 22, 24, 29, 31, 36, 40	2, 6, 7, 16, 17, 21, 22, 24, 29, 31, 36	2, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 36, 40, 43

表 3 $N-k$ 情况下线路脆弱性的决策表
Tab.3 Decision table of line vulnerability in $N-k$ condition

线路 序号	条件属性值					决策 属性值
	属性 1	属性 2	属性 3	属性 4	属性 5	
1	6	4	5	4	5	6
2	6	6	5	6	6	6
3	4	6	4	5	5	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
46	4	5	4	4	1	1

表 5 条件属性在决策树中的分布概率
Tab.5 Distribution probability of conditional attribute in decision tree

条件属性	分布概率		
	$k=1$	$k=2$	$k=3$
属性 1	0.86	0.88	0.52
属性 2	1.00	1.00	1.00
属性 3	0.23	0.28	0.68
属性 4	0.18	0.08	0.20
属性 5	0.45	0.68	0.48

表 4 $N-k$ 情况下线路脆弱性的精细化决策表
Tab.4 Refined decision table of line vulnerability in $N-k$ condition

规则号	条件属性值					决策 属性值
	属性 1	属性 2	属性 3	属性 4	属性 5	
1	*	1	*	*	*	4
2	*	3	*	*	*	4
3	6	4	*	4	*	4, 5, 6
4	6	4	*	5	*	4
5	4	4	*	*	*	6
6	3	4	*	*	*	4
7	*	5	*	*	*	1
8	6	6	*	*	3	4
9	6	6	*	*	5	4, 5
10	6	6	*	*	6	6
11	4	6	4	*	5	4, 5
12	4	6	4	*	3	2
13	4	6	4	*	2	4
14	4	6	5	*	*	3
15	3	6	*	*	5	5
16	3	6	*	*	6	6
17	2	6	*	*	*	4
18	1	6	*	*	*	4

于各属性在决策树中的分布概率均大于 0,并且决策树的叶结点为决策属性值,由此,可以得到线路的脆弱性与其自身和相应连接节点的复杂网络特征之间的相互关系,说明了线路的脆弱性同时受线路和节点的复杂网络特征的影响。这点也可以从电力系统节点与线路之间的复杂连接关系理解,由于电力系统是一个复杂的网络系统,节点和线路之间紧密相连,它们之间相互影响。线路自身的网络特征能够直接影响线路的脆弱性,而与其相连的两端节点的网络特征对线路的脆弱性也存在一定的影响。

由各条件属性离散化后的概率分布,根据式(9)可以得到表 4 中各决策规则的概率分布情况,如图 4 所示为 $N-k$ 情况下各决策规则在线路脆弱性离散化分区的分布情况,其中,横坐标表示线路脆弱性由大至小排列下的分层聚类结果, j 越小则该层所含线路脆弱性越高,纵坐标表示由表 4 所得精细化决策规则在各层次上的概率分布情况,图上方整数表示各线路脆弱性分层所对应的决策规则条数。可知,在线路脆弱性较小的分区 4、5、6,决策规则的分布较为密集,如分区 5 在 k 取 1、2、3 时包含决策规则数分别为 4、8、11,而在线路脆弱性较大的分区 1、2、3,决策规则的分布较为稀少,如分区 1 在 k 取 1、2、3 时包含决策规则数均为 1。此外,线路脆弱性分区 3 对应的决策规则的分布概率值较大,线路脆弱性也较高;线路脆弱性分区 4、5、6 对应的决策规则的分布概率值差异性较大,某些决策规则的分布概率具有最大值,如 $k=1$ 时分区 4、5 的决策规则的分布概率均为 0.195,但该部分分区的线路脆弱性较低。

信息描述。以样本 46 为例,其决策属性值为 1,而该决策属性对应的样本仅有样本 46。因此,在决策表的精细化中,选择最能将该样本与其余样本区别的条件属性表示,如表 4 中规则 7 所示,以条件属性 2 及对应属性值为 5 表示表 3 中样本 46 的规则信息。

由表 4 可得树结点即各条件属性在决策树中的分布概率,如表 5 所示。由表 5 可见,条件属性 2 是 $N-k$ 情况下决策树的根结点,其分布概率为 1.00,条件属性 1、3、4、5 是决策树的树枝结点,分别对应不同的分布概率,且各分布概率均在 $[0, 1]$ 范围内,由

分区 4、5、6 的脆弱性线路对应的决策规则的概率分布具有较大的差异性,但是其分布的密集度说明了该部分决策规则在决策规则集合中分布的广泛性;分区 1、2、3 的脆弱性线路对应的决策规则的概率分布可能较高,但是该部分决策规则的概率分布较为稀少。由第 3.3 节可知,每一条决策规则的概率分布取决于该规则中各属性的概率分布情况,即电力系统复杂网络特征的分布情况决定各决策规则的概率分布。决策规则概率分布的差异性和密集性是电力系统复杂网络特征分布特点的表现结果。结合表 2 中线路脆弱性分区的分布,该特点在一定程度上从电力系统复杂网络特征的角度说明了线路脆弱性在电力系统网络中的分布情况。

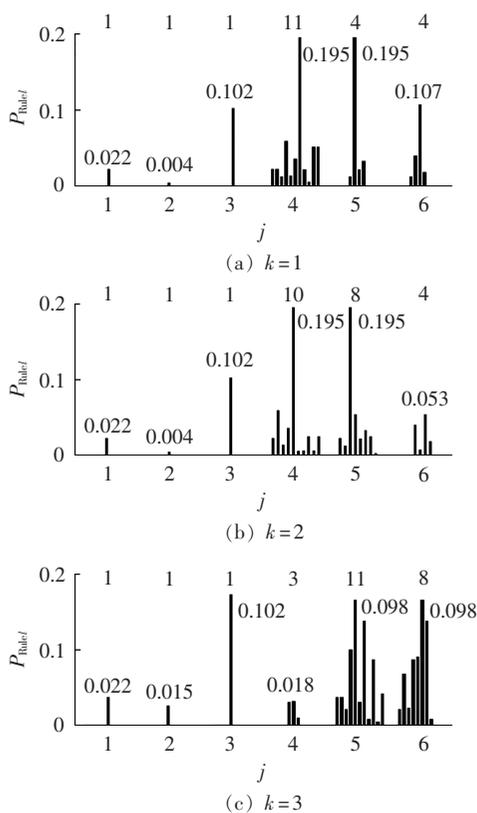


图 4 决策规则的概率分布

Fig.4 Distribution probability of decision rules

4.3 线路脆弱性风险分析

结合上述结果,根据式(10)可以得到线路脆弱性离散化分区下的层次风险大小。

图 5 所示为线路脆弱性离散化分区下的线路脆弱性的层次风险结果,其中线路脆弱性风险值为归一化处理后的结果,该图横坐标表示线路脆弱性由大至小的离散化分区结果 j 。结合表 2 可知,线路脆弱性离散化分区 1、2、3 所对应线路的脆弱性较大,但其脆弱性风险却较小,其中分区 1、2 对应的脆弱性风险归一化值均小于 0.05;而离散化分区 4、5、6 所对应的线路的脆弱性较小,但其脆弱性风险却较

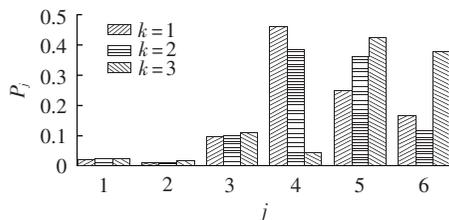


图 5 线路脆弱性风险

Fig.5 Vulnerability risk of lines

大,脆弱性风险归一化值远大于 0.05。

电力系统线路的脆弱性风险由其所在区间的层次风险水平决定。结合表 2 和图 5 可以得到各线路的脆弱性风险水平。

综合表 2 和图 5,在表 2 中线路 46、39 脆弱性最高,由图 5 可知线路 46、39 脆弱性风险最低,可得电力系统线路脆弱性越高,该类线路故障退出运行对电力系统供电水平的破坏也越强,但是其风险水平却比较低;在表 2 中分区 5、6 包含的线路脆弱性最低,由图 5 可知分区 5、6 包含的线路脆弱性风险最高,可得电力系统线路脆弱性越低,该类线路故障对电力系统供电水平的破坏越弱,但是其风险水平却较高。这从电力系统复杂网络特征的角度说明了脆弱性线路在电力系统网络结构上的风险分布情况,具有高脆弱性的线路在系统中分布稀少,其脆弱性风险较低,而具有低脆弱性的线路在系统中分布广泛,其脆弱性风险较高。这在一定侧面上也反映了电力系统灾难性事件的小概率性,而小扰动故障虽频繁发生,但其对电力系统的影响却可以忽略不计。

5 结论

本文提出了一种综合考虑电力系统复杂网络特征的电力系统线路脆弱性风险评估方法。电力系统网络是一个复杂的网络系统,节点和线路之间存在复杂的连接关系。线路自身的网络特征能够直接影响线路的脆弱性,而与其相连的两端节点的网络特征对线路的脆弱性也存在一定的影响;电力系统复杂网络特征的分布情况决定了决策规则的差异性以及密集性;决策规则在线路脆弱性各分区的分布情况能够说明系统线路脆弱性的分布特点,决定了线路脆弱性的风险水平。本文对于从复杂网络系统的角度深入研究电力系统脆弱性以及探讨连锁故障大停电等灾难性事件的发生机理具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] APT J, LAVE L B, TALUKDAR S, et al. Electrical blackouts: a systemic problem[J]. Science and Technology, 2004, 20(4): 55-61.
- [2] 曾鸣, 李娜, 董军, 等. 基于大安全观的电网运行管理关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 9-13.

- ZENG Ming,LI Na,DONG Jun,et al. Key technologies of power grid operation and management based on philosophy of general security[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(16): 9-13.
- [3] DUSKO P,NEDIC I D,DANIEL S K,et al. Criticality in a cascading failure blackout model [J]. Electrical Power & Energy Systems,2006,28:627-633.
- [4] 邹欣,程林,孙元章. 基于线路运行可靠性模型的电力系统连锁性故障概率评估[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):7-11.
- ZOU Xin,CHENG Lin,SUN Yuanzhang. Cascading failure probabilistic assessment of power systems based on operational reliability model for transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):7-11.
- [5] 陈为化,江全元,曹一家. 考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术,2006,30(13):14-19.
- CHEN Weihua,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures of protective relays[J]. Power System Technology,2006,30(13): 14-19.
- [6] DOBSON I. Where is the edge for cascading failure?:challenges and opportunities for quantifying blackout risk[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa,FL,USA:[s.n.],2007: 1-8
- [7] 占勇,程浩忠,熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):93-98.
- ZHAN Yong,CHENG Haozhong,XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):93-98.
- [8] CARRERAS B A,NEWMAN D E,DOBSON I,et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power blackouts [C]//33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Manui,Hawaii,USA:[s.n.],2000:1-6.
- [9] REN Hui,DOBSON I. Using transmission line outage data to estimate cascading failure propagation in an electric power system[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems,2008,55(9): 927-931.
- [10] 何大韧,刘宗华,汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京:高等教育出版社,2009:124-125.
- [11] ARILD H A T H. Structural vulnerability of energy distribution systems;incorporating infrastructural dependencies[J]. Electrical Power and Energy Systems,2009,31(9):531-537.
- [12] 苏慧玲,李扬. 从电力系统复杂网络特征探讨元件的脆弱性[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):12-17,77.
- SU Huiling,LI Yang. Electrical component vulnerability analysis from complex network characteristics of power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):12-17,77.
- [13] 郭雷,徐晓鸣. 复杂网络[M]. 上海:上海科技教育出版社,2006: 1-48.
- [14] 苏慧玲,李扬. 基于准稳态功率转移分布因子的电力系统复杂网络特性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):47-53.
- SU Huiling,LI Yang. Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):47-53.
- [15] 张伯明,陈寿松,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007:20-217.
- [16] PETRA P,SASCHA T. Multi-interval discretization methods for decision tree learning[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1998,1451:475-482.
- [17] JAMES D,RON K,MEHRAN S. Supervised and unsupervised discretization of continuous features [C] // Machine Learning: Proceedings of the Twelfth International Conference. San Francisco, CA, USA:Morgan Kaufmann Publishers,1995:94-202.
- [18] 朱明. 数据挖掘[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008: 169-212.
- [19] QUINLAN J R. Induction of decision trees[J]. Machine Learning 1,1986,1(1):81-106.
- [20] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2006:1-6.

作者简介:



苏慧玲

苏慧玲(1983-),女,河南周口人,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性、需求侧管理(E-mail:suhuil@163.com);

李扬(1961-),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力市场和需求侧管理、智能电网(E-mail:li_yang@seu.edu.cn)。

Line vulnerability risk analysis based on complex network characteristics of power system

SU Huiling,LI Yang

(Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: A method is proposed to analyze the risk of line vulnerability from the perspective of complex network characteristics for power system, which applies the hierarchical clustering from bottom to top to discover the hierarchical risk of line vulnerability, takes the characteristics of complex network as the conditional attribute of power system and the line vulnerability as the decision attribute to build the decision table of system samples and adopts the data-mining of ID3 decision tree based on the greedy heuristic algorithm to build the refined decision table of line vulnerability, and finally builds the hierarchical risk model of line vulnerability according to the decision tree, with the line vulnerability risk of each level identical with the hierarchical risk discovered by hierarchical clustering. Study of IEEE 39-bus case shows the line vulnerability risk of power system depends on the distribution of its complex network characteristics.

Key words: hierarchical risk; complex network characteristics; electric power systems; line vulnerability; decision tree; hierarchical clustering; data mining; risks