

基于改进负载潮流熵指标 准确辨识电网脆性支路的方法

李美成¹, 梅文明^{1,4}, 刘永强², 张凌康³, 宋墩文⁴, 赵充¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 国网山西省电力公司吕梁供电公司, 山西省 吕梁市 033000;

3. 国网甘肃省电力公司酒泉供电公司, 甘肃省 酒泉市 735000;

4. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Accurate Identification Method of Brittle Branches in Power Grid Based on Improved Load Flow Entropy Indexes

LI Meicheng¹, MEI Wenming^{1,4}, LIU Yongqiang², ZHANG Ling kang³, SONG Dunwen⁴, ZHAO Chong¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Corporation, Lüliang Power Supply Company, Lüliang 033000, Shanxi Province, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Corporation, Jiuquan Power Supply Company, Jiuquan 735000, Gansu Province, China;

4. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Critical link location of power system is the key issue of power grid security analysis. For the brittle branches based on load flow state, only the static characteristics of the system are considered. There are deficiencies in ignoring the system operating limit and the characteristics of the components themselves. And also, the influence of voltage running state is neglected when the brittle branches are identified based on complex topology analysis of the power grid. All of above reasons are prone to causing choice missing. In the paper, a set of improved load flow entropy indexes is proposed to accurately identify the brittle branches of power grid. It consists of two stages and three types of sorting and screening. In the initial screening stage, two indexes of improved load flow entropy and branch outage entropy measure are proposed to more accurately describe the trend of stable operation of the system after disturbance. In the deep screening stage, a weighted comprehensive entropy index with adjustment factor and double measure entropy sum is proposed. It meets the need of identifying brittle branches in different scenarios such as power grid design or operation. The classic IEEE 10 machine 39-node example is used and compared with other methods. Simulation results show that the proposed method can identify the brittle branches of the power grid more

comprehensively and accurately.

KEY WORDS: brittle branch identification; improved load flow entropy; branch outage entropy; weighted comprehensive entropy; safe operation of power grid

摘要: 电力系统关键环节定位是电网安全分析的核心问题。针对基于潮流状态识别脆性支路只考虑系统静态特性,存在忽略系统运行极限及元件本身特性影响的不足,以及基于电网复杂拓扑结构分析辨识脆性支路时忽略电压运行状态影响,容易引起漏选的缺陷,提出一套改进负载潮流熵指标准确辨识电网脆性支路的方法,由2阶段3类排序筛选构成,初筛阶段提出负载潮流熵和支路开断熵测度两指标,能准确评估电网稳态时支路不稳定运行特征,以及电网受扰后系统维持稳定运行的趋势。深筛阶段提出含调节因子的双测度熵和加权综合熵指标,满足电网设计或运行等不同场景对辨识脆性支路的需求。针对所提辨识方法,选经典IEEE10机39节点算例,并与其他方法开展对比实验,表明所提方法能更全面、更准确辨识电网脆性支路的优点。

关键词: 脆性支路辨识; 负载潮流熵; 支路开断熵; 加权综合熵; 电网安全运行

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2001

0 引言

电力系统规模日益扩大、互联程度日益复杂,特别是电力电子装置的普遍应用以及大规模新能

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGSCLL00FCJS1800294),
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China
(SGSCLL00FCJS1800294).

源并网运行,导致了系统安全特征的显著变化,加剧了电力系统安全稳定运行的困难。近年来,国内外发生了很多起大停电事故^[1-3],北美 8.14 事故及 2012 年印度 7.30 大停电等重大事故研究说明:大停电发展的初级阶段,一般都是线路故障切除后潮流转移引起相关支路的相继越限,进而引发一些关键支路退出,而导致了电网的崩溃解列^[4-7]。因此有效辨识关键线路对电网的安全稳定运行意义重大。

针对电网关键支路辨识,目前主要有 2 类思路:

一是从电网运行潮流状态出发实现电网关键支路的辨识。文献[4]基于支路负载率构建支路健康度指标和重要度指标评估支路重要性。文献[8-10]依赖潮流分布情况结合电网拓扑结构与支路容量介数或功率介数等指标,反映关键支路对系统的重要性。文献[11-13]结合脆弱性,基于潮流转移和分布特性运用熵理论,定位脆弱性高的风险支路。文献[5,14]定义电网元件脆性度或脆性关联熵反映某一元件故障对电网的影响程度。这类方法的缺点是只考虑系统静态运行情况,而忽略设备运行极限及支路功率分布不均等特性的影响。

二是基于拓扑结构的复杂网络分析进行关键支路识别。文献[15]提出了针对电网拓扑结构的介数指标,改善了度数指标对电网薄弱环节的辨识;文献[16-17]采用小世界拓扑模型,论证了保护脆弱性节点对系统稳定运行的重要性;利用文献[17]研究,文献[18]提出对电网拓扑结构进行加权处理,并改进电能输送最短距离定义,更好反映出电网运行状态。文献[19]在考虑支路拓扑结构基础上提出综合介数指标辨识脆弱性支路的方法,解释了综合介数的物理意义。这类方法的缺陷是只考虑网络结构单一特征,忽略了电网运行状态包括功率、电压以及状态改变的影响,容易引起脆性支路的漏选。

现有研究中很少能兼顾电网结构和运行状态,文献[20]对此进行了尝试,定义有功输电介数指标和冲击性指标对支路重要度进行评估,在一定程度上实现了关键支路的辨识。但未能考虑节点电压、相角变化对系统稳定性的影响。

为弥补上述 3 类思路的缺陷,更准确辨识关键支路,本文提出改进负载潮流熵指标和支路开断熵指标准确辨识电网脆性支路方法,把关键线路辨识重点聚焦于从复杂系统的脆性角度出发的脆性支路辨识。针对系统稳定运行状况、受扰前后状态变化分别提出 3 类熵测度指标,以系统运行状态及网络结构为基础,多角度考虑潮流分布不均衡、潮流转移、设备运行极限、节点电压和相角等影响因素,

形成 4 种不同的脆性支路集合。为电网制定针对性的安全运行措施提供更准确的技术分类指导。新方法采用 2 阶段 3 类排序筛选操作有机结合,能更加准确和全面地筛选出电网脆性支路。

1 熵理论及电网脆性

从热力学角度,德国物理学家克劳修斯(R Clausius)最早提出熵概念,用于物质运动杂乱无章程度的描述,阐明了熵的大小只与所研究对象的起止状态有关,因此可以利用熵定义和熵变关系判断系统脆性演化的程度。当给定的系统存在多种运行状态,且状态 X_i 出现概率为 $P(X_i)$,那么系统熵值定义^[12]为

$$H = -C \sum_{i=1}^n P(X_i) \ln P(X_i) \quad (1)$$

式中 C 为常数, n 为系统可能出现的状态总数。系统熵值越大,说明其有序度越低;反之,系统的有序度越高,稳定程度越高。

关于复杂系统的脆性定义:一个复杂系统 S 中存在一个子系统 S_i ,由于它同其他子系统存在物质与信息交换,当其受内外因素干扰或攻击而产生崩溃时,会导致部分或子系统也发生崩溃,进而引起复杂系统整体崩溃。复杂系统具有的这种行为特性,称作复杂系统的脆性, S_i 为脆性源^[21]。当 S_i 指向电网支路,由于 S_i 退出而导致电网运行风险加剧甚至崩溃,这些支路可称为脆性支路。电力系统的脆性伴随系统的产生和发展过程,是系统固有的特征^[22]。

2 脆性支路辨识熵指标

辨识脆性支路是认识系统脆性的重要方面,对于研究电网故障及连锁性、制定有效的安控策略至关重要。

辨识脆性支路以潮流计算为基础,分初步筛选、深度筛选 2 个阶段进行。初筛阶段从静态潮流负载分配、支路开断潮流动态转移 2 个方面独立筛查电网脆性支路,分别对应提出负载潮流熵、支路开断熵 2 指标。深筛阶段针对初筛阶段 2 类指标辨识出的脆性支路不一致问题,提出加权综合熵指标,以避免对脆性支路的漏选。

2.1 负载潮流熵指标

支路负载率能反映单个支路的状态特征^[23-24],借助各支路负载率分布的统计分析,能反映系统的脆性程度。设定 k 为支路编号, ρ_k 表示支路 l_k 的负载率, U 是支路负载率分段后的等差常序列,

$U=[0,0.02,\dots,0.02r,\dots,0.02r_{\max}]$ ，本文差值取 $\Delta r=0.02$ 。序列中取 r_{\max} 为 75，可根据设备运行极限改变 r_{\max} 取值。根据 ρ_k 统计出位于 U 区间上的支路条数，由此可计算潮流熵如下：

$$H_r = -p_r \ln(p_r) \quad (2)$$

其中 p_r 为指向负载率区间 $(\rho_{r-1}, \rho_r]$ 的概率。每条支路对应一个 p_r 值，不同支路可能具有相同的 p_r 值。

H_r 一定程度上反映系统潮流分布情况，支路潮流熵较大时，系统受扰导致支路过载的概率较高。但是，某些潮流偏重或偏轻的支路故障后均会致使潮流熵偏大，显然后者不能正确反映出潮流熵的物理特性，因此有必要在潮流熵中区分潮流的轻重。本文对支路的有功功率值归一化后构造出潮流熵加权量，公式为

$$P'_k = \frac{P_k - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (3)$$

式中 P_k 为支路 l_k 的有功潮流值， P_{\max} 、 P_{\min} 分别为所有支路有功潮流的最大值和最小值。改进式(2)得到负载潮流熵为：

$$H_k^1 = -P'_k p_r \ln(p_r) \quad (k=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

改进新特性反映在：

1) 通过调节 r_{\max} 的取值，可调节不同电网的设备运行极限，电网设备运行极限越高， r_{\max} 取值越大。

2) 引入加权系数 P'_k ，区分重载支路和轻载支路导致熵值偏大的影响，能提高熵值大小反映潮流分布特性准确性。

2.2 支路开断熵指标

对文献[23]中开断转移熵改进，用于故障后电网潮流达新状态的转移平衡能力评估。

以电网加权拓扑结构为基础，确定支路传输能力的加权等效指标 S_k [25]。

$$S_k = |W_k P_k| \quad (k=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

其中： W_k 表示权重；为支路电抗值 x_k ； P_k 是支路 l_k 上有功功率； m 指支路条数。

式(5)采用了各节点电压标幺值等于 1 的简化条件，为反映节点电压对支路有功潮流的影响。利用下式 [26]：

$$P_k = P_{ij} = U_i U_j \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \quad (6)$$

$$x_k = x_{ij} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)带入到式(5)中得到：

$$S_k = U_i U_j |\theta_i - \theta_j| \quad (8)$$

式中 θ_i 、 θ_j 为节点 U_i 、 U_j 的电压相角值。

进一步，构造系统总加权等效传输比率，以表示全部支路传输功率情况，如下：

$$\lambda^t = \frac{1}{m} \sum_1^m \lambda_k = \frac{1}{m} \sum_1^m \left| \frac{1}{S_{\max}} U_i U_j |\theta_i - \theta_j| \right| \quad (9)$$

式中： $S_{\max}=\max(S_1, S_2, \dots, S_{k-1}, S_{k+1}, \dots, S_m)$ ， $\lambda_k=|S_k/S_{\max}|$ ， $\lambda_k \in [0,1]$ ，表达出支路输送功率相对大小，其值越大说明故障切除对系统冲击威胁程度越大，或相邻线故障后发生过载风险越大。

令支路开断后时刻为 t_1 ，由式(9)可计算得所有支路分别开断后潮流转移等效传输比向量 $(\lambda_1^t, \lambda_2^t, \dots, \lambda_m^t)$ 。设开断前时刻为 t_0 计算得到的系统等效传输比 λ^0 ，则各支路开断熵指标为

$$H_k^2 = (\lambda_k^t - \lambda^0) \ln(\lambda_k^t - \lambda^0) \quad (\lambda_k^t > \lambda^0, k=1,2,\dots,m) \quad (10)$$

支路开断熵指标新特征在于：

1) 考虑了支路由投运到停运两种状态的动态变化所引发的系统总等效传输比的改变。支路 H_k^2 越大，说明失去支路后系统运行不稳定性加剧。

2) 考虑支路两端电压幅值和相角对等效传输比的作用，提高了等效传输比计算熵值的精细度。

2.3 加权综合熵指标

计算 H_k^1 和 H_k^2 两类指标独立筛选出的脆性支路如表 1 所示。

分类	指标	
	H_k^1	H_k^2
高脆弱性线路集合	S_1	S_2
非高脆弱性线路集合	\tilde{S}_1	\tilde{S}_2

注： $L = S_1 \cup \tilde{S}_1 = S_2 \cup \tilde{S}_2$ (L 为考察线路集合)

高脆性支路在集合 S_1 和 S_2 指向的设备不可能完全一致。呈现两大类，一类是同时出现在集合 S_1 和 S_2 中，表明这些支路的静态和动态指标均表现出高脆性。另一类是不同时出现在两集合中，即 $S_1 - S_2 - S_1 \cap S_2$ ，这些支路的静态和动态脆性不一致。为了不漏选后一类高脆性支路，还需对其进行深度筛选，构造不同指标调节权重因子 α ，计算节 2.1 和 2.2 两指标归一化后的熵值 $H_k^{1'}$ 和 $H_k^{2'}$ ，加权求和得到评判综合熵指标：

$$H_k^3 = (1 - \alpha)H_k^{1'} + \alpha H_k^{2'} \quad (k=1,2,\dots,m) \quad (11)$$

式中 α 取值 0.5，表示负载潮流熵和支路开断熵在筛选脆性支路时拥有同等重要性。式(11)所提新指标特征在于综合考虑了静态、动态指标之间的平衡，当偏重考虑系统静态特征时，可减小 α 取值，

极端情况下 $\alpha=0$ 则忽略 $H_k^{2'}$ 影响；相反，当偏重考虑系统动态变化特征时，可增大 α 取值，极端情况下 $\alpha=1$ 则忽略 $H_k^{1'}$ 影响。

3 脆性支路筛选实现方法

如图 1 所示，实现节 2 方法，关键步骤为：

1) 确定初始方式，开展潮流计算，调整保证潮流结果收敛。按式(9)计算全网等效传输比 λ^0 。

2) 计算每条支路负载率，根据负载率分段计算支路概率，由式(2)(3)和(4)计算得到每条支路的负载潮流熵向量 $(H_1^1, H_2^1, \dots, H_m^1)$ 。

3) 分别开断各有效支路，再次计算电网潮流，当潮流不收敛或孤岛时，标定为固定脆性支路。当潮流收敛，但支路开断后导致电网其他元件严重过载，本文选取严重过载标准为负载率 1.5，标定支路为严重脆性设备。对上述两种情况之外的支路，按式(9)计算开断后的全网等效传输比向量 $(\lambda_1^1, \lambda_2^1, \dots, \lambda_n^1) (n \leq m)$ ，结合 λ^0 ，用式(10)计算出支路开断熵向量 $(H_1^2, H_2^2, \dots, H_n^2)$ 。

4) 初筛阶段：确定负载潮流熵阈值，针对向量 $(H_1^1, H_2^1, \dots, H_m^1)$ 排序，筛选出静态高脆性支路集合 S_1 ；确定支路开断熵阈值，针对向量

$(H_1^2, H_2^2, \dots, H_n^2)$ 排序，筛选出动态高脆性支路集合 S_2 ，对于出现在交集 $S_1 \cap S_2$ 中的支路，标定为严重脆性设备。对于严重脆性设备，计算各支路的加权综合熵值。

5) 深筛阶段：对于 $S_1 \cup S_2 - S_1 \cap S_2$ 结果集中支路，运用式(11)计算得到 $(H_1^3, H_2^3, \dots, H_n^3) (h \leq n)$ ，确定综合熵阈值并实施排序，标定出严重或高脆性设备。余下为可不考虑脆性的设备。

经过上述 2 阶段 3 类排序筛选后，电网内支路划分成 4 种类型的设备集如图 2 所示。

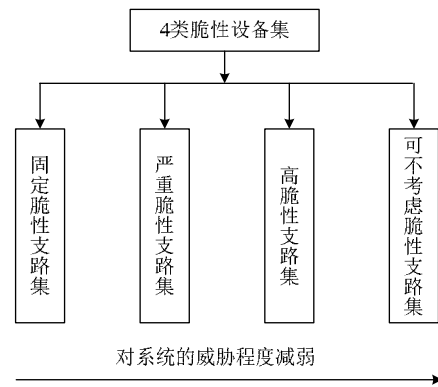


图 2 支路脆性程度示意图

Fig. 2 A sketch of the degree of branch vulnerability

前 3 类脆性设备集对系统运行威胁程度大，在电网安全分析及预警时，要对这些支路预想故障进行重点扫描。

4 算例分析

IEEE 10 机 39 节点系统网络图如图 3 所示。

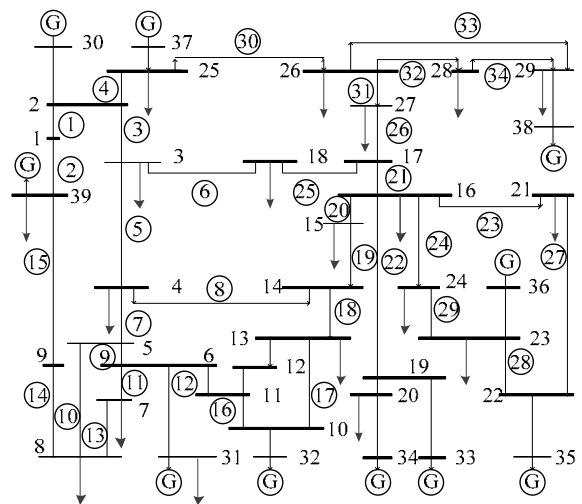


图 3 IEEE 39 节点系统接线图

Fig. 3 System diagram of IEEE 39 nodes

4.1 脆性支路筛选

调整图 3 网络中负荷，使负荷水平达到 100% 进行节 3 辨识过程计算。辨识过程中因断开导致系统潮流破坏的线路将其列为固定脆性支路，例如

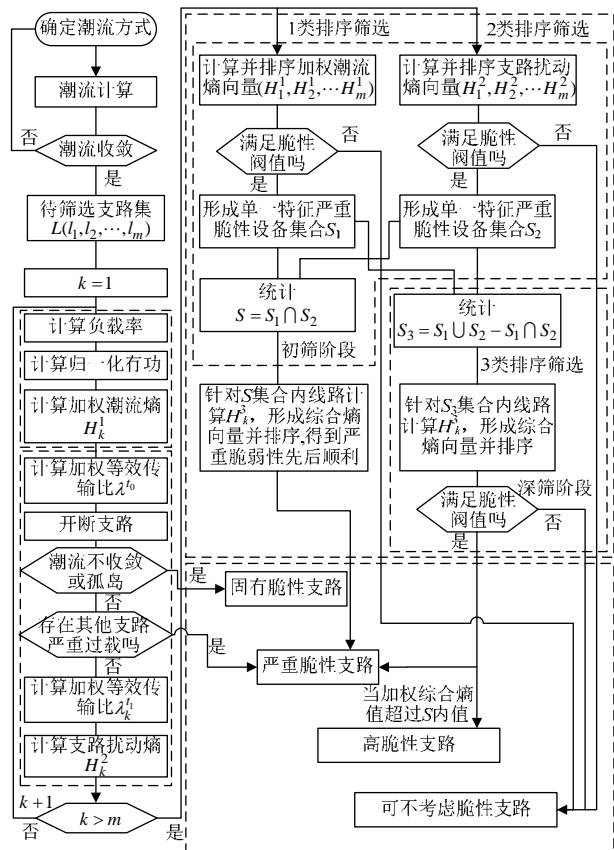


图 1 脆性支路识别过程

Fig. 1 Brittle branch identification process

19-20、6-31、29-38、10-32、2-30、19-33、25-37、20-34、23-36、22-35 等变压器线路以及普通线路16-19。剩余线路中因断开致使其他相关线路发生过载严重的设备，将其列为严重脆性支路，结果如表2所示。

对除固定脆性以及严重脆性线路外剩余支路计算负载潮流熵、支路开断熵并将所得结果进行排序分别得到筛选集 S_1 、 S_2 ，如表3所示。

序号	严重脆性		过载情况		
	设备集合	过载设备	负载率	过载设备	负载率
1	22-21	24-23	3.018	29-26	1.068
2	29-28	24-23	1.108	29-26	2.955
3	21-16	24-23	2.159	29-26	1.069
4	28-26	24-23	1.108	29-26	1.849
5	29-26	24-23	1.108	28-26	1.494

子筛选集 s_1	H_k^1 排序	负载潮流熵	子筛选集 s_2	H_k^2 排序	支路开断熵
11-6	2	0.026	16-15	2	0.161
3-2	3	0.025	27-26	3	0.140
7-6	4	0.023	11-6	4	0.118
16-15	5	0.022	25-2	5	0.116
8-5	6	0.017	17-16	6	0.090
14-4	7	0.0147	11-10	7	0.088
27-26	8	0.0143	7-6	8	0.087
11-10	9	0.0128	14-4	9	0.077
6-5	10	0.0125	24-16	10	0.070
14-13	11	0.0094	23-22	11	0.067
13-10	12	0.0078	6-5	12	0.063
25-2	13	0.0073	8-5	13	0.063

由负载潮流熵和支路开断熵交集选出的共同脆性支路开断后对系统冲击影响较大，由表3可知，该脆性支路集合为11-6、8-5、7-6、6-5、25-2、11-10、14-4、3-2、27-26、16-15，将此类设备列为严重脆性支路，对其计算加权综合熵确定其严重度顺序如表4所示。

对 S_1 、 S_2 交集余下的支路，由于负载潮流熵和支路开断熵指标筛选侧重点不同，一些支路对系统安全运行仍然具有潜在危险性，如支路24-23、13-10、14-13、17-16、24-16、23-22。计算其加权综合熵值，并根据熵值大小对相应线路进行排序，结果如表5所示。

通过对比表4排序结果和表5排序结果，不难发现通过计算加权综合熵筛选得到的严重脆性设备相较于高脆性设备，有严重程度更轻的支路，如支

支路	H_k^3 排序	加权综合熵指标
3-2	1	0.757
16-15	2	0.634
11-6	3	0.546
27-26	4	0.492
7-6	5	0.430
25-2	6	0.351
11-10	7	0.326
14-4	8	0.315
8-5	9	0.300
6-5	10	0.219

支路	H_k^3 排序	综合熵指标
24-23	1	0.500
17-16	2	0.262
24-16	3	0.151
23-22	4	0.143
14-13	5	0.134
13-10	6	0.114

路6-5和27-26计算所得熵值分别较支路17-16、24-23小。因此对于 S_1 、 S_2 交集余下支路开展深度筛选是必要的，能有效避免严重脆性设备的遗漏。本文将将这些特殊线路归类到严重脆性设备集中。

4.2 筛选方法适应性

通过调整系统不同负荷比例来验证辨识脆性支路方法的适应性。

考虑轻载、重载等多种情况，调整负荷水平为50%、70%、90%、110%等运行状态，分别计算负载潮流熵和支路开断熵值，并与100%负载率两类计算指标值，对比绘制曲线到图4、5。

通过对比图4和图5，可知在不同负荷水平运行方式下，支路开断熵和负载潮流熵两类指标值

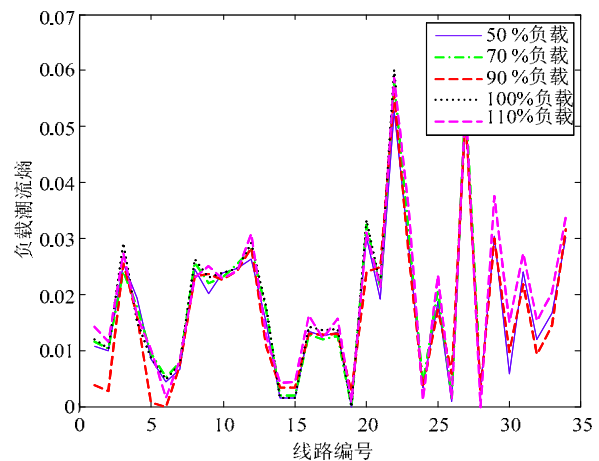


图4 不同负荷下的负载潮流熵
Fig. 4 Comparison of load flow entropy under different load levels

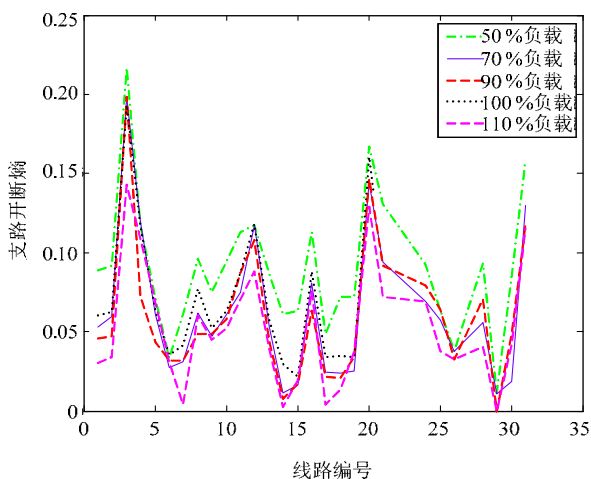


图 5 不同负荷下的支路开断熵

Fig. 5 Comparison of the branch outage entropy under different load levels

变化规律相似。不同支路的熵值相对关系不发生改变，所得到的脆性支路分类集合内的支路数及支路号，与节 4.1 所得结论一致。由此可知当研究系统负荷发生变化时，不需要对评价系统内支路脆性度的两类指标进行再次计算，直接可根据一次计算结果选择适当比例数量的支路进行重点关注，从而说明本方法在系统负荷发生变化时具有良好的适应性。

4.3 与其他辨识方法对比

由于不同文献中都选用 IEEE10 机 39 节点算例进行脆性支路辨识，从中选取几种有代表性的支路重要度评估法与本文方法结果进行对比，结果如表 6 所示，其中支路右上角“+”表示该线路在本文方法筛选过程中已被纳入到固定脆性支路或严重脆性支路集合中。

从表 6 看出采用本文方法筛选出脆性支路更全面。通过对比，本文筛选结果涵盖考虑有功分布的综合脆性指标法漏选的 8-5 和 7-6。通过功率介数法辨识得到的脆性支路与本文筛选的支路总数相同，但如果扣减本文作为固定脆性设备的发电机出口支路后，其筛选出的支路比本文少。剩余方法筛选出的支路总数上就比本文少。另外本文筛选出的高脆性及以上支路均出现在其他方法中，由此可知，本文辨识脆性支路的可行性和全面性。

将表 6 得到的结论映射到网络图 3 可知，根据熵值结果排序靠前的脆性支路 11-6、14-13、7-6、13-10、11-10、14-4、6-5 集中分布在系统网络图上左下角，所以有必要在实际调控运行时对该类支路重点监视并采取必要保护措施，以防系统中多条线路同时故障并退出运行造成电网失稳。

表 6 不同文献脆性支路筛选结果比较
Tab. 6 Comparison of brittle branch in different methods

排序	本文方法	功率介数 ^[8]	综合脆弱指标 ^[27]	综合介数 ^[19]	考虑运行状态 ^[28]	重要度评估法 ^[20]
1	3-2	32-10 ⁺	11-6	6-5	6-5	14-13
2	16-15	30-2 ⁺	24-23	3-2	16-15	22-21 ⁺
3	11-6	33-19 ⁺	13-10	19-16 ⁺	2-1	17-16
4	24-23	36-23 ⁺	22-21 ⁺	16-15	3-2	21-16 ⁺
5	27-26	22-21 ⁺	11-10	14-4	14-4	19-16 ⁺
6	7-6	31-6 ⁺	14-13	17-16	26-25	13-10
7	25-2	38-29 ⁺	14-14	26-25	8-5	16-15
8	11-10	24-23	27-26	25-2	25-2	15-2
9	14-4	3-2	21-16 ⁺	4-3	17-16	24-23
10	8-5	11-6	3-2	21-16 ⁺	22-21 ⁺	27-26
11	17-16	7-6	25-2	22-21 ⁺	14-13	
12	6-5	6-5	16-15	11-10		
13	24-16	11-10	6-5	8-5		
14	23-22	13-10	17-16	11-6		
15	14-13	21-16 ⁺	24-16	7-6		
16	13-10	8-5	23-22			

5 结论

本文基于 3 类熵指标构建了一套新的辨识脆性支路的方法，对潮流熵进行有功归一化加权避免了轻载支路导致熵值变大的问题，实现了支路的脆性排序更精细化区分，提高了基于静态运行状态识别脆性支路的准确性。考虑电压幅值和相角构建了支路开断熵指标，实现了支路开断后电网结构完整性、潮流收敛性及潮流转移分布均衡性的全面动态考察。针对电网支路负载潮流熵、支路开断熵向量计算筛选得出的 2 类集合差异，构造了含调节因子的综合熵指标，实现了 2 类集合交集支路的脆性区分排序，以及交集外剩余支路的脆性严重性辨别。3 类指标的应用将电网支路区分为固定脆性设备、严重脆性设备、高脆性设备、可不考虑脆性设备等 4 个类别。

采用新的辨识原理对 IEEE10 机 39 节点系统开展的算例研究、多负载率适应性考察以及与现有的识别思路对比结果说明，本文方法弥补了现有思路的不足，能实现辨识静态指标及动态指标的有机结合，有效协调，脆性支路分类精细，计算准确，辨识全面，辨识结果稳定性好。进一步，利用辨识得出的固定、严重及高脆性支路生成的预想故障集，直接应用于暂态安全评估计算，可为电力系统风险防范决策提供更具针对性的指导。

参考文献

[1] XIAO Hongda, YEH E M. Cascading link failure in the power grid: a percolation-based analysis[C]/IEEE International Conference on Communications, 2011. Kyoto, Japan: IEEE, 2011: 1-6.
[2] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西欧电网“11.4”大停电事故的启示[J].

- 电网技术, 2007, 31(1): 25-31 .
Gao Xiang, Zhuang Kanqin, Sun Yong . Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4 ,2006[J] . Power System Technology , 2007 , 31(1) : 25-31(in Chinese) .
- [3] Guo Chena ,Zhao Yangdong ,Hill D J .Attack structural vulnerability of power grids : a hybrid approach based on complex networks[J] . Physica A , 2010 , 389(3) : 595-603 .
- [4] 沈瑞寒, 刘涤尘, 赵洁, 等 . 基于加权网络模型的电网潮流转移下危险线路识别[J] . 电网技术, 2012, 36(5) : 245-250 .
Shen Ruihan, Liu Dichen, Zhao Jie, et al . Weighted network model based recognition of dangerous lines under power flow transferring[J] . Power System Technology , 2012 , 36(5) : 245-250(in Chinese) .
- [5] 刘文颖, 王佳明, 谢昶, 等 . 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J] . 中国电机工程学报, 2012, 32(31) : 142-149 .
Liu Wenying , Wang Jiaming , Xie Chang . Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J] . Proceedings of the CSEE , 2012 , 32(31) : 142-149(in Chinese) .
- [6] 曾珂, 李华强, 曾梦婕, 等 . 考虑改进潮流冲击熵的电力系统融冰预防控制[J] . 电网技术, 2015, 39(2) : 582-586 .
Zeng Ke ,Li Huaqiang ,Zeng Mengjie et al . Power system ice-melting preventive control considering improved transfer entropy of power flow[J] . Power System Technology , 2015 , 39(2) : 582-586(in Chinese) .
- [7] 张娟, 童晓阳, 姜建伟 . 基于渗流和风险理论的电力系统连锁故障分析[J] . 电力系统自动化, 2017, 41(5) : 46-52 .
Zhang Juan ,Tong Xiaoyang , Jiang Jianwei . Analysis on power system cascading failure based on percolation and risk theory[J] . Automation of Electric Power Systems , 2017 , 41(5) : 46-52(in Chinese) .
- [8] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等 . 基于功率介数的电网关键环节辨识[J] . 电网技术, 2014, 38(7) : 1907-1913 .
Wang Tao , Gao Chengbin , Gu Xueping , et al . Power betweenness based identification of power grid critical links[J] . Power System Technology , 2014 , 38(7) : 1907-1913(in Chinese) .
- [9] 何俊, 庞松龄, 禹冰, 等 . 基于容量介数指标的电网脆弱支路识别[J] . 电力系统保护与控制, 2013, 41(8) : 30-35 .
He Jun ,Pang Songling ,Yu Bing ,et al . Vulnerable line identification of power grid based on capacity betweenness index[J] . Power System Protection and Control , 2013 , 41(8) : 30-35(in Chinese) .
- [10] 王仁伟, 张友刚, 杨阳, 等 . 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J] . 电力系统保护与控制, 2014, 42(20) : 1-6 .
Wang Renwei ,Zhang Yougang ,Yang Yang , et al . Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J] . Power System Protection and Control , 2014 , 42(20) : 1-6(in Chinese) .
- [11] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等 . 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱支路评估及其在四川主干电网中的应用[J] . 电力自动化设备, 2013, 33(10) : 40-46 .
Li Yong , Liu Junyong , Liu Xiaoyu , et al . Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J] . Electric Power Automation Equipment , 2013 , 33(10) : 40-46(in Chinese) .
- [12] 丁明, 过奕, 张晶晶 . 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识[J] . 电力系统自动化, 2013, 37(17) : 52-57 .
Ding Ming , Guo Yi , Zhang Jingjing . Vulnerability identification for cascading failures of complex power grid based on effect risk entropy[J] . Automation Of Electric Power Systems , 2013 , 37(17) : 52-57(in Chinese) .
- [13] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等 . 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J] . 电网技术, 2017, 41(7) : 2340-2346 .
Zhang Hongli , Li Huaqiang , Yang Zhiya , et al . Identification of vulnerable line based on the theil entropy of flow growth rate[J] . Power System Technology , 2017 , 41(7) : 2340-2346(in Chinese) .
- [14] 吕歆瑶, 李华强, 郑国, 等 . 基于综合脆性关联度的连锁故障预测与冲击辨识[J] . 电力自动化设备, 2015, 35(12) : 116-125 .
Lü Xinyao , Li Hhuaqiang , Zheng Guo , et al . Cascading failure forecast and impact identification based on comprehensive brittleness relevance[J] . Electric Power Automation Equipment , 2015 , 35(12) : 116-125(in Chinese) .
- [15] 陈晓刚, 孙可, 曹一家 . 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J] . 电工技术学报, 2007, 22(10) : 138-144 .
Chen Xiaogang , Sun Ke , Cao Yijia . Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J] . Transactions of China Electrotechnical Society , 2007 , 22(10) : 138-144(in Chinese) .
- [16] 肖盛, 张建华 . 基于小世界拓扑模型的电网脆弱性评估[J] . 电网技术, 2010, 34(8) : 64-68 .
Xiao Sheng , Zhang Jianhua . Assessment of power grid vulnerability based on small-world topological model[J] . Power System Technology , 2010 , 34(8) : 64-68(in Chinese) .
- [17] 丁明, 韩平平 . 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J] . 电力系统自动化, 2006, 30(8) : 7-10, 40 .
Ding Ming , Han Pingping . Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J] . Automation of Electric Power Systems , 2006 , 30(8) : 7-10, 40(in Chinese) .
- [18] 丁明, 韩平平 . 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J] . 中国电机工程学报, 2008, 28(10) : 20-25 .
Ding Ming , Han Pingping . Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J] . Proceedings of the CSEE , 2008 , 28(10) : 20-25(in Chinese) .
- [19] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等 . 基于综合介数的电网脆弱支路辨识[J] . 电力系统保护与控制, 2016, 44(2) : 116-121 .
Liu Xiaoli , Mao Yi , Liang Shan , et al . Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J] , Power System Protection and Control , 2016 , 44(2) : 116-121(in Chinese) .
- [20] 张才斌, 游昊, 李本瑜 . 计及拓扑结构和运行状态的支路重要度评估方法[J] . 电力系统自动化, 2017, 41(7) : 15-20 .
Zhang Caibin , You Hao , Li Benyu , et al . Assessment method of branch importance considering topological structure and operation state[J] . Automation of Electric Power Systems , 2017 , 41(7) : 15-20(in Chinese) .
- [21] 哈肯 . 高等协同学[M] . 郭治安, 译 . 北京 : 科学出版社, 1989 .
- [22] 荣盘祥, 王继尧, 金鸿章 . 复杂系统的脆性与系统演化分析[J] . 电机与控制学报, 2004, 8(2) : 142-144, 201 .
Rong Panxiang , Wang Jiyao , Jin Hongzhang . The analysis of system evolution based on complex system brittleness[J] . Electric Machines And Control , 2004 , 8(2) : 142-144, 201(in Chinese) .
- [23] 宋嫩文 . 基于多源信息融合的电网暂态稳定风险评估[D] . 北京 : 中国农业大学, 2016 .
- [24] 杨林涛, 杨洪耕, 刘亚磊 . 基于联络线簇能量传输模式的互联

区域电网脆弱性评估[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 142-148.
Yang Lintao, Yang Honggeng, Liu Yalei. Vulnerability evaluation of district power grid based on tie-line groups energy transmission mode[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(6): 142-148(in Chinese).

- [25] 李丽华. 基于线路指标熵识别电网脆弱环节的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [26] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 6.
- [27] 徐岩, 鄧静. 基于加权潮流熵的电网故障传播脆弱线路识别[J]. 现代电力, 2016, 33(3): 88-94.
Xu Yan, Zhi Jing. Identification of vulnerable lines for fault propagation in power grid based on the weighted power flow entropy[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(3): 88-94(in Chinese).
- [28] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
Cai Ye, Cao Yijia, Li Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2124-2131(in Chinese).



李美成

收稿日期: 2018-08-10。

作者简介:

李美成(1973), 男, 教授, 博士生导师, 从事可再生能源与清洁能源研究、电力系统分析等, E-mail: mcli@ncepu.edu.cn;

梅文明(1983), 男, 高级工程师, 博士研究生, 通信作者, 从事可再生能源与清洁能源研究、电力系统分析等, E-mail: wenmingmei@sina.com;

刘永强(1984), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 从事电力系统分析、电力自动化等, E-mail: 18903581508@163.com;

张凌康(1986), 男, 工程师, 研究生, 从事可再生能源与清洁能源研究、电力系统分析等, E-mail: 13830167123@139.com;

宋墩文(1971), 男, 教授级高级工程师, 从事电力系统分析、电力系统自动化研究等, E-mail: songdw@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李兰欣)