

基于综合薄弱度的电网节点脆弱性评估

于 群¹, 冯安强¹, 贺 庆², 张 敏¹, 曹 娜¹, 易 俊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 100192)

Node Vulnerability Assessment of Power Grids Based on Comprehensive Weak Degree

YU Qun¹, FENG Anqiang¹, HE Qing², ZHANG Min¹, CAO Na¹, YI Jun²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

摘 要: 为辨识电网运行中的薄弱节点, 给出了统筹考虑电网各元件负载率分布的均匀程度、系统负载率和损失负荷相对值的综合薄弱度辨识方法。利用 IEEE39 节点系统仿真, 将所得结果与现有研究方法进行比较, 验证了综合薄弱度指标的有效性。最后对甘肃 750kV 及 330kV 电压等级电网进行仿真计算, 结果表明, 基于综合薄弱度指标得到的薄弱节点能较好地反映节点在电网中的薄弱程度, 并且符合甘肃电网的实际运行情况。以此作为参考, 电网的运行及调度人员就可以对薄弱节点进行重点监控, 提前制定防御措施, 以提高系统的稳定性。

关键词: 整体性指标; 系统负载率; 损失负荷相对值; 综合薄弱度; 薄弱节点

Abstract: In order to identify weak nodes in power grid, a comprehensive weak degree identification method that considers loading rate distribution uniformity of each component of power grid, system loading rate and load loss relative value is given in this paper. Taking IEEE 39-bus system as a simulation example, the results verify the validity of the comprehensive weak degree index in comparison with the existing research methods. In the end, through applying this method to 750kV and 330kV Gansu power grid, the results show that the comprehensive weak degree index can find weak nodes well, which is close to the actual operation characteristics of Gansu power grid. On this basis, the operation and dispatching personnel of the power grid can focus on monitoring weak nodes, and put forward corresponding defensive measures to improve the reliability of the system.

Keywords: integrated index; system loading rate; load loss

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2016EEM13);
国家电网公司科技项目

relative value; comprehensive weak degree; weak nodes

0 引 言

随着现代社会的发展, 电网逐渐实现了大规模互联, 在提高系统运行效率的同时, 也增加了小范围故障引发大面积停电事故的可能性^[1-3]。节点作为系统中功率传输的重要一部分, 若因人力因素或自然灾害导致节点退出系统运行, 将会引起网络连通性、元件传输能力等^[4-5]的下降。其中某些薄弱节点的故障往往会起到助推作用, 并最终导致全系统大面积瘫痪。因此, 定位电网中的薄弱节点并加强监控, 对预防大面积停电事故发生、提高系统的安全稳定性具有重要的意义。

目前, 电网薄弱节点的识别方法主要为结构脆弱性评估和状态脆弱性评估。基于复杂网络理论的结构脆弱性评估中, 文献 [6] 定义介数指标, 节点介数越高, 在网络中越重要。文献 [7] 利用节点收缩的方式计算节点的重要度, 网络凝聚度越大, 该节点越重要。文献 [8] 充分考虑节点在网络中的位置信息和与相邻节点的作用, 定义节点脆弱性贡献指标来评估节点的脆弱程度。文献 [9-10] 在此基础上做了改进, 将线路的电抗作为连接边权值, 基于有权网络模型重新计算介数和凝聚度, 但仍然假设潮流按最短路径流通, 与电网的实际运行情况不太相符。在状态脆弱性评估中, 文献 [11] 定义节点电压指标, 但不同运行环境下的电压裕度值不同, 系统的稳定性分析结果有误差。文献 [12] 采用能量函数法, 从系统中负荷状态出发

建立能量函数表达式，并基于能量信息得到状态脆弱因子。为了使辨识结果更加准确，文献 [13 - 14] 综合考虑电网的运行状态和结构评估节点的脆弱性，能对辨识结果进行一定程度的修正。

然而，不论是结构脆弱性评估还是状态脆弱性评估，这些研究方法都忽略了节点负荷的影响。而在复杂电力系统中，负荷作为系统的重要变量之一，与大停电事故的发生有着密切联系。所以，在辨识电网的薄弱节点的时候，系统的损失负荷是一个不可忽略的影响因素。针对以上研究现状和分析，本文首先根据电力系统自组织临界特性，从电网的宏观特性出发定义电网薄弱节点辨识的整体性指标，以系统中各元件负载率在双对数坐标图中分布曲线的斜率定量分析电网发生大规模停电事故的概率。然后结合系统负载率和损失负荷相对值，给出综合薄弱度辨识指标。以 IEEE39 系统为例，验证了整体性指标和综合薄弱度指标应用到实际电网中的有效和可行性。最后对甘肃电网仿真，结果表明，综合薄弱度指标能够较好地寻找电网的薄弱节点。相关结果可以为预防连锁事故提供参考。

1 薄弱节点辨识指标

1.1 整体性指标

电力系统在其运行的过程中，由于系统中元件之间的非线性作用，会使系统自发地运行到一种临界状态，即自组织临界状态 (Self-organized Criticality, 简称 SOC)。当电力系统处于自组织临界状态时，任何微小的局部扰动就有可能引发大停电事故^[15]。所以对电网来说，越能够激发系统进入自组织临界状态的元件，就越薄弱。

文献 [16 - 17] 在研究电力系统的自组织临界性时发现“当某部分发生故障后，系统是否处于自组织临界状态与此时系统元件负载率在双对数坐标图中分布曲线的斜率绝对值有关，分布曲线的斜率绝对值越大，电力系统发生大规模停电事故的概率就越大”。因此，可以将节点退出运行后负载率在双对数坐标图中分布曲线的斜率作为一个系统的整体性指标来辨识电网的薄弱节点。

定义元件的负载率 l 为

$$l_i = \frac{F_i}{F_{i,\max}} \quad (1)$$

式中： F_i 是元件 i 上流过的有功潮流； $F_{i,\max}$ 为元

件 i 上流过的最大允许传输容量。

当电网节点 i 故障后，在双对数坐标图中绘出系统仍在运行元件负载率的分布曲线，利用最小二乘法对各数据点进行线性回归，得到回归直线的斜率 k_i ，同时对回归方程进行显著性检验，如果回归方程有效，则定义电网薄弱节点辨识的整体性指标 R 为

$$R_i = |k_i| \quad (2)$$

显然，如果电网节点 i 故障后，整体性指标值 R_i 越大，系统进入自组织临界状态的可能性就越大，即电网发生大停电事故的概率越大，因此该节点就越薄弱。

1.2 系统负载率

系统中所有元件负载率分布的均匀程度是关系电力系统是否进入自组织临界状态的重要因素，当两个不同的节点故障，计算得到的整体性指标一样时，这两个节点的薄弱程度就无法进行评估。

根据文献 [18 - 19] 的研究发现，当电网中所有线路上的负载率分布的均匀程度不变时，电力系统发生大停电事故的概率大小与系统负载率成正比关系。系统的负载率越大，电网发生大停电事故的概率就越大。所以，可以将系统负载率应用到薄弱节点的辨识中。

系统负载率 L_s 为

$$L_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n |F_{ji}|}{\sum_{j=1}^n |F_{j,\max}|} \quad (3)$$

式中： F_{ji} 是节点 i 故障时，元件 j 上流过的有功潮流； n 为节点 i 退出运行后系统剩余元件总数。

显然， L_{si} 的值越大，说明节点 i 故障后系统中元件的负载率变化越大，对系统的影响越严重。

1.3 损失负荷相对值

电网正常运行时，每个元件都带有一定的初始负荷，当其故障时，就会打破原系统的潮流平衡并导致负荷的重新分配。此时，停运元件上的负荷就会加载到其他元件上，如果这些原来正常运行的元件不能承担这些负荷，就会引起新一轮的负荷重新分配，这将引发连锁性过负荷，并最终导致大规模停电事故^[20]。所以，可以用节点故障后的停电规模来衡量电网的故障程度。

当电力系统中的某节点故障后，自身及连带退出运行部分会损失一部分负荷；同时电网为维持输

电平衡,也必须切掉一部分负荷。这两部分即为系统的总损失负荷值。本文采用损失负荷相对值 M 来描述节点 i 退出运行后的停电规模。

$$T_{\text{load},i} = T_{1i} + T_{2i} \quad (4)$$

$$M_i = \frac{T_{\text{load},i}}{TOT_{\text{load}}} \quad (5)$$

式中: $T_{\text{load},i}$ 是节点 i 故障后的系统总损失负荷数; T_{1i} 为节点 i 故障后,节点 i 及连带退出运行节点所带的负荷数; T_{2i} 为节点退出运行后电网为维持输电平衡切掉的负荷数; TOT_{load} 为系统的总负荷数。

可见, M 值越大,系统的损失越严重,停电规模越大,故障对系统的影响越大。

1.4 综合薄弱度

结合整体性指标、系统负载率以及损失负荷相对值,定义节点 i 的综合薄弱度指标为

$$Z_i = N(R_i) \cdot N(L_{si}) \cdot N(M_i) \quad (6)$$

式中: $N()$ 表示对函数进行归一化处理,它可以消除指标量纲不同而引起的数据失真。

整体性指标是通过分析系统中所有元件负载率分布的均匀程度来判断系统进入自组织状态的可能性,分布越不均匀,进入自组织状态的可能性越大,电网发生大停电事故的概率越大;系统的负载率表征的是系统整体潮流水平偏离正常系统的程度, L_{si} 的值越大,说明节点 i 退出后系统元件的过载越严重;损失负荷相对值表示的是系统的停电规模,停电规模越大,故障对电网的影响越严重。

综合薄弱度指标既考虑元件负载率分布的均匀程度和负载率的变化程度,又考虑故障后的损失负荷数,3个指标互补,全面反映了节点故障后对系统的影响程度,分析结果能更全面,寻找的电网薄弱节点更准确。

2 薄弱节点评估

基于上述对薄弱节点辨识指标的分析,仿真实验采用 Matlab R2011b 软件编程实现,得到评估电网薄弱节点的流程如图 1 所示。

步骤 1: 读入电网原始数据,令 $i=1$ 。

步骤 2: 断开节点 i 和与节点 i 相连线路,统计掉出系统的负荷数 T_{1i} 。

步骤 3: 重新计算电网潮流。

步骤 4: 计算仍在运行的各元件的负载率,得

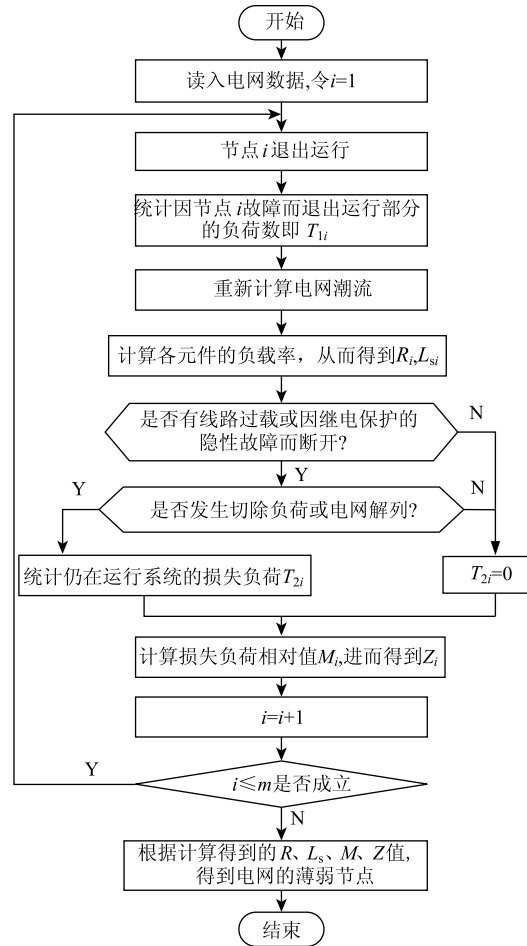


图 1 薄弱节点辨识流程图

到整体性指标值 R_i 和系统的负载率 L_{si} 。

步骤 5: 判断是否有线路过载或因隐性故障模型断开。如果有,进入步骤 6,否则 $T_{2i}=0$ 。

步骤 6: 判断是否发生切除负荷或电网解列,是则进入步骤 7,否则 $T_{2i}=0$ 。

步骤 7: 统计仍在运行系统为维持电网平衡而切掉的负荷数 T_{2i} 。

步骤 8: 计算损失负荷相对值 M_i 。

步骤 9: 令 $i=i+1$,判断 $i \leq m$ (m 为系统节点总数)是否成立。如果成立,转步骤 2;否则进入步骤 10。

步骤 10: 将计算得到的各个 R 、 L_s 、 M 、 Z 值,从大到小排序,得到电网的薄弱节点。

3 IEEE39 节点系统分析

对 IEEE39 节点系统进行仿真测试,该系统共有 10 台发电机、19 个负荷、46 条支路,其系统接

线如图 2 所示。

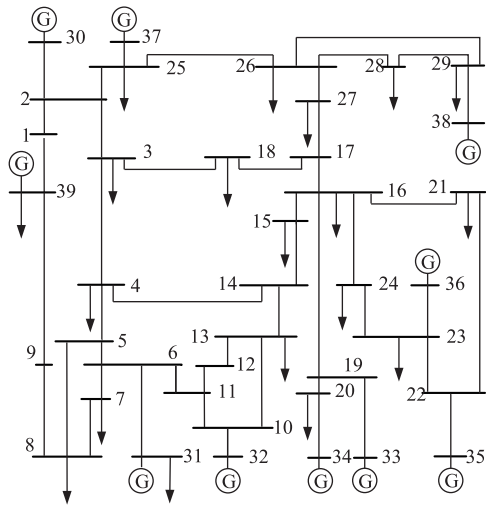


图 2 IEEE39 系统接线图

3.1 整体性指标结果分析

根据文中 1.1 节中对整体性指标的定义，仿真 39 节点系统得到电网中的薄弱节点如表 1 所示。

表 1 基于整体性指标的电网薄弱节点

排序	节点编号	整体性指标
1	29	0.926 3
2	22	0.896 3
3	21	0.837 2
4	10	0.821 0
5	6	0.792 1
6	16	0.769 2
7	3	0.739 2
8	20	0.714 1
9	19	0.701 2
10	2	0.695 5

节点 29、22、10、6、20、2 位于发电机的出口处，节点 16、19 位于发电机 33 和 34 功率外送的重要传输通道上，这类节点故障会使发电机功率无法向外输出，主网功率将出现大部分缺额。节点 21、3 是带负荷节点，其开断会导致电网损失负荷数增加。在理论上分析，这些节点在电网中也是相当重要的，所以从电网的宏观特性出发定义的整体性指标对电网薄弱节点的辨识符合电网的实际运行情况，证明了整体性指标辨识电网薄弱节点的有效性。

3.2 综合薄弱度结果分析

综合薄弱度指标辨识的节点、归一化后的各指

标值如表 2 所示。

表 2 薄弱节点辨识结果

排序	节点编号	综合薄弱度	$N(R)$	$N(L_s)$	$N(M)$
1	22	0.512 7	0.967 4	0.530 0	1.000 0
2	6	0.233 1	0.854 0	1.000 0	0.273 0
3	10	0.215 6	0.885 4	0.243 5	1.000 0
4	29	0.197 8	1.000 0	0.561 2	0.352 6
5	14	0.140 4	0.588 1	0.595 1	0.401 1
6	2	0.137 7	0.748 9	0.882 8	0.208 3
7	25	0.115 9	0.584 2	0.479 0	0.414 1
8	13	0.113 3	0.488 4	0.578 1	0.401 1
9	15	0.112 9	0.636 7	0.488 1	0.363 2
10	28	0.090 3	0.468 3	0.474 0	0.406 8

从表 2 可以看出，基于整体性指标、系统负载率和损失负荷相对值仿真得到的节点的薄弱程度值不尽相同。这主要是各个指标在评估节点故障对电力系统的影响时，侧重点不同，所得结果也不可能完全相同。

在使用整体性指标进行辨识时，节点 6 排在第 5 位，而在综合薄弱度指标的辨识结果中排在第 2 位。这是因为节点 6 退出系统运行时，系统的损失负荷数严重，由于 3 个指标互补，使节点 6 的薄弱程度提高。而在实际电力系统中，当节点 6 故障时，发电机 31 将不能向主网供电，由于发电机 31 的发电量较大，所以系统内的潮流变化大，因此节点 6 在电网中的薄弱程度高是合理的。基于以上分析，综合考虑多种因素的辨识结果更加准确。

综合薄弱度指标的 3 个脆弱因子都是从电力系统的运行状态出发评估节点的脆弱性，为了进一步证明辨识出的薄弱节点在电网拓扑结构中也具有相同的脆弱性，本文采用不同方式的攻击方法，通过对比故障仿真时的网络平均效能值(如图 3)来评估综合薄弱度指标的有效性。

方法 1：依次移除随机选取的 10 个节点。

方法 2：依次移除综合薄弱度最高的 10 个节点。

从图 3 可以看出，移除电力系统中的高薄弱度节点时，网络的平均效能下降快，当移除 10 个节点后，网络的平均效能下降到 30%左右，说明这些节点在电网中比较关键，一旦退出系统运行会严重影响电网的连通性。

应用综合薄弱度指标辨识得到的电网薄弱节点

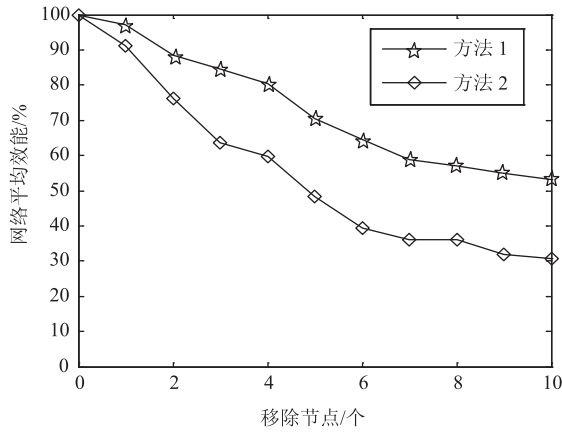


图3 不同方法下的网络平均效能对比(一)

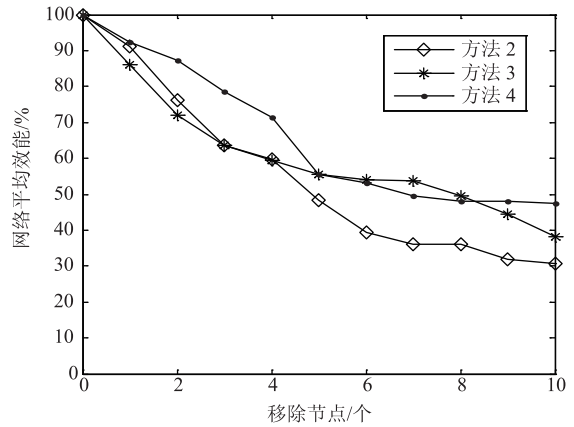


图4 不同方法下的网络平均效能对比(二)

与现有研究方法——功率介数^[14]、潮流熵^[21]、度指标^[6]进行排序和对比,如表3所示。

表3 薄弱节点辨识结果比较

排序	综合薄弱度	功率介数	潮流熵	度
1	22	10	8	16
2	6	6	7	6
3	10	22	5	2
4	29	7	6	26
5	14	8	13	22
6	2	11	11	10
7	25	31	14	29
8	13	23	9	14
9	15	24	12	19
10	28	5	10	25

从表3中可以看出,基于综合薄弱度指标得到的电网薄弱节点与综合考虑结构脆弱性和运行状态的功率介数得到的电网薄弱节点相似度高,前5位中有3个节点是相同的。同时,与度指标、潮流熵辨识的薄弱节点集合有4~7个交集元素。从而证明了综合薄弱度指标辨识薄弱节点的有效性和可行性。

为了更加直观地说明文中方法在电网薄弱节点辨识中的优势,计算依次移除功率介数值、潮流熵最高的10个节点(分别记为方法3、4)后的网络平均效能,如图4所示。

通过对比不同方法下的电网的平均效能值可以发现,使用方法2移除电力系统的节点后,网络平均效能的下降坡度最大。此外,当移除10个薄弱节点后方法2的网络平均效能也是最低。从整体上

来说,本文方法比文献[14]、[21]确定的薄弱节点更准确。

4 甘肃电网实例分析

本文采用甘肃电网2015年夏季大负荷运行方式,选择甘肃电网内750kV、330kV电压等级的节点作为薄弱节点的辨识对象,其地理接线图如图5所示。

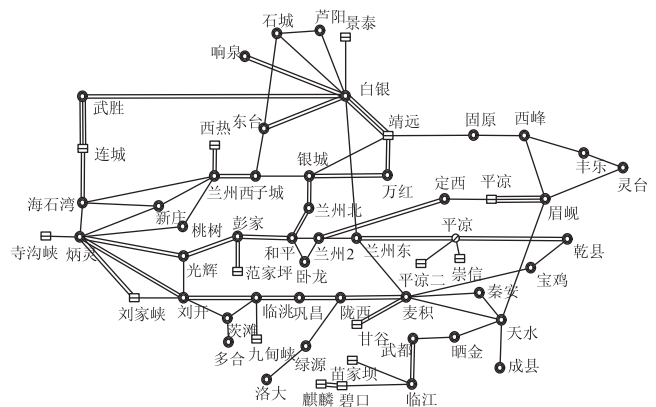


图5 甘肃电网局部地理接线图

对甘肃电网进行仿真计算,得到各个节点退出运行时整体性指标值、系统负载率指标值、损失负荷相对值,得到排在前10位的甘肃电网薄弱节点分别如表4、表5、表6所示。

对比表4和表5可以发现,在两种指标下得到的电网薄弱节点发生了变化。这主要是两种指标虽然都是围绕负载率,但是对负载率进行处理的方式不同。两者在一定程度上是互补关系,将它们结合起来,能更好地定量计算电力系统发生大面积停电

事故的概率，从而得到电网的薄弱节点。

表 4 基于整体性指标的薄弱节点

排序	母线名	整体性指标值 R
1	武胜	0.920 2
2	白银	0.846 1
3	麦积	0.650 5
4	兰州东	0.612 3
5	天水	0.599 9
6	兰州 2	0.559 5
7	连城	0.530 0
8	平凉	0.528 2
9	定西	0.484 8
10	眉岷	0.469 9

表 5 基于系统负载率指标的薄弱节点

排序	母线名	系统负载率 L_s
1	武胜	0.900 9
2	白银	0.830 5
3	麦积	0.805 3
4	刘开	0.744 9
5	兰州 2	0.731 8
6	天水	0.731 6
7	靖远	0.726 3
8	成县	0.722 6
9	兰州东	0.699 5
10	兰州西	0.699 1

表 6 基于损失负荷相对值的薄弱节点

排序	母线名	损失负荷相对值 M
1	白银	0.658 2
2	兰州东	0.471 8
3	武胜	0.450 1
4	靖远	0.220 5
5	新庄	0.202 3
6	平凉	0.169 4
7	兰州西	0.149 6
8	兰州 2	0.140 0
9	定西	0.139 6
10	眉岷	0.120 1

根据前面计算的 3 种指标值，将其归一化后计算综合薄弱度，得到甘肃电网的薄弱节点如表 7 所示。

表 7 综合薄弱度指标下的薄弱节点

排序	母线名	电压等级	综合薄弱度 Z
1	白银	750	0.846 0
2	武胜	750	0.683 9
3	兰州东	750	0.103 5
4	刘开	330	0.059 7
5	麦积	750	0.050 8
6	兰州 2	330	0.042 8
7	靖远	330	0.037 4
8	兰州西	330	0.018 4
9	平凉	330	0.017 9
10	定西	330	0.017 8

综合薄弱度指标下辨识的薄弱节点排序发生了变化，但都在整体性指标、系统负载率和损失负荷相对值指标的辨识结果范围内。

按照传统观点，750kV 电压等级节点应该比 330kV 电压等级节点的薄弱程度高。但从表 7 中可以看出，有 330kV 电压等级节点的薄弱程度排在了 750kV 电压等级节点的前面，所以在辨识电网薄弱节点的时候不能只考虑电压等级，还应考虑节点在电力系统中的位置。

白银、武胜承担着疆电外送、西电东送等多项输电任务，兰州东、麦积是南电北送高压输电通道的重要连接点，刘开是刘家峡水电站发出功率的必经之路，兰州 2、兰州西、靖远、平凉都直接与发电机相连。它们在甘肃电网中都起着重要作用，一旦故障会严重破坏电网的稳定性。由此可见，基于综合薄弱度指标得到的薄弱节点符合甘肃电网的实际运行情况，能较好地反映节点在电网中的薄弱程度。

5 结 论

本文基于电力系统自组织临界特性提出了电网薄弱节点辨识的整体性指标，从电网的整体动态行为衡量故障的严重程度。考虑到整体性指标相对比较单一，辨识结果可能不够全面，结合系统负载率和损失负荷相对值，给出了综合薄弱度辨识指标。利用 IEEE39 节点系统仿真，所得结果与现有方法进行比较，验证了指标的正确性。最后对甘肃电网进行仿真，结果表明综合薄弱度指标能更全面地发现电网的薄弱节点，符合电网的实际运行情况。以

此为依据,一旦发现有薄弱节点故障,就应立即采取紧急控制措施消除仍在运行元件的过载现象,以免事故的扩大化。

参 考 文 献

- [1] US-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [EB/OL]. <http://www.ferc.gov>.
- [2] 印永华,郭剑波,赵建军,等.美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):8-11.
- [3] 甘德强,胡江溢,韩祯祥.2003年国际若干停电事故思考[J].电力系统自动化,2004,28(3):1-5.
- [4] 曹一家,陈晓钢,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5.
- [5] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. A topological analysis of the Italian electric power grid [J]. *Physica A*, 2004, 338(1): 92-97.
- [6] 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.
- [7] 刘艳,顾雪平.基于节点重要度评价的骨架网络重构[J].中国电机工程学报,2007,27(10):20-26.
- [8] 丁明,过羿,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):52-56.
- [9] 刘耀年,术茜,康科飞,等.基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J].电力系统保护与控制,2011,39(23):89-92.
- [10] 谢琼瑶,邓长虹,赵红生,等.基于有权网络模型的电力网节点重要度评估[J].电力系统自动化,2009,33(4):21-24.
- [11] 申永涛.电力系统脆弱性节点的筛选方法研究[D].北京:华北电力大学,2014:7-8.
- [12] 郑武,李华强,刘慧,等.基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):79-82.
- [13] 徐行,李华强,赵祥云,等.基于运行状态和网络结构的节点综合脆弱性评估[J].电网技术,2014,38(3):731-735.
- [14] 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):1907-1912.
- [15] 梅生伟,薛安成,张雪敏.电力系统自组织临界特性与大电网安全[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [16] 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,2012:25-58.
- [17] 于群,曹娜,郭剑波.负载率对电力系统自组织临界状态的影响分析[J].电力系统自动化,2012,36(1):24-27.
- [18] 易俊,周孝信,肖逾男.用连锁故障搜索算法判别系统的自组织临界状态[J].中国电机工程学报,2007,27(25):1-5.
- [19] 赵炜炜.电网大停电分析模型及预防应急体系研究[D].北京:华北电力大学,2009:36-37.
- [20] 曹一家,刘美君,丁理杰.大电网安全性评估的系统复杂性理论研究[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(1):1-8.
- [21] 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.

收稿日期:2016-03-31

作者简介:

于群(1970—),男,博士,教授,研究方向为电力系统安全分析,电力系统继电保护,E-mail: yuqun_70@163.com;

冯安强(1991—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统安全运行与控制、电力系统自动化等,E-mail: fafighting@163.com;

贺庆(1977—),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析,E-mail: heqing@epri.sgcc.com.cn;

张敏(1989—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统安全运行与控制,E-mail: 532292903@qq.com;

曹娜(1971—),女,博士,副教授,研究方向为电力系统运行与控制等,E-mail: caona_2006@163.com;

易俊(1977—),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析,E-mail: yjun@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑:林海文)