计及网络传导能力与抗干扰能力的节点综合脆弱评估模型

雷　成,刘俊勇,魏震波,刘友波,高艺文,苟　竞
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:网络元件受扰动后所表现出的脆弱程度是自身抗干扰能力与网络传导能力的综合表现。从元件间关联性出发,在熵权度数的基础上,考虑系统潮流分布情况和全局功率传输特性,构建以线路潮流与电气介数乘积为边权的改进熵权度数。同时结合节点负荷水平,提出网络传导能力模型,由此定义节点的网络重要性;根据系统安全裕度和元件关联作用,提出考虑线路过负荷以及节点失压危险的元件抗干扰能力模型,由此定义节点的故障风险性。采用综合脆弱评估模型对计及网络传导能力与抗干扰能力的节点脆弱性进行仿真计算,结果表明:所提模型在辨识元件脆弱时精准度更高,能更有效地反映系统节点在网络中的重要程度与抗扰程度,验证了模型的合理性和有效性。

关键词:电力系统;网络传导能力;抗干扰能力;脆弱性;评估;风险;安全;模型
中图分类号:TM 711　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.025

0　引言

近年来,国内外发生了多次大停电事故。各停电事故的源发性故障主要来源于线路开断[1]或母线跳闸[2]。相比线路开断而言,由母线跳闸引发的大停电事故持续时间(从源发性故障发生到大停电形成的时间)较短,破坏性更强,并且难以实施有效的紧急控制措施。因此,快速、准确地评估系统节点脆弱性,对提高电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

脆弱性作为安全性与可靠性的扩展,逐渐成为电力系统分析新视角,但目前还没有统一定义[3]。就研究对象而言,可分为线路脆弱性和节点脆弱性两大类。前者更关注热稳定极限下各输电线路状态,尤其是开断后剩余线路所承担的运行风险[4];后者侧重研究故障前节点在网络能量传导过程中的重要作用,以及在遭受某种扰动之后不能维持正常运行的可能趋势,包含网络传导能力与抗干扰能力 2 个方面。文献[5]采用复杂网络理论,将电力系统简化为一个无向无权网络,通过故障模拟,提出利用节点/支路介数指标辨识电力系统结构上的脆弱环节。文献[6-7]将线路电抗作为权重引入加权拓扑模型,分析电网小世界特性,揭示连锁故障发生机理,并指出了电网中存在的关键环节。文献[8]通过推导,将传输路径加权长度和转换为线路的加权长度和,提出平均传输距离指标,反映出了网架结构对有功传输的便利性,是一种后果脆弱性评估方法。文献[9-10]利用节点收缩后的网络凝聚度来评估节点在有权网络模型中的重要性,综合考虑了节点在拓扑结构中的分布特性以及电网的电气特性。上述文献侧重元件在拓扑结构中的传导能力,并未充分反映元件状态和网络约束信息。文献[11]提出了基于 P、Q 网分解的电网有向加权拓扑模型,并在此基础上应用复杂网络理论分析电网单元脆弱强度。此模型在一定程度上反映出了电网自身的物理特性及运行特性。文献[3]进一步给出了电网状态脆弱性与结构脆弱性的准确定义及评估模型,提出结合两脆弱因子形成单元综合脆弱度的评估思想。该文章建立的评估模型充分考虑了元件状态的网络特性,且能根据不同脆弱评估目的与结果选取不同运行状态变量,但忽略了实际电网中各元件之间存在的较为紧密的电气关联性与拓扑连接关系。文献[12]通过对连锁故障发展过程的总结,发现随着故障程度的加深,电网出现由元件关联作用决定的连锁反应。文献[13]在已有研究基础上采用准稳态功率分布因子并结合复杂网络理论,建立系统复杂网络特征模型。该模型考虑了更丰富的电网物理特征,能反映拓扑连接关系和系统实际潮流分布。因此,节点脆弱性分析应不仅取决于元件自身特性,同时也依赖相连线路特征。

综上考虑与研究,本文将从元件间关联性出发,结合复杂网络基本测度以及网络约束,研究节点在网络参数变化时的静态脆弱性,以期建立更能准确反映元件的网络重要性与运行风险性的脆弱评估模型。

1　网络传导能力模型

网络传导能力是指依附于电网结构,发电机通

收稿日期:2013-05-28;**修回日期**:2014-04-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977059);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011SCU11063);四川省科技厅产业发展重大关键技术项目(2011GZ0225)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977059),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2011SCU11063) and the Key Program of Sichuan Science & Technology Department(2011GZ0225)

过一定传导方式和路径将功率传送给负荷节点的过程中网络所传输和承载的功率。电网结构作为功率传导的媒介,影响节点在拓扑结构中的关键位置。潮流作为电网承载对象,其流经各个节点的大小直接反映出功率传输对节点的利用情况。由于电力系统具有强非线性和时变性[4],潮流分布并非时空均匀。同时,地理位置重要程度的不同造就了电网结构的不均匀性。这两者的不均匀性使得节点的网络传导能力有明显的差异。

本文从熵权度数的概念及含义[14]出发,结合系统的非均匀特性,构建改进边权的熵权度数:

$$w_{ij}=\frac{P_{ij}B_{ij}}{\sum_j P_{ij}B_{ij}} \tag{1}$$

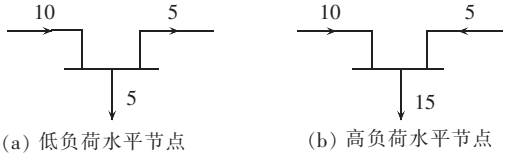
$$e_i=\left(1-\sum_j w_{ij}\log w_{ij}\right)\sum_j P_{ij}B_{ij} \tag{2}$$

$$B_{ij}=\sum_{m\in G,n\in L}\left|I_{ij}(m,n)\right| \tag{3}$$

其中,B_{ij} 为线路 ij 的电气介数[15-16];G、L 分别为发电机、负荷节点集;$I_{ij}(m,n)$为在发电–负荷节点对(m,n)之间注入单位电流源后,在线路 ij 上引起的电流;P_{ij} 为线路 ij 当前状态下传输的有功功率大小。B_{ij} 作为网络中所有发电–负荷节点对的 $I_{ij}(m,n)$累积和,反映了线路 ij 在网络传输单位功率过程中所起的作用;$P_{ij}B_{ij}$ 作为线路 ij 的改进边权,反映了线路在当前运行状态下对全网潮流传播的贡献。

式(2)中等号右边第 2 项反映出节点所连线路的总连接强度(权重),第 1 项则反映出各线路的强度分布情况。相比于传统的纯拓扑结构度数指标或者以电抗或功率加权的度数指标,改进边权的熵权度数 e_i 有效反映了影响节点重要性的 3 个主要因素:一是连接该节点的线路数;二是相连线路的总连接强度;三是线路的强度分布情况。同时,电气介数作为一个全局几何量,通过加入到线路权重,在一定程度上克服了度数指标局部性描述的缺点。

由改进边权的熵权度数定义可知,图 1(a)、(b)中节点的熵权度数分别为 $e_a=19.15$、$e_b=19.15$,这里假定各线路电气介数均相同且取为 1,图中数据指负荷量(单位 MW)。考虑到图 1(a)和图 1(b)的负荷水平差异,显然,负荷水平高的节点发生故障后对系统的影响更大,但在熵权度数的定义中并未考虑到这一点。因此,进一步改进得节点网络传导能力



(a) 低负荷水平节点　　(b) 高负荷水平节点

图 1 节点拓扑结构

Fig.1 Structure of node topology

模型:

$$I_i=e_i\left(1+\frac{P_i}{S}\right) \tag{4}$$

其中,P_i 为节点 i 所带负荷量;S 为系统正常运行时的总负荷量。

假设图 1 中的总负荷量为 20 MW,由式(4)可得 $e_a=23.94$,$e_b=33.51$,结果更能反映电网实际情况。

2　抗干扰能力模型

元件抗干扰能力是指元件受关联元件(线路)故障的影响程度以及不能维持电压稳定的可能趋势[17]。在评估节点脆弱性时须考虑节点所处区域负荷增长对节点抗干扰能力的影响。负荷包括有功负荷和无功负荷,有功负荷的增长将导致线路潮流的不断上升,甚至逼近线路传输极限,引起过负荷危险;无功负荷的增长将极大地削弱无功源不足区域的无功支撑能力,易引发失压危险。同时,系统各元件不是独立运行而是通过潮流等电气量以及拓扑连接关系相互关联在一起,由过负荷引起的线路故障可通过元件间的这种关联性触发连结节点故障,造成连锁反应。

因此,结合故障关联性,构建考虑过负荷[18]与失压危险[19]的元件抗干扰能力模型:

$$\alpha_{ij}=\frac{P_{ij}}{K_i} \tag{5}$$

$$R_i=\frac{\sum_{j\in N_i}\alpha_{ij}\rho_{ij}}{\Delta U_i} \tag{6}$$

$$\rho_{ij}=\begin{cases}\dfrac{P_{ij}-P_{ij}^{\max}}{P_{ij}^{\max}} & P_{ij}>P_{ij}^{\max}\\ 0 & P_{ij}\leqslant P_{ij}^{\max}\end{cases} \tag{7}$$

$$\Delta U_i=\frac{\left|U_{i\mathrm{cr}}-U_i\right|}{\left|U_{i\mathrm{cr}}-U_{i0}\right|} \tag{8}$$

其中,α_{ij} 为线路 ij 对节点 i 的过负荷影响因子;P_{ij} 为流经线路 ij 的有功功率;K_i 为节点 i 的度数;N_i 为与节点 i 相连的节点集合;ρ_{ij} 表示线路过负荷程度;$P_{ij}^{\max}$ 为线路 ij 的极限传输容量;ΔU_i 为电压裕度,表示节点 i 可能发生的失压危险;$U_{i\mathrm{cr}}$ 为节点 i 的临界电压值;U_{i0} 为节点 i 的初始电压值;U_i 为节点 i 在负荷增长时的电压值。

式(5)的物理意义为:α_{ij} 表示与节点 i 相连线路 ij 的过负荷危害对节点安全运行的影响程度;P_{ij} 量化线路 ij 在节点通行能力及活跃程度中所贡献的作用;K_i 反映节点 i 在拓扑模型中的静态结构特征。假设两线路在各自相连节点中所作贡献相同,当与节点度较大节点相连的线路发生故障或扰动时,其故障或扰动的功率或能量可以沿多条未故障线路进行分摊传递,对节点的冲击相对分散;而具有较低度数的节点的传输通道单一,线路故障或扰动产生的功率或能量冲击相对集中,易引发节点故障[20]。过负荷影响

因子指标在一定程度上反映了线路与连结节点间的关联程度。

式(6)中分子为节点邻近线路的过负荷程度对节点安全运行的影响，R_i反映系统参数变化时电网的安全运行水平，体现节点在不同运行状态下抵抗故障或扰动的能力。R_i越大，节点越易受外界干扰影响，抗干扰能力越弱。

3 节点综合脆弱评估模型

3.1 归一化处理

为了消除前文提出的网络传导能力和抗干扰能力之间不同量纲的影响，分别对其进行归一化处理[8]。网络传导能力指标归一化后的结果$\tilde{I}_i$为：

$$\tilde{I}_i=\frac{I_i-\min\limits_i\{I_i\}}{\max\limits_i\{I_i\}-\min\limits_i\{I_i\}} \tag{9}$$

其中，i为系统中的任意节点。由于式(9)属于效益型归一化模型，I_i越大，其归一化后的值$\tilde{I}_i$也越大。当$I_i=\max\limits_i\{I_i\}$时，$\tilde{I}_i=1$；当$I_i=\min\limits_i\{I_i\}$时，$\tilde{I}_i=0$。可知，$\tilde{I}_i$的取值范围为[0,1]。元件抗干扰能力指标可通过同样的方式进行归一化处理。

3.2 综合脆弱评估模型

从前文分析可知，网络传导能力综合考虑了电网的结构特征、功率传输特性、潮流分布以及负荷水平等影响节点重要性的因素，较全面地刻画出了节点对电能的通行能力、承载能力以及在网络中的活跃程度，映射出了节点退出系统运行时系统所受的影响程度，避开了后果脆弱性指标需进行故障模拟的问题；抗干扰能力从安全裕度和故障关联性的角度考察系统在遭受外界干扰或故障后元件状态不断恶化，并逐渐逼近临界状态的特性以及系统各元件间逐渐增强的关联作用，反映出元件发生故障的可能性。抗干扰能力弱的元件除自身易受外界干扰的冲击外，还容易受到邻近元件故障的连锁影响，因此，发生故障的概率较高。而实际系统中运行状态差、易发生故障的元件不一定是造成影响最严重的；而造成影响最严重的往往又不是易发生故障的[3]。所以单一地从网络传导能力或抗干扰能力考察节点脆弱性势必存在不足。因此，本文提出结合网络传导能力和抗干扰能力的节点综合脆弱评估模型：

$$\Lambda_i=\tilde{I}_i\tilde{R}_i \tag{10}$$

其中，$\tilde{I}_i$表示节点i在电能传输过程中的重要性，间接反映出了其退出运行后对系统造成的严重程度；$\tilde{R}_i$表示节点i抵御外界干扰或故障的能力大小，反映出了节点发生故障的可能性。

因此，节点综合脆弱评估指标Λ_i的物理意义为：节点i受扰动后安全裕度越低，与邻近元件关联性越强，且退出运行后对系统的冲击越大，则节点i越脆弱。

4 算例分析

本文分别采用IEEE 39节点和IEEE 118节点系统[21]进行算例分析。

4.1 IEEE 39节点系统

IEEE 39节点系统的拓扑图如图2所示。

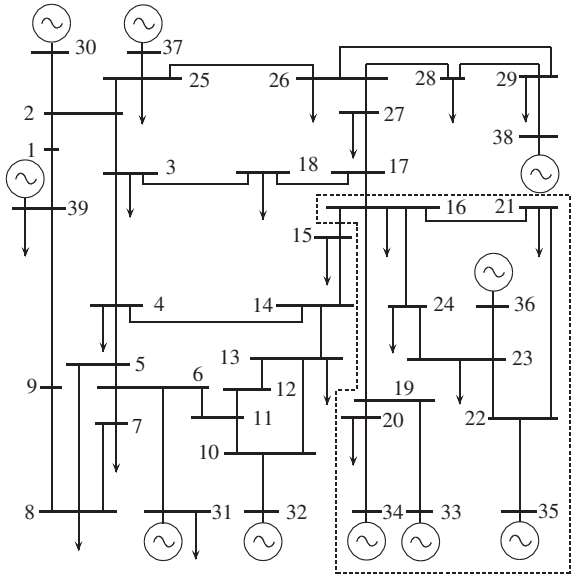
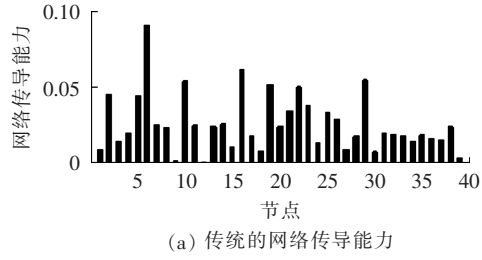


图2 IEEE 39节点系统

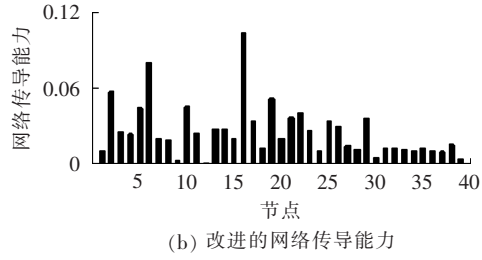
Fig.2 IEEE 39-bus system

4.1.1 基态下的节点脆弱性分析

分别计算各节点在基态下的网络传导能力并与传统的网络传导能力[14]作对比，其标准化的结果如图3所示。大部分节点的网络传导能力在0.03以下，只有少数节点的网络传导能力非常大，这部分节点对系统功率传输有着关键性作用。



(a) 传统的网络传导能力



(b) 改进的网络传导能力

图3 基态下节点网络传导能力对比

Fig.3 Comparison of network transmission ability between nodes in elementary condition

从图 3 中可发现在传统网络传导能力中显得重要的节点在改进网络传导能力中也重要,说明了改进模型辨识结果的合理性。同时,部分节点的重要程度在不同模型中有一定的差异,较明显的是节点 6 和 16,主要由于改进模型在传统的基础上进一步考虑了影响节点重要性的 2 个重要因素:反映整个网络输送能力的电气介数和负荷水平。节点 6 相连线路的总潮流和平均潮流均高于节点 16,说明节点 6 在局部功率传输中更重要,然后从全局输电特性考虑,节点 16 相连线路的电气介数平均值远高于节点 6,反映了节点 16 对全网电能输送的重要贡献。此外,节点 16 还带有较重的负载。可以看到节点 16 若从系统退出运行,不仅直接导致所带负荷的切除,而且将造成图 2 虚线框中供电区与系统解列,导致系统功率不平衡,由此可能引发系统崩溃。因此,改进模型的评估结果更符合实际情况。

节点的重要性能在一定程度上反映节点的脆弱性,但不能完全说明节点的脆弱性。若重要节点本身抵抗干扰的能力很强,很难出现故障,其脆弱性就无法表现出来。因此,需进一步计算节点的抗干扰能力。正常运行情况下,IEEE 39 节点系统并无过负荷线路,为了模拟系统状态趋紧时的情形,将线路传输极限缩减为原来的一半,仿真结果如表 1 所示,列出了抗干扰能力较弱的前 10 个节点。然后,根据得到的网络传导能力与抗干扰能力,计算节点综合脆弱值,结果如表 2 所示。

对比图 3(b)与表 1 可以发现,节点的网络传导能力排序与抗干扰能力并不完全一致,其中节点 5、23 排序有较大变化。节点 5 是发电机 31、32 向负荷节点 4、8 供电的主要连接点,担当着重要电能传输任务,属于重要节点。但节点 5 有较强的抗干扰能力,

表 1 IEEE 39 节点系统的节点抗干扰能力

Tab.1 Node anti-interference ability of IEEE 39-bus system

节点	抗干扰能力	节点	抗干扰能力
22	180.15	23	71.151
19	175.22	16	57.524
29	132.30	11	49.469
21	128.29	25	38.165
10	119.53	20	35.835

表 2 脆弱节点辨识结果对比

Tab.2 Comparison of vulnerable node identification

排序	节点连接度数[4]	节点综合脆弱指标
1	6	19
2	16	22
3	29	16
4	10	10
5	19	29
6	22	21
7	20	6
8	23	23
9	21	2
10	2	25

一般不易发生故障。相比节点 5 而言,节点 23 抵抗干扰的能力要弱得多,主要体现在 2 个方面:①相连线路负载较重,节点 23 相连的 3 条线路中,线路 23–24 潮流达到原线路容量的 59%,线路 23–36 潮流达到 62%;②节点负荷水平较高,节点 5 不带任何负荷,而节点 23 带有较重的无功负荷,受扰后易产生失压危险。所以节点 23 在抗干扰能力排序中名次比较靠前。由此也说明了节点抗干扰能力能比较准确地反映出节点当前安全状况的好坏以及发生故障的可能性。

从表 2 可看出,节点综合脆弱指标辨识出的脆弱节点不仅是结构上和功率传输中较重要的节点,同时也是安全裕度不足、与邻近元件关联作用较强、易发生故障的节点,如节点 19、22。相比节点连接度数识别出的重要节点(如节点 16、6)而言,运行状态差、易发生故障的重要节点才是运行人员需要重点监控的对象。

4.1.2　负荷增长下的节点脆弱性分析

为说明节点综合脆弱指标能根据系统参数变化进行相应调整,分析节点负荷分别按 5%、10%、15% 比例增长时的节点脆弱值,结果如表 3 所示,仅列出排序靠前的 5 个节点,并与连接度数指标作对比。

由表 3 可知,随着负荷的增长,各节点综合脆弱值总体上呈增长趋势。节点 16、6 作为系统最重要的 2 个枢纽节点,处于网络拓扑中的重要位置,负荷增长造成越来越多的节点连接线路处于重载状态,以至于降低了节点抵抗干扰的能力。节点 19、22、10、

表 3 负荷增长时节点综合脆弱指标与连接度数

Tab.3 Integrative vulnerability index and connection degree of node when load increases

排序	综合脆弱指标						连接度数					
	5%		10%		15%		5%		10%		15%	
	节点	数值	节点	数值	节点	数值	节点	数值	节点	数值	节点	数值
1	19	0.479	19	0.473	19	0.459	6	0.088	6	0.086	6	0.083
2	22	0.380	16	0.396	16	0.453	16	0.062	16	0.064	16	0.066
3	16	0.345	22	0.368	22	0.349	29	0.053	10	0.053	10	0.053
4	10	0.295	10	0.294	10	0.285	10	0.053	29	0.053	29	0.052
5	21	0.262	21	0.271	21	0.271	19	0.051	19	0.051	19	0.051

29都是发电机功率外送的出口节点,节点21是发电机节点与负荷节点间的重要连接点,在负荷水平不断上升的过程中,这些节点都承受着越来越大的功率输送压力以及越来越严峻的安全运行形势。这说明了节点综合脆弱指标能根据系统参数的改变快速调整节点的脆弱度。

4.2 IEEE 118节点系统

首先,通过网络传导能力对比说明改进模型对重要节点辨识的准确性,如图4所示。两曲线走势总体大致相同,但改进模型通过融入电气介数和负荷水平,有效放大了节点在系统全局中的重要性,弥补了传统模型偏重局部特性的缺陷,如节点38、30、65。

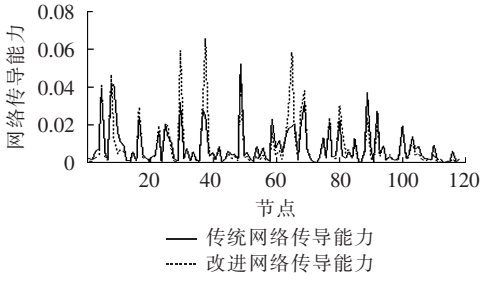


图4 IEEE 118节点系统网络传导能力对比(Ⅰ)
Fig.4 Comparison of network transmission ability of IEEE 118-bus power system, part Ⅰ

图5为改进模型与复杂网络经典测度指标的对比。从图中可发现,节点38、30、65的电气介数在系统中是非常高的,介数值越高的节点对整个网络能量输送的影响越大,进一步反映了这些节点的全局特性较显著。此外,改进模型对局部特性突出且全局影响力较大的节点也能准确地识别出来,如节点49。

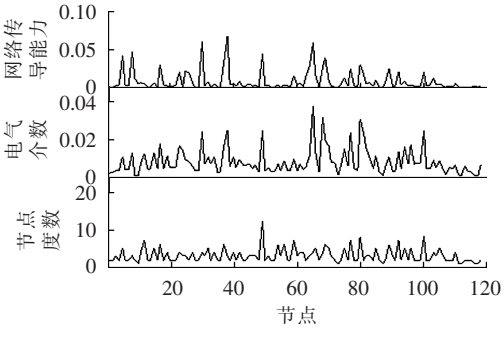


图5 IEEE 118节点系统网络传导能力对比(Ⅱ)
Fig.5 Comparison of network transmission ability of IEEE 118-bus power system, part Ⅱ

进一步,对比图3和图4可以发现:改进模型对IEEE 39节点系统中节点全局重要性的放大作用并不明显,改进模型中排序靠前的3个节点的重要程度平均减小为传统模型的33.9%;而对IEEE 118节点系统中节点全局重要性的放大作用则非常明显,改进模型中靠前的3个节点的重要程度则平均放大了1.525倍。这是由于小系统所含元件数较少,元件的局部特性与全局特性区分并不明显,而大系统拥有成百上千个元件,元件的区域特征并不能有效反映其在全网中的作用。因此,改进网络传导能力相对传统模型更能适应大系统对重要节点识别的需求。

图6所示为综合评估模型下的系统节点脆弱性。可发现仅极少数节点的脆弱性较突出,如节点8、9、38、30、5、10、65,这些节点既是网络中的重要节点,又是安全状况较差的节点。

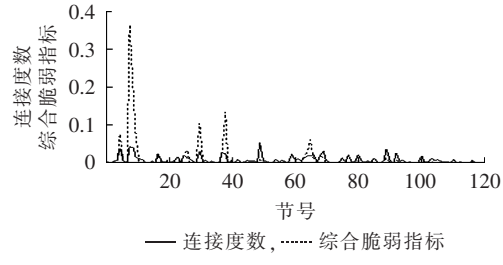


图6 IEEE 118节点系统综合脆弱指标对比
Fig.6 Comparison of integrative vulnerability indices among nodes of IEEE 118-bus power system

对比节点综合脆弱指标对IEEE 39节点与IEEE 118节点系统的辨识结果可以发现:综合脆弱指标对IEEE 118节点系统中节点脆弱性的量化结果中,脆弱值在0.01以上的节点仅占系统总节点的14%;而在IEEE 39节点系统中,脆弱值在0.01以上的节点占系统总节点的51%。原因在于:节点数较少的系统正常运行时潮流较高,又由于所含元件少,导致各元件承担的功率传输任务较重,安全状况普遍较差;而节点数较多的系统正常运行时,有较大部分元件处于轻载,安全裕度较大,抗干扰能力指标可以快速地将这部分节点剔除,仅保留极少数安全状态差的节点,提高了脆弱节点的辨识效率。因此,兼顾节点网络传导能力和抗干扰能力的综合脆弱评估模型,能更准确、快速地辨识出节点数较多的复杂系统中对系统影响较大且安全状态差的脆弱节点。

5 结论

本文提出的计及网络传导能力与抗干扰能力的节点综合脆弱性评估模型,不仅克服了传统节点评估模型偏重局部特性的缺陷,同时兼顾了网络约束和元件关联作用对抗干扰能力的影响,能有效评估节点在网络中的重要程度与抗扰程度,准确反映网络参数变化对系统的影响。更重要的是,仿真结果表明所提模型不但对节点数较少系统有很好的辨识效果,而且也能适应较大系统的脆弱辨识要求,进一步提升了评估模型的适用性,有利于工程实现。

参考文献:

[1] 何大愚. 一年以后对美加"8.14"大停电事故的反思[J]. 电网技术,2004,28(21):1-5.

HE Dayu. Rethinking over '8.14' US-Canada blackout after one year[J]. Power System Technology,2004,28(21):1-5.

[2] 林伟芳,孙华东,汤涌,等. 巴西"11·10"大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化,2010,34(7):1-5.
LIN Weifang,SUN Huadong,TANG Yong,et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil Power Grid on November 10,2009[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(7):1-5.

[3] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):11-14,55.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. A new integrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):11-14,55.

[4] 余兴祥,刘友波,罗辉,等. 考虑潮流转移结构特征的输电线路脆弱度在线评估[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(4):80-87.
YU Xingxiang,LIU Youbo,LUO Hui,et al. On-line assessment for transmission line vulnerability with structure characteristics of power flow transfer considering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(4):80-87.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辩识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5.
CAO Yijia,CHEN Xiaogang,SUN Ke. Identification of vulnerability lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):1-5.

[8] 倪向萍,梅生伟,张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):1-5.
NI Xiangping,MEI Shengwei,ZHANG Xuemin. Transmission lines vulnerability assessment based on complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):1-5.

[9] 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):20-27.
LIU Yan,GU Xueping. Node importance assessment based skeleton network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(10):20-27.

[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.
XIE Qiongyao,DENG Changhong,ZHAO Hongsheng,et al. Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(4):21-24.

[11] 魏震波,刘俊勇,李俊,等. 基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(24):19-22,29.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,LI Jun,et al. Vulnerability analysis of electric power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition[J]. Power System Protection and Control,2010,38(24):19-22,29.

[12] 朱旭凯,刘文颖,杨以涵,等. 电网连锁故障演化机理与博弈预防[J]. 电力系统自动化,2008,32(5):29-33.
ZHU Xukai,LIU Wenying,YANG Yihan,et al. Evolution mechanism and preventing strategies for cascading failure[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(5):29-33.

[13] 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 systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):12-17,77.

[14] BOMPARD E,NAPOLI R,XUE Fei. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection,2009,2(1):5-12.

[15] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):33-39.
XU Lin,WANG Xiuli,WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):33-39.

[16] 张向亮,吕飞鹏,李运坤,等. 基于保护重要度的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(10):90-93.
ZHANG Xiangliang,LÜ Feipeng,LI Yunkun,et al. A method for selecting a Minimum Break Point Set(MBPS) from multi-MBPS with the same cardinal number based on evaluation of relay protection importance[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(10):90-93.

[17] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 电力系统脆弱性理论研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):1-6.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. Power system vulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):1-6.

[18] 魏震波,刘俊勇,朱觅,等. 基于网络数字化挖掘的电网拓扑结构辨识[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):12-17.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Mi,et al. Identification of power topological structure based on network data mining[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(4):12-17.

[19] 马静,王希,王增平. 基于线路运行介数的过负荷脆弱性评估[J]. 电网技术,2012,36(6):47-50.
MA Jing,WANG Xi,WANG Zengping. Operation betweenness based assessment on overload vulnerability[J]. Power System Technology,2012,36(6):47-50.

[20] 李杨,刘俊勇,朱国俊,等. 计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):10-14.
LI Yang,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. Nodes vulnerability assessment to power grid based on action security margin[J]. Power System Protection and Control,2010,38(8):10-14.

[21] 梅生伟,薛安成,张学敏. 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,2009:183,281-284.

作者简介:

雷　成

雷　成(1987-),男,湖北孝感人,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性与电力系统脆弱性(**E-mail**:leicheng823@163.com);

刘俊勇(1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统稳定与控制、电力系统可靠性分析、电力系统脆弱性、电力市场、电力系统可视化等方面的研究工作。

(下转第 156 页 continued on page 156)

Online risk assessment based on real-time evaluation model of transmission line for static security of power system

ZHU Yihua[1,2], LUO Yi[1], DUAN Tao[1], SHI Lin[1], CHEN Jianjun[1], XIE Rui[1], LI Xiaolu[3], XIONG Weibin[2], LI Mao[2]

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Southern Power Grid Company, Guangzhou 510623, China; 3. Alstom Company, Shanghai 201114, China)

Abstract: A method of online risk assessment for the static security of power system is proposed, which establishes a real-time assessment model of transmission line with the consideration of meteorological factors, calculates the real-time fault probability of transmission line according to the established model and applies the probabilistic power flow to obtain the established risk indexes. A method of real-time fault screening and ranking is proposed to reduce the scale of computation. Comparative analysis is carried out between New England 10-generator 39-bus system with and without random transmission line faults, which shows that the proposed method assesses the risk level of power system truly in real time.

Key words: electric power systems; power transmission; models; probabilistic power flow; real-time fault screening and ranking; static security; risk assessment

(上接第 149 页 continued from page 149)

Integrative evaluation model of node vulnerability considering network transmission ability and anti-interference ability

LEI Cheng, LIU Junyong, WEI Zhenbo, LIU Youbo, GAO Yiwen, GOU Jing

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The vulnerability degree of network component in perturbation is shown by its anti-interference ability and network transmission ability. According to the correlation among components, an improved entropy degree is constructed, which takes the product of line power flow and electric betweenness as its edge weight and considers the system power flow distribution and global power transmission characteristics. A network transmission ability model is proposed to define the network importance of a node based on its load level and a component anti-interference ability model considering the line overload and node voltage loss risk is proposed to define the failure risk of a node according to the system security margin and the correlations among components. An integrative evaluation model is applied to calculate the node vulnerability considering the network transmission ability and anti-interference ability and the simulative results show that, the proposed model identifies the vulnerable components more precisely and reflects the importance degree and anti-interference degree of system nodes more effectively, verifying its rationality and effectiveness.

Key words: electric power systems; network transmission ability; anti-interference ability; vulnerability; evaluation; risks; security; models