

引用格式:Chen Wei,Duan Xin,Pei Xiping,*et al.*Identification of Key Links in Power System Based on Electrical Betweenness[J].Journal of Gansu Sciences,2017,29(4):48-53.[陈伟,段芯,裴喜平,等.基于电气介数的电网关键环节辨识[J].甘肃科学学报,2017,29(4):48-53.]
doi:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2017.04.011.

基于电气介数的电网关键环节辨识

陈伟¹,段芯¹,裴喜平¹,马彦宏²,刘福潮²

(1.兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050;

2.国网甘肃省电力公司 电力科学研究院,甘肃 兰州 730050)

摘要 在综合考虑电网拓扑结构、功率输送关系和系统运行状态的基础上,提出了一种基于电气介数的电网关键环节的辨识方法,克服了以往加权介数假设“发电-负荷”节点间潮流只沿最短路径流动的缺点。根据线路和节点在系统结构上的差异性,分别定义了线路电气介数和节点电气介数,通过三种故障模式对关键线路和关键节点进行有效性校验。以 IEEE39 节点系统为例计算其线路电气介数和节点电气介数,并按照排序结果对这些元件进行连锁攻击,发现电力系统在这些高介数元件攻击下是极其脆弱的。仿真结果表明,所提方法能更好地反映元件在整个电网中的重要程度,特别是能识别那些虽承载功率不多但处在电网拓扑结构重要位置的元件,验证了该方法的有效性。

关键词 电气介数;关键环节;故障模式;稳定性校验

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1004-0366(2017)04-0048-06

近年来,国内外多次发生的大停电事故^[1-2]引起人们对电网经济性和可靠性的密切关注。大量的研究表明,网络中个别元件相继故障会引起大停电事故的发生,而事故的进一步加剧与电网的关键环节有密切的关系。关键环节包括在电力系统稳定运行中充当重要作用的线路和节点,它们因故障而退出系统,将会引起其他网络元件故障的连锁反应,最终导致系统崩溃。因此,如果能在系统当前的运行状态下,迅速而又准确的辨识出系统的关键线路、节点,并采取有效地保护措施,对提高电力系统的稳定运行,减少大停电事故的发生具有很重要的理论和经济价值。

现有的对电力系统关键环节的研究都是基于经典复杂网络模型,通过定义相应的网络化指标来量化其脆弱性。研究表明:大部分电网结构都具有小世界特性^[3],其特性有助于电网故障的迅速传播。对电网元件进行高介数、高度数连锁攻击时发现系统是脆弱的^[4]。文献^[5]中进一步验证了电力系统

中存在极个别的线路和节点的介数远远高于系统中其他线路和节点的介数,这些线路和节点退出运行后,大面积潮流将会重新转移。为了使电网故障模型更加精确^[6],引入了节点容量系数的概念。文献^[7]中指出网络拓扑结构对电力系统的关键性环节有重大影响,同时介数指标与度数指标相比较加入了元件的物理特性,因此能更好的揭示系统的脆弱环节。但是,以上大多数研究都是通过构造符合电力系统物理背景的特征指标来评估电网结构中重要的线路、节点^[7-8],所得出的结论并没有很好地结合决定网络潮流分布的基尔霍夫定律。在建立加权电网拓扑模型评估电网脆弱性时应考虑系统运行状态^[9-14],从系统结构脆弱性和状态脆弱性出发对电网进行评估,进一步明确反映出系统的关键环节。文献^[10]中以效能函数作为衡量指标,确定网络关键环节。文献^[11]中在电网脆弱性评估中综合考虑了线路介数和电力系统当前的运行状态,提出了新指标来评估系统的脆弱性。以上模型均考虑了电力

收稿日期:2016-08-09;修回日期:2016-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51267012);甘肃省科技支撑工业计划项目(1504GKCA033);甘肃省自然科学基金项目(1310RJYA079)

作者简介:陈伟(1976-),男,甘肃天水人,博士,教授,硕士生导师,研究方向为电能质量分析与控制、新能源发电技术。E-mail:chenlin@lut.cn

系统拓扑结构和不同的运行状态,且选取不同的实时运行状态特征参数来识别电网的关键环节,各有其优缺点。但是,如何选取最有效的指标来评估复杂电网的关键环节是一个突出的问题。

因此,针对以上研究的不足,综合考虑电网拓扑结构、功率输送关系和系统运行状态,并分析线路和节点在系统结构差异性的基础上,提出了一种基于电气介数的电网关键环节的辨识方法,所提方法弥补现有一些模型假设系统潮流只沿最短路径流动的缺点,且能反映系统各线路在“发电-负荷”节点对之间功率传输时被占用的情况,同时考虑了不同节点的发电容量和负荷水平的影响,将电网结构特征与实际电力系统的运行状态相结合,使所建模型更加准确。其次,将线路电气介数指标和节点电气介数指标用于电网关键环节的辨识中,并给出具体的辨识步骤。最后,分别采用三种不同的连锁攻击实验校验高电气介数线路和节点在电力系统中的关键地位,并分别以网络效能函数、系统连通性水平指标表征系统在受到高电气介数元件连锁攻击下的脆弱程度,以 IEEE39 节点为算例证明该方法的有效性。

1 考虑能量传输影响的电气介数评价模型

辨识电网关键线路和节点就是使用动态、静态分析方法寻找影响电网结构中的脆弱环节,从而在系统实际运行中预防并保护脆弱环节以防止连锁故障发生。大量的研究表明,以线路(节点)介数为核心的指标在一定程度上更能反映出线路(节点)在电网中的重要性。有些网络元件在网络中承担着较多的物质交换和信息,若这些元件因故障退出系统,必然会严重影响到网络的功能,然而已有的模型大多假设母线间或“发电-负荷”节点间潮流只按最短路径流动,而忽略了潮流沿其他路径传输的可能性。事实上,从发电节点传输功率到负荷节点遵循基尔霍夫定律定律,且由于传输中的电流信息是可分的,所以电流传输路径将遍及电网中所有的线路。因此,上述假设背离了实际电力系统潮流的物理背景。

建立电气介数考虑到电力系统运行的根本任务是在“发电-负荷”节点对之间的传输功率。因此,分析并度量系统中元件对“发电-负荷”节点对之间潮流流动的影响程度就具有重要的意义。其次,线路或节点所处的位置不同会对系统稳定运行产生重大

的影响,它是电网的固有属性。电气介数准确的量化了线路、节点在电网中关键程度,并从线路、节点差异两方面定义系统关键环节指标,且建立的电气介数指标与以往的介数指标相比,更能客观地反映出关键线路开断、关键节点故障对系统稳定运行的影响程度。高介数元件的形成是电能输送的最优路径,它们的存在大大提高输电效率,对电力系统不利的是一旦高介数元件发生故障,通过该元件的输电路径就会遭到破坏,造成潮流大面积转移引起元件故障连锁反应,导致系统大面积停电。因此,对高介数元件及时的识别与防控就成为了一种保证电力系统稳定运行的客观必要性。

2 电网元件的电气介数

2.1 线路电气介数

在电力系统复杂网络拓扑结构研究过程中,通常采用介数指标来衡量线路、节点在网络中的关键性地位。电气介数指标将元件的电气特性加入到网络的拓扑结构中,物理背景清晰且容易计算,因而在电网关键环节的识别中广泛应用。元件的电气介数值越大,就认为该元件在网络中越重要。但是,以往的介数指标假定系统潮流只按最短路径传输,而忽略了电力系统潮流传输的客观性。针对已有模型的不足,以及电力系统宏观潮流传播的特性,定义线路 (m, n) 的电气介数为

$$B_e(m, n) = \sum_{i \in G, j \in D} \sqrt{W_i W_j} |I^{ij}(m, n)|, \quad (1)$$

其中: $B_e(m, n)$ 代表线路的电气介数; $I^{ij}(m, n)$ 为在“发电-负荷”节点对 (i, j) 间加上单位加入电流元后,线路上 (m, n) 产生的电流,表示了系统结构对线路电气介数指标的影响。发电节点 i 的权重 W_i 取其实际出力或额定容量;负荷节点 j 的权重表示为 W_j 取其实际消耗的负荷或最大负荷。当电网运行方式发生变化时线路电气介数指标也会随之变化;所有发电和负荷节点用集合 G 和 D 代表。 $B_e(m, n)$ 表示了“发电-负荷”节点对之间潮流对线路的利用情况,并量化了支路对全网潮流的重要程度。 $B_e(m, n)$ 值越大,表示该线路发生故障时对电网的稳定运行影响程度越大。因此,适用于系统关键线路的识别。同时,新提出的电气介数考虑了支路电抗和发电节点、负荷节点有功容量等电气量参数,将线路在全网传播的功率以公式的形式量化,其物理背景符合电力系统实际,辨识结果更加准确。

2.2 网络效能

用网络效能指标体现高电气介数线路在系统中

的关键地位。同时,以系统受到不同攻击模式下前后网络效能的比值来表示系统受攻击程度的大小。网络效能指标具有既能反映网络的拓扑结构,又能兼顾电网的运行状态等优势,其表达式为

$$E = \frac{1}{N_G N_D} \sum_{j \in G} \sum_{j \in D} \frac{\min(P_{G_i}, P_{D_j})}{|Z_{ij}|}, \quad (2)$$

其中: E 代表网络效能; N 为有权网络节点的节点总个数; $\min(P_{G_i}, P_{D_j})$ 是“发电-负荷”节点对 (i, j) 的最小有功功率值; $|Z_{ij}|$ 是“发电-负荷”节点对 (i, j) 间的电气距离,即等值阻抗。网络效能值与电网传输电能的大小成正比,它反映的是电网中任意一对“发电-负荷”节点间的平均值,可以直接用来比较不同规模的电网。

2.3 节点的电气介数

在电网的稳态运行状态下,按功能的不同将节点分为发电节点、联络节点和负荷节点三类,其中节点 n 的电气介数表示为

$$B_e(n) = \sum_{i \in G, j \in D} \sqrt{W_i W_j} B_{e,ij}(n), \quad (3)$$

其中: $B_{e,ij}(n)$ 为在 (i, j) 间加上单位注入电流元后在节点 n 上产生的电气介数,即

$$B_{e,ij}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_m |I_{ij}(m, n)|, & n \neq i, j \\ 1, & n = i, j \end{cases} \quad (4)$$

其中: m 表示所有与 n 有支路直接相连的节点。式(3)是对全网所有的节点对加权求和;式(4)是对“发电-负荷”节点对间注入电流元后节点 n 上通过电流的大小,即反映了节点间功率传输对节点 n 的占用情况。由上述可知节点电气介数不仅反映出系统中所有母线间功率传输所经过的节点,而且直观的表现了节点传输功率的大小。式(4)中没有注入电流节点的流入电流和流出电流大小相等方向相反,所以其数值减半,有单位注入电流的节点电气介数值为1。

文献[12]中指出假设系统每个节点对其介数都有一个最大承受能力,其大小正比于该节点介数的初始值,最大承受能力称为“介数容量”。大量的实验结果表明,当系统某一节点故障将引发系统潮流转移和再分配,其他节点的介数值改变并将远大于其上限值而依次退出运行,是系统连锁故障发生的根本原因。同理可得,节点对电气介数值也有最大承受能力,定义节点的电气介数的阈值为

$$\begin{cases} S_i = \alpha B_{e-i}(0), \\ \Gamma_i = \beta B_{e-i}(0), \end{cases} \quad (5)$$

其中:节点 i 故障前的电气介数为 B_{e-i} ; S_i 和 Γ_i 分别为节点 i 的运行阈值和极限阈值; α 为运行系数; β 为极限系数。

3 电网关键环节连锁攻击实验

由上述理论可知,电气介数的大小表征了线路或节点故障对电网安全稳定运行的影响程度。通常选取的校验方法是有选择性地攻击网络中的某些线路或节点,然后以系统网络效能的下降程度或系统连通性水平作为衡量此线路或节点的关键程度,以便采取正确的预防控制措施。研究目的主要在于识别出哪些线路或节点故障会对系统功能产生严重影响,从而采取正确的预防和保护措施。

3.1 关键线路故障模式选择

运用复杂网络法将电力系统各个部分简化,建立数学模型来辨识网络中的关键环节。线路电气介数的大小是判断其是否处于电力系统中的关键地位的依据。采用不同攻击方式对系统进行连锁攻击,以证明电网在高电气介数线路受到攻击下是十分脆弱的。攻击方式包括:

(1)动态连锁攻击模式:每次断开剩余线路中电气介数最大的线路。

(2)静态攻击模式:将线路电气介数排序,从大到小依次断开每条线路。

(3)随机攻击模式:每次随机选择断开一条线路,以此类推。

3.2 关键线路的辨识流程

在拓扑结构模型中,利用复杂网络理论将电网抽象成加权无向图 $G=(V, E, X)$,其中: V 是网络中发电机节点、负荷节点和联络节点的集合; E 代表输电线与变压器支路,边的权值是输电线路上的电抗值,网络联接用联接矩阵 B 表示。根据上述简化,对电力系统连锁故障的过程进行模拟,进行关键线路辨识。具体步骤如下:

(1)输入发电机节点集 G 及其容量集 P_G 、网络的邻接矩阵 B 、负荷节点集 D 及其容量集 P_D ,线路阻抗矩阵 X ,根据式(1)计算电网初始电气介数并对线路电气介数从大到小依次排序,根据式(2)计算系统的初始网络效能。

(2)根据上节提到的三种攻击模式依次断开电网的一条线路,同时更新网络参数。

(3)当系统中多条线路遭受攻击时,判断网络是否解列成各个子网。如果解列,则计算每个子网的

网络效能,由于潮流转移剩余线路电气介数值发生改变,因此对线路按新的电气介数值排序。将每个子网的网络效能累加得到总的网络效能。如果系统没有解列,返回步骤(1)计算网络效能和剩余线路的电气介数。

(4)继续攻击网络,直到断开网络中线路的数量满足要求。若满足,系统已无有功出力,攻击结束;若不满足,则返回步骤(3)。

(5)观察每次攻击后网络效能变化趋势并进行原因分析。

3.3 关键节点故障模式选择

关键节点的故障模式类同于关键线路,按如下三种模式选取:

(1)静态攻击模式:将节点按电气介数大小排列,从大到小依次使节点失效。

(2)轮盘赌随机选择模式:节点被选中的机率正比于其电气介数;

(3)随机攻击模式:随机选择一个节点作为初始故障点,计算系统的网络效能,再随机选择一个节点作为故障点,以此类推。

上述所提的故障模式并不是电网真实的连锁故障过程,而是有目的的选择性攻击。这样做是为了表明少数高电气介数线路、节点的故障会使系统功能弱化,即用电气介数指标识别系统关键线路、节点是有效的。

3.4 关键节点的辨识流程

对电力系统连锁故障的过程进行模拟,进行关键节点辨识。具体步骤如下:

(1)基于电网运行方式取故障前系统状态为 $W(0)$ 并给出系统运行系数和极限系数,由式(3)~式(5)计算各节点电气介数和介数阈值。

(2)根据攻击模式有目的或随机断开一个节点,将其移除后设系统状态变为 $W(t), t=1$ 。

(3)节点断开,潮流重新分布。因此,更新每个节点电气介数。如果更新的节点电气介数值都没有超过其运行阈值,则连锁故障模拟结束并转步骤(5);如果有节点的电气介数值超过其阈值,对其进行调整以模拟节点连锁失效的过程。

(4)返回步骤(3)进行新一轮模拟,并判断断开节点的数量是否满足要求,系统是否稳定。

(5)计算系统受到攻击后的连通性水平,并评价故障的严重程度。

和已有模型一样,我们同样使用连通性水平指

标来评价节点故障对系统的影响程度。

4 算例分析

根据上述内容及方法,按照复杂网络理论对 IEEE39 节点系统^[9]进行抽象和建模,该系统为北美新英格兰的一个区域电力网,包括 10 台发电机、19 个负荷点和 46 条线路,其中,31 号发电机为该系统的平衡机。系统接线如图 1 所示。

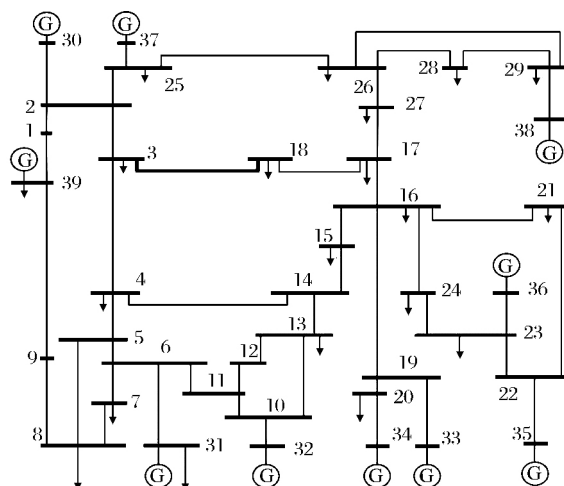


图 1 IEEE-39 节点系统

Fig.1 IEEE-39 node system

4.1 关键线路辨识

利用 Matlab 编程,按照线路的电气介数计算公式(1)计算各条线路的电气介数并按从高到低排序,初步确定系统的关键线路。表 1 给出了线路按电气介数排序的结果,排序靠前的线路可以认为是关键线路。对比文献[7]中提出的带权重线路介数法辨识脆弱线路的方法,发现两种方法对关键线路的排序大体相同。由表 1 可知,前三条线路排序结果基本一致,认为它们是系统的关键线路。从图 1 也可得知,这几条线路都处于系统重要的输电通道,如果它们因故障退出运行,会造成系统解列,但排序靠前的线路并不一定都是重载线路;如线路 16-17 所承担的传输功率经潮流计算为 208.60 MW 在网络中承担功率属于中等,断开该线路会使发电机的功率无法送出,导致系统部分区域功率供给不足;对电气介数排名较为靠前的线路 2-25 分析也可得出以上论证。由此可见,线路的关键性程度不仅与自身所承担的传输功率的大小有关,还与其在系统中所处的拓扑位置有关。文献[14]中仿真得出线路 15-16 不是关键线路,其线路的断开对系统暂态稳定没有影响,但我们认为此线路是关键线路,该线路的断开会造成系统解列,发电节点 34-36 的功率无法外送;

剩下两条线路排序靠后,认为其在系统中关键程度较低。故我们提出的模型更关注线路在系统拓扑结构上的重要性。仿真结果的差异主要是由模型考虑的影响因素不同造成的。

表 1 对 IEEE-39 节点系统的关键线路辨识

Table 1 Critical line identification for IEEE-39 node system

关键线路	电气介数	排序	加权介数	排序
16-17	30 480	1	11 200	1
15-16	22 427	2	11 200	1
16-19	19 025	4	11 200	1
2-25	18 011	6	8 000	8
2-3	16 524	9	8 000	9
16-21	12 977	15	11 200	1

4.2 系统连锁攻击下的网络效能分析

为验证按照节点电气介数所选择关键线路的有效性,采用节点电气介数排序、随机攻击和动态连锁攻击等方式来攻击 IEEE39 节点系统,并记录下每次系统受到攻击后的网络效能,如图 2 所示。每次攻击后,动态连锁攻击要比随机攻击和静态攻击对系统的网络效能影响更大。随着线路的依次退出运行,三种攻击模式下的网络效能下降程度迅速加大,并且每次攻击后,动态连锁攻击的网络效能值均位于随机攻击和静态攻击的曲线之下,这是由于 IEEE39 节点系统只有 46 条线路。

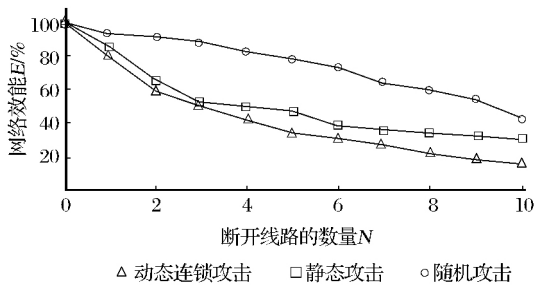


图 2 三种攻击模式下网络效能的变化

Fig.2 The change of network performance under three attack modes

系统受到攻击初期,先切除系统中重要的联络线,系统解列为孤岛;攻击后期,切除联接在发电机节点的线路,因而在切除一定数量的线路时,网络效能下降程度放缓。经过 10 次连锁攻击,在动态连锁攻击下的网络效能下降最少,不到 20%,分析得出系统对随机攻击具有较好的抵抗能力,静态攻击次之,从而证明了根据电气介数指标排序可以获得系统中的关键线路,说明了高电气介数线路受到连锁攻击时网络是极其脆弱的,结论和已有模型大体一致。

4.3 关键节点辨识

以 IEEE39 节点系统为例,计算不同运行系数 α 下连锁攻击对系统的影响。采用 3.3 节流程模拟连锁故障的过程,取 $\alpha=1.1\sim 2.3$ 且 $\beta=2\alpha$ 。使用连锁故障前后系统连通性水平来评价系统的故障程度,结果如图 3 所示。

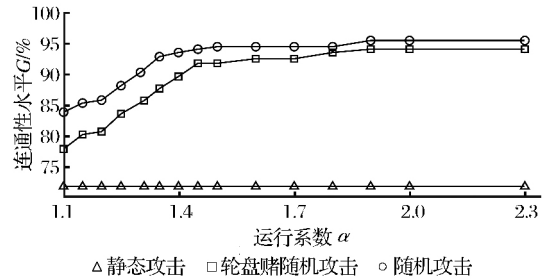


图 3 三种攻击模式下系统连通性水平的变化

Fig.3 The change of system connectivity level under three attack modes

由图 3 可知,当系统处于低运行系数 α 下,在系统受到轮盘赌随机攻击或随机攻击模式时系统连通性水平很低。随着运行系数 α 值增加,系统抗击攻击的能力显著提升,当运行系数 α 上升到一定数值时系统连通性水平基本保持不变,同时不论 α 为何值,高电气介数节点受到攻击时对网络连通性水平的影响都要比其他攻击方法的明显,且不受运行系数 α 的影响。显示了电网中少部分节点较脆弱,却能对电网的功能产生较大影响,这说明高介数节点在网络拓扑中具有关键地位。要提高整个电网的可靠性水平,必须从电网结构出发,对高介数的节点进行重点防护,减少大规模停电事故的发生,保证系统的安全稳定运行。

5 结论

电力网中关键线路和关键节点的辨识对连锁故障防控具有重要的意义。提出使用电气介数方法评估电网的关键环节,并对网络中关键性元件进行了定量描述。仿真结果表明电力系统在针对高电气介数的元件攻击下更为脆弱。因此,基于电气介数的方法能够很好地识别电网的关键环节。值得注意的是电网中存在一部分传输功率并不高,但电气介数值排序靠前的联络元件,这些元件的开断会对电网功能造成严重影响。新模型综合考虑了线路和节点在整个电网结构中的拓扑结构、承担的功率大小等因素,因而可以较为准确地考察线路和节点在电网结构中的关键程度。

新提出的电网关键环节的辨识模型能够满足系统对关键环节辨识的需要,帮助电网规划人员直观地获知网络元件的关键程度,确定网架中的核心枢纽线路和节点。存在的不足是基于电气介数识别电网关键环节的方法,只考虑线路中电流的可分性而没有考虑电流的方向性,而电力网络是有向加权网络,线路的潮流具有方向性,从而使得仿真结果有一定的误差。因此,接下来的研究工作中,在上述层面还需做进一步的努力。

参考文献:

- [1] 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,2003,47(10):8-11,16.
- [2] 鲁宗相.电网复杂性及大停电事故的可靠性研究[J].电力系统自动化,2005,29(12):93-97.
- [3] 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,2008,45(10):20-25.
- [4] 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,2010,54(8):64-68.
- [5] Lu Z X, Meng Z W, Zhou S X. Cascading Failure Analysis of Bulk Power System Using Small-world Network Model [C]//2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, USA: Iowa State University, 2004: 635-640.
- [6] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for Cascading Failures Incomplex Networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(1):45104.
- [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辨识[J].电力自动化设备,2006,34(12):1-5,31.
- [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.
- [9] 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.
- [10] 郭静,王东蕊.基于复杂网络理论的电力通信网脆弱性分析[J].电力系统通信,2009,30(9):6-10.
- [11] 何俊,庞松龄,禹冰,等.基于容量介数指标的电网脆弱线路识别[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):30-35.
- [12] 吴莹燕,林韩,温步瀛,等.考虑电网状态和网络结构的脆弱线路评估[J].华东电力,2013,42(3):519-523.
- [13] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based Attacks on Complex Networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2):1-4.
- [14] 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.

Identification of Key Links in Power System Based on Electrical Betweenness

Chen Wei¹, Duan Xin¹, Pei Xiping¹, Ma Yanhong², Liu Fuchao²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract In consideration of topological structure of power grid, power transport relations and system operating status, propose an identification method for grid key links based on electrical betweenness which overcomes the defects that currents between nodes of weighted betweenness hypothesis "generation-load" only flow along the shortest path. According to the difference of circuit and node in the system structure, the electrical betweenness and the number of nodes are defined respectively, and the validity of the key lines and key nodes is verified by three kinds of failure modes. Taking IEEE39 bus system as an example to calculate the electrical betweenness and node electric betweenness, and conduct chain attack on these elements according to the ranking results, finding that power system for these high betweenness components under attack is extremely fragile. The simulation results show that the importance of the proposed method can better reflect the importance of elements in the whole power system, especially to identify those carrying power though not much but at an important position in the topology of the components, and verifying the validity of the method.

Key words Electric betweenness; Key link; Failure mode; Stability verify