

基于复杂网络理论的电力基础设施网络关键组件辨识

张颖淳 王淑良

(重庆交通大学信息科学与工程学院 重庆 400074)

摘要 电力网络作为典型的关键基础设施网络,其组件的关键性辨识对于分析、理解、识别电力网络的脆弱性,进而提出相应的保护措施和改进策略有着重要的意义。基于此,利用复杂网络理论和方法,从复杂网络统计指标、扰动下电力网络性能变化两个不同角度探讨了电力网络的关键组件辨识方法,获取了电力网络的关键节点与关键边。通过识别网络的关键组件可以控制级联故障,指出哪些组件需要重点保护,并采取缓解策略来降低其在扰动下的脆弱性。

关键词 电力网络,复杂网络,脆弱性分析,关键组件,基础设施保护

中图分类号 TP301.6 文献标识码 A

Critical Components Identification of Power Infrastructure Systems Based on Complex Network Theory

ZHANG Ying-chun WANG Shu-liang

(Department of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400047, China)

Abstract As a typical critical infrastructure system, key components identification of the power network has great importance for analyzing and understanding vulnerability of the power network. On this basis, by utilizing the method of complex network, this paper studied the key components from aspects of complex network statistical index and performance variation under disturbance. Key components of the power network were acquired and identified to better protect the systems. It is helpful in providing decision support on cascading failures control and system improvement.

Keywords Power network, Complex network, Vulnerability analysis, Critical components, Infrastructure protection

1 引言

美国总统关键设施保护委员会 PCCIP (President's Commission on Critical Infrastructure Protection) 于 1997 年提出的里程碑式的报告《立足之本:保护基础设施网络(Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures)》^[1]拉开了以电力网络为核心的基础设施网络研究的序幕。报告指出,国家安全、经济繁荣和社会稳定都依赖于复杂性不断增长的基础设施网络。2003 年 2 月 14 日,美国发布了《关键基础设施与资产物理保护的国家战略》^[2](简称《战略》),其从国家安全的高度全面推行关键基础设施与资产保护计划,并着重强调了电力网络在经济和社会发展中的作用,指出电力是一个尤其重要的基础设施,因为很多的基础设施都依赖于一个可靠的电力供应来保证其正常运行。

然而由于结构和功能的脆弱性,在过去的几十年中,电力网络遭受过不同程度的冲击和破坏,严重地影响了社会生产和人民生活,并造成了重大经济损失。基于电力网络对社会发展的重要性,系统故障对社会生产、人民生活的巨大影响,分析、理解、识别电力网络的脆弱性,进而提出相应的抗干扰措施和改进策略,为决策者提供决策支持,已经变得日趋紧迫而亟待解决。

最近几年研究者已经逐渐认识到电力网络脆弱性研究在工程、社会技术和经济等学科领域的重要性。

当电力网络有关性能信息与数据较少时,学者们最初用概率风险分析方法(PRA)来评估电力网络的风险^[3]。在此基础上,利用统计回归模型分析了自然灾害对电力网络性能的影响^[4]。

在工程领域,许多研究者通过分析电力网络的物理组件和连接,尝试提高系统的设计和可靠性标准^[5],并讨论了那些能够提高系统可靠性的投资。

社会技术领域的研究主要是政府或企业这样一些机构和部门,他们对基础设施具有所有权或经营权,研究的目的是解决社会关切的这些基础设施带来的相关问题^[6]。

在经济领域,文献^[7]考虑了电力网络对经济的影响,并考虑了面临的内部和外部风险等不同因素。

然而上述工作并没有从网络的拓扑结构考虑问题,没有探讨电力网络的结构布局对系统脆弱性的影响。

2 复杂网络理论

1998 年 Watt 和 Strogatz 在《自然》杂志上发表了一篇关于小世界网络的复杂网络学术论文,其运用统计物理的方法获得了小世界网络所具有的小世界特性^[8],从此复杂网络及

到稿日期:2013-09-25 返修日期:2013-11-16 本文受重庆高校创新团队:大型结构全寿命监测关键技术(KJTD201306),国家自然科学基金项目:关联基础设施网络的弹性评估(51208223)资助。

张颖淳(1967—),女,副教授,主要研究方向为数据挖掘、计算机基础教学,E-mail:786435880@qq.com;王淑良(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为复杂网络、系统建模与仿真、基础设施系统脆弱性分析,E-mail:shuliang0820@sina.com(通信作者)。

其理论在学术界得到了国内外众多学者的关注;同时复杂网络的结构^[9]、复杂网络的相继故障问题^[10]、复杂网络中智能体的同步问题^[11]、混沌问题^[12]等方面的研究广泛开展,形成了比较完善的理论方法体系。

复杂网络作为大量真实复杂系统的高度抽象,其理论与应用研究已渗透到数理、生命和工程学科等众多不同的领域^[13]。利用复杂网络的理论和方法能够很好地描述电力网络的内部结构和彼此间的关联关系,为系统的研究提供一个全新的视角和研究方法。

目前不少学者利用复杂网络理论和方法对电力网络等基础设施系统进行了研究,探讨了网络的脆弱性以及自然灾害对网络的影响。Zhou^[14]等人给出了网络脆弱性的定义,指出网络的脆弱性是指网络遭受攻击时,网络效率的下降。在此基础上,一些研究者介绍了网络功效性的定义及其衡量指标。文献^[15]给出了网络功效性的不同的定义,例如利用平均最短路径长度、直径、簇聚系数等指标来度量网络的功效性。此外,目前被普遍认同的一种网络功效性的定义是 Crucitti^[16]等人提出的,即认为功效性反映信息和资源在网络中的传播速度。由于两节点之间的通信效率 ϵ_{ij} 与最短距离成反比,因此得到: $\epsilon_{ij} = 1/d_{ij}$, 而当 $d_{ij} = \infty$ 时, $\epsilon_{ij} = 0$ 。这时网络 G 的功效性指标便可以定义如下:

$$E^+(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} \epsilon_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

然而此定义并未考虑连通性对网络的影响,因此 Holme^[17]给出了一种考虑网络连通性的功效性指标:

$$E^*(G) = \left(\prod_{i,j \in G, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \right)^{\frac{1}{N(N-1)}} \quad (2)$$

在网络功效性指标给定的情况下,给出了整个网络在遭受随机攻击与蓄意攻击时的脆弱性指标:

$$v_{rand}(G) = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} |E(G) - E(G \setminus \{i\})| \quad (3)$$

$$v_{arg}(G) = \max\{|E(G) - E(G \setminus \{i\})|; i \in G\}$$

这些定义符合直观上对网络脆弱性的理解,但是它们有时却不能对直观上有不同脆弱性的一些网络进行很好的区分。因此, R. Criad 等人^[18]认为考虑网络的脆弱性指标时,应该将一些重要特征融入到网络脆弱性的定义中,并给出了如下脆弱性函数:

$$v^*(G) = \exp\left\{\frac{M-m}{N} + N - |E| - 2 + \frac{2}{N}\right\} \quad (4)$$

其中, M 是网络中节点的最大度数, m 是网络中节点的最小度数, $|E|$ 是网络中的边数, N 是网络中的节点数。

然而上述基于复杂网络理论的脆弱性研究工作并没有分析电力等基础设施网络的关键脆弱性组件,没有探讨关键组件辨识方法和对关键组件进行保护以减少由于关键组件故障引起的级联故障,进而降低系统的脆弱性。基于此,本文运用复杂网络的理论和方法,从基于复杂网络统计指标的关键组件辨识、基于系统性能变化的关键组件辨识这两个不同角度来探讨电力网络的关键组件辨识方法。

3 电力基础设施网络关键组件辨识

电力基础设施网络脆弱性研究的是系统由于系统结构和外界干扰所引发的安全性问题。通过辨识系统关键组件,可对系统关键脆弱性组件进行重点保护,从而避开干扰的破坏,

提高系统的生存能力。图 1 给出了电力基础设施网络关键组件辨识的分析理论框架。

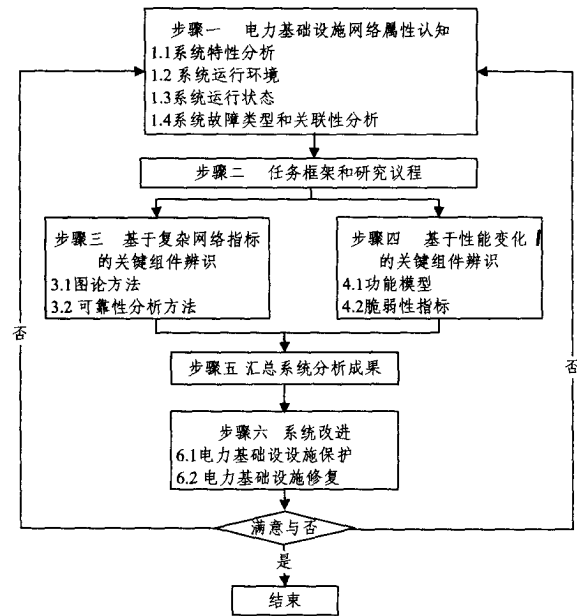


图 1 电力网络关键组件辨识框架

首先,在进行关键组件辨识时,要对电力网络及其特性有深刻的理解,对系统的运行状态和运行环境给出清晰的描述。此外,系统遭受的威胁也需要给予识别。系统经常遭受各种灾害的威胁和破坏,这些灾害种类较多,大致可以分为 3 种:自然灾害、随机故障以及蓄意攻击。另外系统的关联性使得系统功能相互影响,故障可能在关联的系统之间相互传播。

其次,对任务框架和研究议程也要进行明确的鉴定。利用复杂网络和图论的知识,将电力网络抽象为一个网络,这时就可以用网络图的方式表示电力网络的拓扑结构,接着从电网的拓扑结构特征入手,考察电网特性。在本文中主要从两个不同角度:基于复杂网络统计指标的基础设施系统关键组件辨识、基于系统性能变化的基础设施系统关键组件辨识,来探讨电力网络的关键组件辨识。

在系统改进方面,根据所取得的成果和相关反馈,需要确定关键部件、关键位置,并对它们进行重点保护,并选择能最好地改进系统性能的选项。本文所做的工作主要为决策部门提供决策支持,将相关信息进行反馈后,由系统所有者实际执行,对改进的建议作出最后决定。

3.1 基于复杂网络统计指标的电力基础设施网络关键组件辨识

3.1.1 图论-拓扑分析

这里首先从纯拓扑角度对电力网络的关键组件进行分析。将电力基础设施网络运用图论抽象成系统的拓扑结构图,构成网络化图形,进而结合数学的相关理论对网络化图形进行相关的研究,最终将研究结果还原到复杂系统当中。这种将复杂系统抽象成平面上的点和连线构成的拓扑结构图的方法,降低了研究的难度,理清系统元件之间的关联关系。

在拓扑表述中,不给出边的具体长度,任意两个相连节点之间的长度记为 1,因此两个节点之间的距离就可以用这两个节点之间边的数目来进行刻画。下面首先给出最短路径长度矩阵 $\{d_{ij}\}$, 其中 d_{ij} 表示节点 i, j 之间最短路径的长度。接下来,在最短路径长度矩阵 $\{d_{ij}\}$ 的基础上,定义了一个新的

矩阵 $\{s_{ij}\}$ 。具体地讲, $\{s_{ij}\}$ 为最短路径长度矩阵 $\{d_{ij}\}$ 中找到 K_S 个最小元素令其值等于1而其他元素全部为0构成的一个矩阵。这时首先将节点度 k_i 作为一个复杂网络拓扑结构的综合指标来对网络组件的重要性进行度量,节点 i 的度 k_i 为: $k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}, i=1,2,3,\dots,N$,其中 a_{ij} 为网络邻接矩阵第 i 行 j 列元素。节点度是复杂网络的一个非常重要的统计特征指标,它在一定程度上可以表征一个节点在网络中的重要性。

3.1.2 可靠性分析

有些研究已经证实了基础设施系统的拓扑结构与鲁棒性和可靠性之间有一个合理的关联^[19]。在这里采用Zio利用可靠性特性识别电力网络关键元件组件的方法^[20],引入一个可靠性矩阵 $\{p_{r_{ij}}\}$ 来描述网络在局部层面的可靠性质,其中元素 $p_{r_{ij}}$ 表示资源能够沿着连接节点 i 到节点 j 的边成功传输的概率,这里并不一定要求节点 i 与节点 j 直接相连,任意方式的连接都可以。可靠性矩阵 $\{p_{r_{ij}}\}$ 含任意两个节点之间可靠性的完备信息。为了从可靠性观点来说明节点的重要性,这里给出了一个可靠性的概念:

$$k_i^r = \sum_{j \in N} p_{r_{ij}}, i=1,2,3,\dots,N \quad (5)$$

类似于上一节的分析,这里也定义了一个新的矩阵 $\{s_{ij}^r\}$,在完全可靠性矩阵 $\{p_{r_{ij}}\}$ 中,找到 K_S 个最可靠的连接,令其值等于1,令其他元素全部为0,构成的一个矩阵即为 $\{s_{ij}^r\}$ 。

我们以IEEE 96电力网络为例来识别电力网络的关键组件。图2为IEEE 96电力网络的拓扑结构图,该网络具有24个节点和34条边。

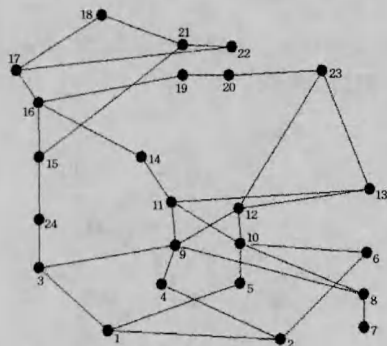


图2 IEEE 96电力网络拓扑结构图

在这里令 $K_S = 2K = 34 \times 2 = 68$,最短路径长度矩阵 $\{d_{ij}\}$ 中元素的最小值为1,即如果节点 i 和节点 j 相连,则 $d_{ij} = 1$,故在这种分析视角下矩阵 $\{s_{ij}\}$ 和节点的邻接矩阵 $\{a_{ij}\}$ 是一样的,即: $s_{ij} = a_{ij}$ 。表1的第一列是根据度大小的一个排序,即:从度的角度来度量节点的重要性。在这里序号为9和10的节点具有最大的度,取值为5,从度的角度来衡量其是最重要的,序号为7的节点具有最小的度,取值为1,从度的角度来衡量其是最不重要的。

表1的第二列给出了可靠性度的一个排序,由于分析的视角不同,模拟结果也是不同的,但在这里序号为9和7的节点也具有最大和最小的可靠性度,因此从可靠性角度它们也分别是最可靠和最不可靠的节点。类似于前面拓扑分析中的讨论,在这里定义 $\{s_{ij}^r\}$:矩阵 $\{p_{r_{ij}}\}$ 中,最可靠的34条连接对应的矩阵中的点令其取值为1,其他元素取值全部为0,便可以求出 $\{s_{ij}^r\}$ 。表2给出了连接的可靠性度,可以看出,最可靠

的连接未必是直接相连的。

表1 IEEE 96电力网络的度指标

度指标			
拓扑度		可靠性度	
节点序号	度值	节点序号	度值
9	5	9	19.0939
10	5	10	19.0928
11	4	11	19.0926
.....
24	2	22	13.8271
7	1	7	12.7517

表2 IEEE 96网络连接排序

度指标			
边序号	可靠性度值	边序号	可靠性度值
1-2	0.8991	2-10	0.8787
1-9	0.8969	2-11	0.8786
1-10	0.8870	2-12	0.8785
1-11	0.8869	3-9	0.8919
1-12	0.8968	3-10	0.8917
2-9	0.8986

3.2 基于性能变化的电力基础设施网络关键组件辨识

上节从图论-拓扑分析以及可靠性分析角度研究了电力网络的关键组件。人们可以根据不同的需要从而从不同角度来进行关键组件识别。然而仅根据复杂网络的基本统计特征指标来考察电力网络中边与节点的重要性,只能反映其在网络结构中的重要性,并没有将网络性能的变化计入评价,这对关键线路和关键节点的辨别有不合理的地方。因为在电力等基础设施系统中也存在部分组件,这些组件虽然从拓扑指标上衡量并不是非常重要,然而它们的失去将造成系统性能的巨大变化,对系统的脆弱性有着不可忽略的影响,这些节点或边同样在基础设施系统中占有重要的地位。例如图3中的节点a,该节点虽然度仅为2,但对于连接两个子网络A和B发挥着重要的作用,当该节点被切断后,子网络A和B便不能相连,这样的节点通常称为桥。

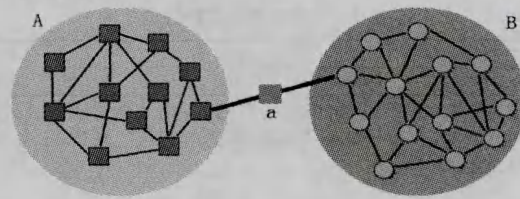


图3 网络中的桥

鉴于系统组件移除对性能的影响,本文给出了一种新的关键组件辨识方法。给定一个一般的基础设施系统,用 S 来表示,该系统 S 的性能为 $\Phi(S), \Phi(S) > 0$ 。定义一个集合 D 表示该系统 S 可能受到的破坏的集合, $D(S, d)$ 记为受到扰动后的基础设施系统 S 。利用基础设施系统性能的相对变化来度量扰动 d 的重要性,从而也就可以识别关键元件。系统性能的相对变化可以描述如下:

$$\frac{\Delta\Phi^-}{\Phi} = \frac{\Phi(S) - \Phi(D(S, d))}{\Phi} \quad (6)$$

本文以华中电力网络为案例来寻找网络的关节点线路和关键节点。

3.2.1 华中电力网络属性分析

电力网络可看作是由电厂、变电站以及不同电压等级的

输电线路组成的。如果把电厂看作节点,把连接电厂和电厂之间、电厂和变电所之间以及变电所和各终端用电设备的输电线看作边,就可以利用复杂网络的方法表示系统的拓扑结构,当对这些节点和边赋予功能属性时,就可以用来描述系统的功能特性,并由此建立其功能模型。图4给出了华中电网拓扑结构。

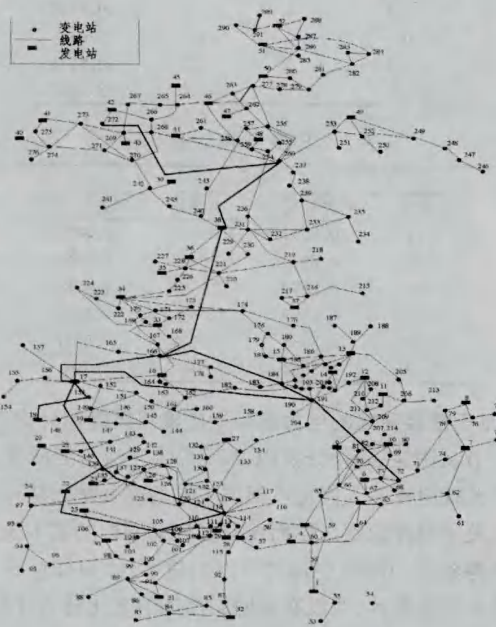


图4 华中电网拓扑结构

表3列出了华中电网的拓扑指标,网络中共有295个节点、413条边,其中发电节点数目为52个。平均节点度为2.800,与美国西部电网相比,华中电网具有较高的平均度(见表4)。网络的平均路径长度为7.922,平均聚类系数为0.0961,与美国西部电网相比,华中电网具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数。

表3 华中电网的拓扑性质

拓扑指标	N	E	G	$\langle K \rangle$	C	L	B
电力网络	295	413	52	2.800	0.096	7.922	2035

注: N为节点数, E为网络中边的数目, G为发电节点数, $\langle K \rangle$ 为平均节点度, C为平均聚类系数, L为特征路径长度, B为节点平均介数。

表4 各电网拓扑结构统计特征参数

电网	$\langle K \rangle$	C	L
美国西部电网	2.670	0.080	18.700
华中电网	2.800	0.096	7.922

3.2.2 电力网络节点级联故障模型

有关电力网络节点级联故障的模型很多,在这里采用复杂网络学者们为探索基础设施系统结构与功能间的关系而提出的 Motter 模型^[19,20]来建立电力网络负载模型。模型具体描述如下:

(1)假设电力能量总是沿着节点与节点之间的最短路径进行交换传递;

(2)定义节点所承担的负载为通过节点最短路径的条数,即节点的介数;

(3)每个节点的负荷都有一定的容量,各节点承担的负荷受其容量约束,如果超过运行容量,则该节点发生故障并从网

络中被移除,其相应连接的边也从网络中移除。

利用 Motter 模型对电力网络建模如下,对电力网络中任意节点 i 与节点 j , 设 (i, j) 为连接节点 i 与节点 j 的最短路径。对电力网络中任意节点 k , 设 $L_k^{(i,j)}$ 表示连接节点 i 与节点 j 的最短路径 (i, j) 是否通过节点 k , 通过时 $L_k^{(i,j)} = 1$; 否则 $L_k^{(i,j)} = 0$ 。由此可知, 电力网络中节点 k 的负荷可以表示为 $L_k = \sum_{i,j} L_k^{(i,j)}$, 设节点所能承受的最大负荷为 C_k , 有: $C_k = (1 + \alpha)L_k, k = 1, 2, 3, \dots, N$, 其中常数 $\alpha \geq 0$, 表示节点的容量冗余系数。当节点 k 承载负荷超过 C_k 时, 节点将因过载而失去功能, 从网络中被移除。

3.2.3 电力网络边级联故障模型

这里采用局部负载重分配模型来对电力网络进行功能建模。王文旭和陈关荣^[21]利用节点度指标来对网络进行建模并研究了网络的级联故障, 他们利用连接边的两个节点的度乘积的一个指数函数作为度量指标来衡量边的重要性, 并将其应用于模拟一些具体的网络。根据他们的定义, 边 e_{ij} 的权重被定义为:

$$w_{ij} = (k_i k_j)^\theta \quad (7)$$

其中, k_i, k_j 分别为节点 i, j 的度, θ 是一个可调参数。

当一条边受到攻击而从网络中被移除后, 该边的负载被重分配到与该边相邻的边中, 每条边增加的负载正比于其初始负载。具体地说, 假设边 e_{ij} 的初始负载为 F_{ij} , 当边 e_{ij} 受到攻击从网络中被移除后, 该边的负载被重分配到与该边相邻的边中, 如图5所示。其中, 边 e_{im} 增加的负载 ΔF_{im} 为:

$$\Delta F_{im} = F_{ij} \times \frac{W_{im}}{(\sum_{a \in \Gamma_i} W_{ia} + \sum_{b \in \Gamma_j} W_{bj})} \quad (8)$$

Γ_i 和 Γ_j 是节点 i, j 的邻居节点集, W_{im}, W_{ia}, W_{bj} 分别为边 e_{im}, e_{ia}, e_{bj} 的初始负载。

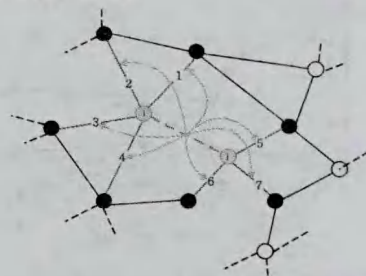


图5 边崩溃后负载重分配示意图

与此同时, 每条边都有一个容量, 也就是该边所能承载的最大的流, 当经过该边的最大流超出该边的容量时, 该边由于过载而被移除。假定边 e_{ij} 的容量正比于其初始负载, 即: $C_{ij} = (1 + \beta)W_{ij}$, 其中 β 为容量系数。

3.2.4 模拟结果分析

当电力网络元件由于故障丧失功能被移除后, 网络性能就会发生变化, 因此就可以通过电力网络性能的变化来度量网络的关键性, 在这里令 $\Phi(S) = S_{glob}(G), \Phi(D(S, d)) = S_{glob}(G^*)$, 由此定义如下脆弱性指标 V^* :

$$V^* = \frac{S_{glob}(G) - S_{glob}(G^*)}{S_{glob}(G)} \quad (9)$$

$$S_{glob}(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \epsilon_{ij}}{N(N-1)} = \frac{\sum_{i \neq j \in G} 1/d_{ij}}{N(N-1)} \quad (10)$$

$S_{glob}(G)$ 为扰动前电力网络的全局效率, $S_{glob}(G^*)$ 为扰动过后电力网络的全局效率, 以电力网络的全局效率来近似表

示基础设施系统的性能。在这里每次移除一个元件,当级联故障结束后系统性能下降,这时就可以利用性能的变化来识别电力网络的关键元件。模拟结果如图6所示。

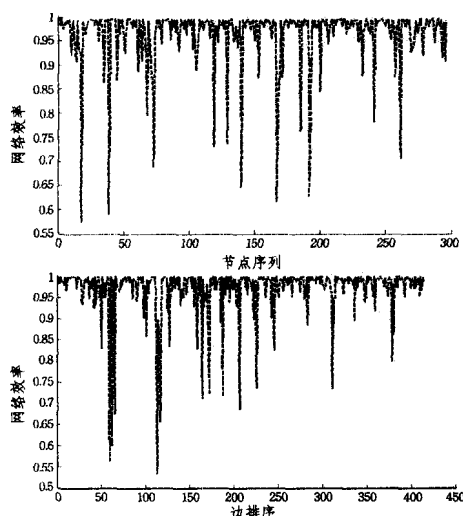


图6 网络效率变化比较

表5和表6给出了华中电力网络的5个最关键的节点和关键边,不难发现华中电网的关键节点和关键边主要是那些负载较高的节点和边。这主要是因为与普通节点和边相比,负载较大的节点和边承担了网络较多的负载,一旦被移出后,它们所承担的负载将会被分配到其他的网络组件中。由于其承担的负载较普通节点和边要多,其它节点和边接受其分配的负载后很可能会超过其最大容量而被移出,这就造成了级联影响,使更多的节点被移出,从而造成网络性能的大幅度下降,这与前面的分析是一致的。为保证网络的可靠性,这些节点应该进行重点保护。

表5 华中电网的关键节点

案例	华中电力网络
关键节点编号	17,38,166,191,139
性能相对损失	42.4%,40.9%,38.4%,37.2%,35.5%

表6 华中电网的关键边

案例	华中电力网络
关键边编号	38-228,17-152,17-157,38-260,17-191
性能相对损失	46.7%,43.9%,40.0%,34.4%,32.7%

结束语 电力基础设施是一类为社会生产和居民生活提供服务的物质工程设施,它们是社会赖以生存和发展的一般性物质条件,也是典型的复杂系统。当今社会越来越依赖于其提供的各种服务来维持正常运行。然而近年来各类灾害频繁爆发,给电力基础设施网络的安全敲响了警钟。鉴于电力基础设施网络对社会生产和人民生活的重要性,电力网络组件关键性辨识对于分析、理解、识别电力网络的脆弱性,进而提出相应的保护措施和改进策略有着重要的意义。

本文初步分析了电力基础设施网络的关键组件辨识问题。首先将复杂网络理论用于电力网络的关键组件辨识,利用网络组件关键性指标,给出了关键组件辨识方法,并以IEEE 96网络为例进行了实证分析。接下来,通过比较组件移除后对系统性能影响的大小,得到了华中电力网络的关键边与关键节点,系统拥有者可根据不同的需要,按照上述方法对系统组件的关键性进行辨识,从而进行重点保护。

参考文献

- [1] President's Commission on Critical Infrastructure Protection, Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures [OL]. <http://www.fas.org/sgp/library/pccip.pdf>, 1997
- [2] Presidential Decision Directive 63[OL]. <http://www.ciao.gov>
- [3] Apostolakis G E. How useful is quantitative risk assessment? [J]. Risk Analysis, 2004, 24: 515-520
- [4] Liu H, Davidson R A, Rosowsky D V, et al. Negative binomial regression of electric power outages in hurricanes[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2009, 11(4): 258-267
- [5] Wang J. Robustness of complex networks with the local protection strategy against cascading failures[J]. Safety Science, 2013, 53: 219-225
- [6] 朱勤,彭希哲,吴开亚. 基于投入产出模型的居民消费品碳排放测算与分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2018-2029
- [7] Konig M D, Battiston S, Napoletano M, et al. The efficiency and stability of R&D networks[J]. Games and Economic Behavior, 2012, 75(2): 694-713
- [8] Watt D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small world" network [J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [9] 邓宏钟,吴俊,李勇,等. 复杂网络拓扑结构对系统抗毁性影响研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2425-2428
- [10] Wang S L, Hong L, Ouyang M, et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies[J]. Safety Science, 2013, 51(1): 328-337
- [11] Arenas A, Diaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks [J]. Physics Report, 2008, 469(3): 93-153
- [12] Chen H H, Sheu G J, Lin Y L, et al. Chaos synchronization between two different chaotic systems via nonlinear feedback control [J]. Nonlinear Analysis, 2009, 70: 4393-4401
- [13] 刘建香. 复杂网络及其在国内研究进展的综述[J]. 系统科学学报, 2009, 17(5): 31-37
- [14] Zhou T, Fu Z Q, Wang B H. Epidemic dynamics on complex networks[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5): 452-457
- [15] Criado R, Garcia A, Hernández-Bermejo B, et al. New results on computable efficiency and its stability for complex networks[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2006, 192(1): 59-74
- [16] Crucitti P, Latora V, Marchiori M, et al. Efficiency of scale-free networks: Error and attack tolerance[J]. Physica A, 2003, 320: 622-642
- [17] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(1): 056109
- [18] Criado R, Flores J, Hernández-Bermejo B, et al. Effective measurement of network vulnerability under random and intentional attacks[J]. Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, 2005, 4(3): 307-316
- [19] Volkanovski A, Cepin M, Mavko B. Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(6): 1116-1127
- [20] Zio E, Golea L R. Analyzing the topological, electrical and reliability characteristics of a power transmission system for identifying its critical elements[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 101: 67-74
- [21] 邓雪波,王小强,陈曦,等. 基于效能模型的电力通信网可靠性研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2012, 24(3): 378-382