

基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识

曹一家,陈晓刚,孙 可

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 大规模电力网络中存在的某些脆弱环节,对电力系统大规模停电和连锁崩溃的发生有着重要的影响。基于复杂网络理论,提出了使用带权重线路介数作为脆弱线路指标的辨识方法,定义线路的带权重线路介数为其因被网络中发电机与负荷之间的最短电气路径经过而承受的负载和,并采取将电力网络中线路的介数指标提高到与其相邻的所有线路中介数指标最高的介数值的办法修正。以 IEEE 39 节点系统及华中-川渝电网为例进行了脆弱性分析,同时进行了时域仿真实验。仿真结果表明带权重线路介数指标能够较好地辨识电力网络中的脆弱线路,特别是能够识别出那些承担功率不多但因其在电网结构中的特殊位置而对系统脆弱性有重大影响的线路。

关键词: 脆弱线路; 电力系统稳定; 复杂网络; 大停电

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0001-05

0 引言

近年来,电力系统大停电事故的频发引起了人们对电网连锁故障传播机理和电力系统脆弱性的关注^[1-3]。大规模停电事故初期往往是少量元件相继故障,在事故扩大阶段则与电力系统中的脆弱环节有紧密的联系^[4-6]。因此,从整体预防的角度出发,辨识并保护电力网络中的脆弱环节对提高电力系统的可靠性、降低大规模停电事故的发生概率有十分重要的意义。

复杂网络的研究为电力系统研究开辟了一个新的方向,复杂网络在电力系统研究中的应用主要集中于 2 个方面。一是对大停电事故发生机理的研究。美国学者 Dobson、Carreras、Thorpe 等人应用复杂系统理论的成果研究了大停电事故发生机理^[7],提出了描述大停电发生的 OPA 模型^[8]、Hidden Failure 模型^[9-10]、Cascade 模型^[11]和 HOT 模型^[12]。研究初步表明,美国电力系统大停电规模与频率间满足幂律(power law)关系^[13],这种关系被认为是自组织临界特性的数学表征^[14]。二是从网络拓扑角度分析电网的结构脆弱性。文献^[15]验证了中美 2 个大区电网都属于小世界网络,并定性分析了小世界网络特性对连锁崩溃的影响。文献^[16]从电网拓扑结构出发,分析电网整体结构对连锁崩溃的影响,指出介数和度数较高的联络节点在保证电网连通性的同时,对故障的传播起着推波助澜的作用。

本文结合小世界网络特性的形成机理,从电力网络的网络架构出发,提出使用线路介数作为脆弱性指

标用以辨识电力网络中的脆弱线路,提出了相应的模型和算法,并以 IEEE 39 节点系统和华中-川渝电网为例进行了脆弱线路的辨识和时域仿真验证实验,实验结果表明该方法能够较好地辨识电力网络中的脆弱线路。

1 基于复杂网络理论的电网结构分析

1.1 复杂网络的拓扑参数

使用复杂网络理论研究电力网络,首先将电力网络抽象为由 n 个节点、 k 条线路组成的复杂网络。复杂网络研究中定义几个特征参数。

a. 平均距离 L 。在一个网络中节点 i 与节点 j 距离 d_{ij} 被定义为连接这 2 个节点间的最短路径所包含的边的数目。对所有节点对的平均距离求平均值,就可以得到该网络的平均距离为

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

b. 聚类系数 C 。网络的聚类系数 C 是专门用来衡量网络节点集聚程度的一个重要参数。在网络中,每个节点的聚类系数可表示为

$$C_i = a_i / b_i \quad (2)$$

式中 a_i 为连接到顶点 i 的三角形的个数; b_i 为连接到顶点 i 的三元组的个数。

整个网络的聚类系数定义为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

c. 线路介数 B_L 。线路的介数是指线路被网络中所有发电机与负荷之间最短路径经过的次数。

d. 最大连通域的大小 G 。最大连通域是指网络发生解列后,所有连通区域中节点数最大的区域。最大连通域的大小指最大连通域中的节点数目。

收稿日期: 2006-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2004CB217902); 国家自然科学基金创新群体项目(60421002)

1.2 常见复杂网络模型

现实世界中的大多数复杂系统可以用网络的形式描述。人们最初用规则网络描述真实世界的系统,例如邻近环网。由于规则网络结构的特殊性,导致规则网络所能描述系统的范围极其有限。1959年,数学家 Erdős 和 Rényi 提出了 ER 随机网络的概念^[17],大大拓展了网络研究的范围。随机网络的随机性十分符合真实网络中连接的某些特性,但是其对于动态演化系统中所表现出的一些重要特性,如社会理论中的马太效应等无法予以说明。1998年 Watts 和 Strogatz 提出小世界 (small-world) 网络的概念^[18],1999年 Barabási 和 Albert 发现无标度 (scale-free) 网络特性^[19],突破了随机网络模型的束缚,揭示了复杂系统网络结构所包含的各类特征,为复杂网络研究提供了基础。

1.3 电力网络的结构拓扑建模

应用复杂网络的成果研究电网特性,首先是要将电网简化为拓扑模型。简化原则可以简单描述为:节点(也称为顶点)就是发电机、负荷和变电站,边就是传输线。详细原则如下:

a. 考虑除电厂和变电站母线外的所有线路,本文中的网络模型用于实际系统的脆弱性分析,因此要求其对物理系统有较高的建模精度;

b. 网络中所有节点分为 3 个集合,发电机节点集 S_G ,负荷节点集 S_L ,变电站节点集 S_T ,分别有 N_G 、 N_L 和 N_T 个;

c. 所有电力线路(输电线、变压器支路)均简化为无向有权边,线路的权重定义为线路的电抗值,并定义网络中任意 2 点间的最短电气路径为 2 点间所有路径中沿线线路权重和最小的路径,最短电气路径的沿线线路权重和为最短电气距离;

d. 合并同杆并架的输电线,不计并联电容支路(消除自环和多重线路),使模型成为简单图。

发电机的权重 W_i 定义为发电机 i 在当前运行方式下的有功功率输出。

这样经过初步简化,电网就成为一张有 n 个节点和 k 条边的稀疏连通图,由 $n \times n$ 连接权矩阵 $\{E_{ij}\}$ 和 $n \times 1$ 权重矩阵 $\{W_i\}$ 表示。对华中-川渝电网进行拓扑结构建模,该大区电网共有 3315 个节点、3142 条边,其中 $n_G=316$, $n_L=659$, $n_T=2340$ 。

1.4 基于小世界网络模型的脆弱线路分析

研究表明,部分电力网络具有小世界网络的特性,即具有较大的聚类系数和较小的平均距离。WS 模型通过以某个很小的概率 p 切断规则网络中原始的边,并随机选择新的节点重新连接来构造小世界网络^[16]。在小世界网络的构造过程中重连概率 p 决定了网络的随机性: $p=0$ 时 WS 模型构造出的是规则网络; $p=1$ 时构造出的是随机网络; $0 < p < 1$ 时构造出的是小世界网络。从小世界网络的构造过程看,边的重连过程为网络引入了极少量的远程连接,正是由于这些“捷径”的存在,使得小世界网络具有较小

的平均路径长度。网络拓扑模型与随机性的关系如图 1 所示。

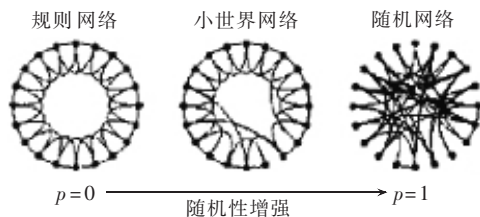


图 1 网络拓扑模型与随机性的关系

Fig.1 Relationship between network model and randomness

在实际电力系统中,这些远程连接的存在使得电力网络中负荷节点与发电机节点之间保持较小的电气距离。而当这些远程连接发生故障时,会极大地降低电力网络的输电能力,导致局部电网的功率不平衡,最终引起电力系统稳定性的破坏,因而这些远程连接对电力系统的稳定性有着重要作用。

上述分析表明,如果能够辨识出这些远程连接,就表示同时找到了电力系统的脆弱环节。

1.5 高介数线路与远程连接的关系

本文设计了 2 种线路连锁攻击模式。

a. 高介数连锁攻击模式:采取连锁攻击介数最大的线路,即每次选择一定量介数最高的线路断开后,重新计算剩余系统各线路的介数和系统的最大连通域的大小,然后再攻击剩余系统介数最大的线路,以此类推。

b. 随机连锁攻击模式:采集随机选取线路攻击方式,即每次随机选择一定量的线路断开后,重新计算系统的最大连通域的大小,然后再随机选择线路断开,以此类推。

针对华中-川渝电网的攻击实验结果如图 2 所示。图中,曲线 1 为每次随机选择 1 条线路断开的随机连锁攻击实验结果,曲线 2 为每次随机选择 9 条线路断开的随机连锁攻击实验结果,曲线 3 为每次选择 1 条高介数线路断开的高介数连锁攻击实验结果;横轴为连锁攻击的次数,纵轴为剩余最大连通域百分比,定义为

$$Y(t) = G(t) / G(0) \quad (4)$$

式中 $G(t)$ 为 t 次连锁攻击后系统最大连通域的大小, $G(0)$ 为连锁攻击前系统最大连通域的大小。

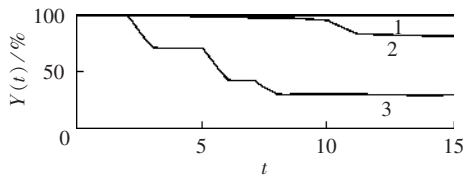


图 2 连锁攻击下最大连通域大小的变化曲线

Fig.2 Variation of connected grid size under chain-attack

观察图 2,每次随机选择 1 条断开的随机连锁攻击对整个网络的连通性几乎没有任何影响;每次随机选择 9 条断开的随机连锁攻击对整个网络的连通性

影响也不是非常严重,即使在连锁攻击 15 次后,此时已经随机选择并断开了 $9 \times 15 = 135$ 条线路,系统的剩余最大连通域百分比仍然有 80%;而每次选择 1 条高介数线路断开的高介数连锁攻击则对系统的连通性影响非常大,连锁攻击 3 次后系统的剩余最大连通域百分比为 70%,连锁攻击 8 次后系统的剩余最大连通域百分比下降至 30%。

以上实验说明高介数线路对整个电力网络的连通性有着重要的影响。同时,也表明了,在电力网络中,高介数线路就是那些对小世界特性有重要影响的远程连接。因此,可以使用线路介数指标作为电力网络脆弱线路的辨识指标。

2 基于复杂网络理论的电力网络脆弱线路辨识方法

2.1 带权重线路介数指标

1.4 和 1.5 节已经说明高介数线路对电力网络的脆弱性有着重要影响。但是,实际电力系统中除网络拓扑结构外,发电机的分布和出力也对系统稳定性有着重大影响。因此,这里定义了带权重线路介数 B_{LW} 。若线路 (m,n) 被发电机 i 与负荷 j 间最短电气路径经过,则该线路需承担发电机 i 带来的负载 W_i 。定义线路 (m,n) 的带权重线路介数 $B_{LW}(m,n)$ 为其因被网络中发电机与负荷之间的最短电气距离经过而承受的负载和,如式(5)所示。

$$B_{LW}(m,n) = \sum_{k \in S_w} W_k \quad (5)$$

式中 S_w 为经过线路 (m,n) 的最短电气路径的发电机序号的集合。

该方法在计算最短电气距离时可能会绕过一些重要线路,如图 3 所示。图 3 中,若路径 $(1,3,4)$ 相对于路径 $(1,2,4)$ 更短,则所有从节点 1 到节点 4 的最短电气路径都会走路径 $(1,3,4)$ 而绕过路径 $(1,2,4)$,导致线路 $(1,2)$ 和线路 $(2,4)$ 的带权重线路介数远低于线路 $(1,3)$ 和线路 $(3,4)$ 。但是,在实际系统中线路 $(1,2)$ 与线路 $(1,3)$ 中的任一线路的三相接地故障都会使得大量功率向故障点注入,导致从左向右输电通道的中断,即 2 种故障对系统的影响是相近的。

因此,采取将电力网络中线路的介数指标提高到与其相邻的所有线路中介数指标最高的介数值的办法来弥补这个缺陷,如式(6)所示。

$$B_{LW}(m,n)' = \text{MAX}(B_{LW}(m,i), B_{LW}(j,n)) \quad (6)$$

式中 (m,i) 和 (j,n) 分别表示所有与节点 m 和节点 n 相连的线路。

2.2 脆弱线路的辨识方法

基于以上分析,给出辨识脆弱线路的方法如下:

a. 由电力网络的实际电网数据根据 1.3 节中的

简化原则进行简化,获得连接权矩阵 $\{E_{ij}\}$ 及发电机权重矩阵 $\{W_i\}$;

b. 根据连接权矩阵 $\{E_{ij}\}$ 计算整个网络的最短电气距离矩阵 $\{L_{ij}\}$;

c. 寻找所有发电机与负荷之间的最短电气路径集 S_L ;

d. 使用式(5)对最短电气路径集 S_L 进行处理,计算每条线路的带权重线路介数 $B_{LW}(m,n)$;

e. 使用式(6)对 d 求出的带权重线路介数进行处理,得到最终的带权重线路介数 $B_{LW}(m,n)'$ 并排序;

f. 确定排序靠前的线路为脆弱线路。

下面通过一个简单例子说明具体的辨识步骤。如图 4 所示,该电网中有 4 个负荷节点,2 个发电机节点,图中所有线路的权重均为 1,发电机 G_1 的权重 $W_{G1} = 20$,发电机 G_4 的权重 $W_{G4} = 30$ 。下面描述具体计算过程。

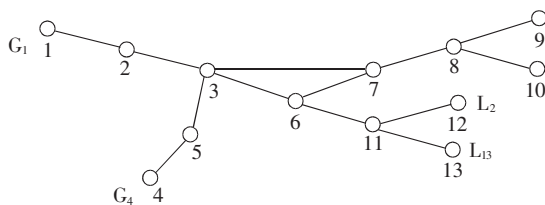


图 4 示例电网

Fig.4 Example power grid

步骤 1 计算 $\{L_{ij}\}$ (略)。

步骤 2 寻找所有发电机与负荷间的最短路径集 S_L : $1-2-3-6-7-8-9$, $1-2-3-6-7-8-10$, $1-2-3-6-11-12$, $1-2-3-6-11-13$, $4-5-3-6-7-8-9$, $4-5-3-6-7-8-10$, $4-5-3-6-11-12$, $4-5-3-6-11-13$ 。

步骤 3 根据式(5)计算所有线路的带权重线路介数: $B_{1-2} = 80$, $B_{2-3} = 80$, $B_{3-5} = 120$, $B_{3-6} = 200$, $B_{3-7} = 0$, $B_{6-7} = 100$, $B_{4-5} = 120$, $B_{7-8} = 100$, $B_{8-9} = 50$, $B_{8-10} = 50$, $B_{6-11} = 100$, $B_{11-12} = 50$, $B_{11-13} = 50$ 。

步骤 4 根据式(6)重新计算所有的带权重线路介数: $B_{1-2} = 80$, $B_{2-3} = 200$, $B_{3-5} = 200$, $B_{3-6} = 200$, $B_{3-7} = 200$, $B_{6-7} = 200$, $B_{4-5} = 120$, $B_{7-8} = 100$, $B_{8-9} = 100$, $B_{8-10} = 100$, $B_{6-11} = 200$, $B_{11-12} = 100$, $B_{11-13} = 100$ 。

步骤 5 按带权重线路介数的脆弱性排序: $B_{2-3} = 200$, $B_{3-5} = 200$, $B_{3-6} = 200$, $B_{3-7} = 200$, $B_{6-7} = 200$, $B_{6-11} = 200$, $B_{4-5} = 120$, $B_{7-8} = 100$, $B_{8-9} = 100$, $B_{8-10} = 100$, $B_{11-12} = 100$, $B_{11-13} = 100$, $B_{1-2} = 80$ 。

3 算例分析

3.1 IEEE 39 节点系统分析

IEEE 39 节点系统如图 5 所示。

首先,按照 1.3 节的建模原则对 IEEE 39 节点系统进行抽象。该电网共有 39 个节点,46 条边,其中 $n_G = 10$, $n_L = 17$, $n_T = 12$ 。然后,使用 2.2 节中的方法对 IEEE 39 节点系统进行脆弱线路辨识。选取带权重线路介数超过 6000 的为脆弱线路,共有 13 条。

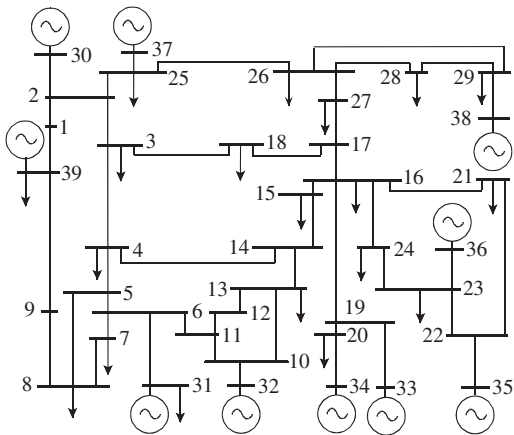


图 5 IEEE 39 节点系统
Fig.5 IEEE 39-bus system

然后,使用 PST 2.0 软件进行时域验证。在 0.1 s 时于线路两端电压较高的母线出口处设置三相接地短路故障,0.225 s 时清除故障(由于 IEEE 39 节点系统比较强壮,100 ms 以内的故障对系统的稳定性影响不大,为了验证,所以将故障时间延长为 125 ms),记录 10 s 内所有 10 台发电机的转速偏差曲线。除那些与故障线路直接相连的发电机外,如果发电机转速偏差 $\Delta\omega$ 不大且最终能够回到系统稳定时的转速,判定此线路为非脆弱线路,如图 6 中曲线 1(线路(12,13)故障)所示;如果有发电机转速偏差过大且最终不能回到系统稳定时的转速,则判定此线路为脆弱线路,如图 6 中曲线 2(线路(15,16)故障)所示。

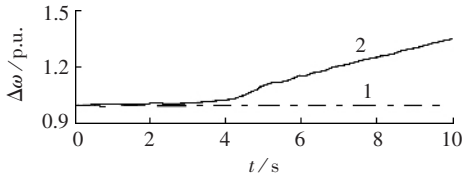


图 6 发电机 32 在不同故障时的
转子速度偏差曲线
Fig.6 Speed deviation of machine
32 under different faults

经过时域验证其中有 4 条线路确认为脆弱线路,结果列于表 1(B_{LW} 为对应线路的带权重线路介数, P 为线路有功功率);带权重线路介数排名 13 以后的线路经时域验证均为非脆弱线路。

表 1 IEEE39 节点系统中的脆弱线路
Tab.1 Critical lines in IEEE 39-bus system

线路名称	B_{LW}	B_{LW} 排序	$P/\text{p.u.}$	$ P $ 排序
L_{15-16}	11 200	1	-3.1491	20
L_{16-17}	11 200	2	2.2999	27
L_{2-25}	8000	8	-2.3908	26
L_{21-22}	6800	11	-6.0442	5

可以看到,除线路 L_{21-22} 外,其他 3 条线路所传输的有功功率在全网中属于中等。这些脆弱线路的共同特征是均处于重要输电通道之上,其故障会直接引起输电通道的中断,导致部分区域功率供给不足,以致系统发生功角失稳。比如线路 L_{15-16} 或者线路 L_{16-17} 发生三相接地短路故障,导致发电机 33、

34、35、36 的功率无法外送,引起系统其余部分大量功率供给不足,最终引起系统功角失稳。因此,分析电力网络的脆弱线路时不能只依据线路承担的功率,同时还需考虑线路在整个网络中所处的位置。

3.2 华中-川渝电网分析

1.3 节已完成了对该电网的建模。使用 2.2 节中的方法对华中-川渝电网进行脆弱线路辨识得各条线路的带权重线路介数。将 3142 条线路按照带权重线路介数值的大小从左向右依次排列,如图 7 所示, N 为节点排列序号。曲线在带权重线路介数值 10^4 左右处出现一个拐点。在拐点左侧带权重线路介数值增加缓慢;而在拐点右侧带权重线路介数值增加的速度要快得多。这说明在网络中存在少量带权重线路介数值很高的线路。保守地选取带权重线路介数大于 10^4 的线路为脆弱线路,共 571 条。

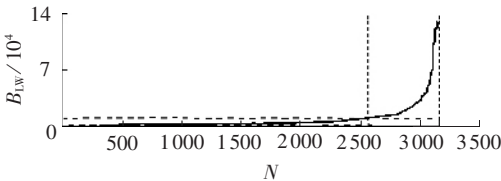


图 7 带权重线路介数曲线
Fig.7 Weighted line betweenness curve

然后,使用 PSASP6.2 电力系统综合分析应用程序进行时域验证。在 0.1 s 时于线路两端电压较高的母线出口处设置三相接地短路故障,0.4 s 时清除故障(由于华中-川渝电网比较强壮,100 ms 以内的故障对系统的稳定性影响不大,所以将故障时间延长为 300 ms),记录 10 s 内所有 316 台发电机的转速偏差曲线。脆弱线路的判定原则同 3.1 节。

经过时域仿真验证,这 571 条线路中共有 153 条为脆弱线路;而带权重线路介数小于 10^4 的线路经验证全部为非脆弱线路。

图 8 为该大区电网的主干图,带权重线路介数排名前 10 的线路中有 7 条出现在该主干图中(在图中均使用粗线标示)。图中的节点 1 为三峡左变电站,节点 5 为斗笠变电站,节点 7 为左换变电站,节点 8 为江陵变电站。从整体上看,这些高介数线路和节



图 8 华中-川渝电网骨干网架
Fig.8 Backbone of Huazhong
-Chuanqu power grid

点均处于川渝电网向华中电网西电东送的通道上,该通道正常情况下输送 1520 MW。如果这些线路发生严重故障(三相接地短路故障),会导致输电通道中断,引起受端系统(华中电网)内部产生大量功率供给不足,最终导致华中电网失稳。

在验证中还发现,在 153 条脆弱线路中有 30 条线路的电压等级小于等于 220 kV。这与通常的观点大相径庭,因为 220 kV 线路所输送的功率相对于 500 kV 线路而言要少得多。通过分析,发现这些线路大都位于发电机节点密集区域的功率外送通道上,这说明在判断电力网络中脆弱线路的时候,不能仅仅依靠线路所传输的功率,同时还要考虑线路在电网整体结构中所处的位置。本算例也说明该方法能够辨识那些传输功率不多,但是由于其在整个电网结构中的特殊位置对系统有重大影响的线路。

4 结论

本文提出了一种基于复杂网络理论的大规模电力系统脆弱线路辨识方法。该方法同时考虑电力网络拓扑结构特性以及电网电气特性,能够较好地辨识那些承担功率不多,但是由于其在电网拓扑中的特殊位置而对系统产生重大影响的线路。这种辨识方法是复杂网络理论与电力系统分析相结合的一次探索,同时也为电力系统脆弱性分析提供了一种新的思路,值得进一步深入研究。

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 recommendation [EB/OL]. [2004-04-05]. <http://www.nerc.com>.
- [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.
YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North American power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [4] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): T2-T6.
HU Xue-hao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North American power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): T2-T6.
- [5] 赵希正. 强化电网安全 保障可靠供电——美加“8.14”停电事故给我们的启示[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7.
ZHAO Xi-zheng. Strengthen power system security to ensure reliable delivery[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-7.
- [6] 唐葆生. 伦敦地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.
TANG Bao-sheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [7] 孙可,韩祯祥,曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1-9.

- SUN Ke, HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Review on models of cascading failure in complex power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 1-9.
- [8] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]// Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii: [s.n.], 2001: 710-718.
- [9] BAE K, THORP J S. A stochastic study of hidden failures in power system protection[J]. Decision Support Systems, 1999, 24(3): 259-268.
- [10] CHEN J, THORP J S. Study on cascading dynamics in power transmission systems via a DC hidden failure model [C]// Proceedings of the IEE Fifth International Conference on Power System Management and Control. London, UK: IEE Press, 2002: 384-389.
- [11] DOBSON I, CHEN J, THORP J S, et al. Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events [C]// Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii: [s.n.], 2002: 7-10.
- [12] STUBNA M D, FOWLER J. An application of the highly optimized tolerance model to electrical blackouts[J]. Int J of Bifurcation and Chaos, 2003, 13(1): 237-242.
- [13] CARRERAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power blackouts [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii: [s.n.], 2000: 102-108.
- [14] 曹一家,江全元,丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1-5.
CAO Yi-jia, JIANG Quan-yuan, DING Li-jie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 1-5.
- [15] 孟仲伟,鲁宗相,宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
MENG Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [16] 丁明,韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(增刊): 118-122.
DING Ming, HAN Ping-ping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(Supplement): 118-122.
- [17] ERDŐS P, RÉNYI A. On the evolution of random graphs[J]. Publ Math Inst Hung Acad Sci, 1960(5): 17-61.
- [18] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small world’ networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [19] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

曹一家(1969-),男,湖南益阳人,长江学者特聘教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统优化与控制、进化计算与计算智能、智能控制系统与决策(E-mail: yijiacao@zju.edu.cn);

陈晓刚(1980-),男,浙江杭州人,博士研究生,研究方向为电力系统安全分析与控制(E-mail: carlxcg1980@126.com);

孙可(1980-),男,吉林吉林人,博士研究生,研究方向为复杂系统理论在电力系统分析与控制中的应用(E-mail: ssunke@sina.com)。

(下转第 31 页 continued on page 31)

Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory

CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Critical lines may have serious impacts on large scale blackouts and cascading failures in power grid. Based on complex network theory, the weighted line betweenness is proposed as line vulnerability index, which is defined as the sum of currents through the line as the shortest electric path between generator nodes and load nodes. The weighted line betweenness is then modified to the highest betweenness of all neighboring lines. Vulnerability analysis is carried out on the IEEE 39-bus system and the Huazhong-Chuanyu power grid, and the time-domain simulation results verify that the weighted line betweenness can identify critical lines, which have light loads but great impacts on line vulnerability due to their special position in the power grid.

This project is supported by the National Basic Research Program (973 Program) (2004 CB217902) and the Innovative Research Group Fund of Natural Science Foundation of China (60421002).

Key words: vulnerable line; power system stability; complex network; blackouts