

计及灵敏度因子的加权电气介数在电网脆弱性线路识别中的应用

徐青山¹, 王伟¹, 刘建坤², 刘中泽¹, 辛建波³, 许庆强²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

3. 江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 基于复杂网络理论, 通过引入“发电机-负荷”节点对之间的灵敏度因子, 重新定义了计及灵敏度因子的加权电气介数, 用于电网的脆弱性线路识别。通过修正发电机、负荷节点在加权电气介数计算过程中的权重来强化“发电机-负荷”节点对之间的潮流指向性。以 IEEE 9 节点系统和 IEEE 39 节点系统作为测试算例, 求解各线路的加权电气介数值并以此对脆弱线路进行排序, 对排序靠前的脆弱线路分别进行 $N-1$ 小干扰稳定性校验和静态攻击稳定性校验, 校验结果验证了所提方法的正确性。

关键词: 加权电气介数; 灵敏度因子; 脆弱性线路; $N-1$ 校验; 静态攻击; 稳定性; 模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.009

0 引言

近年来, 世界范围内的大停电事故频发^[1-3], 尤其是 2012 年 7 月 30 日和 31 日 2 天发生在印度的大停电事故, 其造成的严重后果(全国超过一半地区停电, 逾 6 亿人口受到影响)使得印度电网的网架结构和调度管理模式引起关注。监测数据和事故分析的结论显示, 此次大停电事故的最初起因是印度北部省份的局部地区夏季负荷增长远超预期, 致使部分线路和网络元件长期过载后发生故障停运, 波及到另一些在系统稳定中扮演重要角色的脆弱性线路, 进而产生网络元件故障的连锁反应直至最终电网暂态失稳, 系统崩溃。因此, 若能预先识别出这些脆弱性线路并给出针对性的应对措施, 防患于未然, 则有望在很大程度上降低类似大停电事故发生的概率, 并间接提升电力系统的供电可靠性。

目前, 用于识别电网脆弱性线路的指标主要有线路的介数、平均路径长度、输电效率等^[4], 其中以介数类指标最为常见。文献[5]最早提出使用节点或支路的介数来辨识该节点或支路在整个电网中的重要程度; 文献[6]则以北美电网为算例, 验证了介数指标的有效性; 文献[7]进一步提出了加权介数的概念, 即以线路的电抗来定义线路的权重; 文献[8]则

针对“潮流沿最短路径流动”这一与电网实际略显不符的假设缺陷, 通过基尔霍夫电流定律考察“发电机-负荷”节点对之间的功率传输对各线路的占用情况, 并据此给出了电气介数的定义。

本文在文献[7-8]的基础上, 提出用计及灵敏度因子的加权电气介数来辨识电网的脆弱性线路。通过灵敏度因子的引入来弥补文献[8]中发电机与负荷节点权重取值区分度的不足。最后, 在 IEEE 9 节点和 IEEE 39 节点网络中, 以 $N-1$ 小干扰稳定性校验和静态攻击 2 种方式验证了本文模型的正确性。

1 电气介数和加权电气介数

线路的介数指被网络中所有“发电机-负荷”节点对之间的最短路径所经过的次数^[7]。作为复杂网络理论^[9-11]中最为关键的特征参数之一, 介数指标在解释复杂网络模型的拓扑构型和电气特性时, 物理意义清晰且方便量化, 因而在电网脆弱性线路识别的研究中获得了大量的应用。

文献[8]结合电力系统潮流传播的特点, 定义了线路 (m, n) 的电气介数 $B_e(m, n)$:

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

其中, $I^i(m, n)$ 为在“发电机-负荷”节点对 (i, j) 之间外接单位注入电流元后, 在线路 (m, n) 上引起的电流, 意在反映网架结构对线路电气介数指标的影响; W_i 和 W_j 分别为发电机节点 i 和负荷节点 j 的权重因子, 意在反映电网运行方式的变化对线路电气介数指标的影响; G 和 L 分别为全网发电机、负荷节点的集合。

由复杂网络理论和电气剖分理论^[12]可知, 电网中某一节点的负荷, 其主要的功率来源应为系统中的

收稿日期: 2012-11-30; 修回日期: 2013-08-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050214); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012753); 国家电网公司科技项目(52182013000V); 江苏省电力公司科技项目(J2013073)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA05-0214), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation(BK2012-753), the Science and Technology Project of State Grid(521820-13000V) and the Science and Technology Project Funded by Jiangsu Electric Power Company(J2013073)

某一台或者某几台发电机;且“发电机-负荷”节点对之间的功率传输通常都具有一定的路径选择特性。然而,式(1)中,在“发电机-负荷”节点对 (i,j) 之间外接单位注入电流元后,由基尔霍夫电流定律,全系统的所有线路上都将流过电流,这与电网潮流的实际情况显然不太相符。考虑到上述假设缺陷对线路电气介数指标求取可能造成的误差,本文在计算全网线路的脆弱性指标时,引入了“发电机-负荷”节点对之间的灵敏度,通过灵敏度因子的加入来修正发电机与负荷节点在参与电气介数计算时的权重取值,以期能够更好地体现出“发电机-负荷”节点对之间潜在的潮流指向性^[12]。重新定义后的加权电气介数 $B(m,n)$:

$$B(m,n) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} \theta_{ij} |I^i(m,n)| \quad (2)$$

其中, θ_{ij} 为负荷节点 j 的有功功率对发电机节点 i 有功出力的灵敏度,其值越大,表示负荷节点 j 和发电机节点 i 之间的电气关联越紧密。

显然,灵敏度因子的加入会对全网线路电气介数指标排序的结论产生影响。

2 灵敏度因子的计算流程

灵敏度分析是研究一个系统的状态或输入输出量的变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法^[13-14]。电力系统作为世界上已知的最为复杂和庞大的人造系统,其内部的状态变量和控制变量时刻都在发生着不可预知的变动。求取系统内状态变量或控制变量对其相关变量变化的敏感程度,对了解和评价系统的参数及其运行特性的合理性十分必要。目前常用的灵敏度分析指标体系包括母线灵敏度指标、支路灵敏度指标和发电机灵敏度指标^[15-17]等。

鉴于本文中的灵敏度指标只涉及发电机节点和负荷节点,因而需要对用于潮流计算的雅可比矩阵进行降阶,消去电网中除发电机节点和负荷节点之外的中间节点。

电力系统潮流计算中修正方程的一般形式为:

$$\Delta Y = J \Delta X \quad (3)$$

其中, J 为极坐标形式下的系统全阶雅可比矩阵; $\Delta Y = [\Delta P \ \Delta Q]^T$ 为系统各节点注入功率的变化量; $\Delta X = [\Delta \theta \ \Delta U]^T$ 为系统的各节点电压和相角的变化量。

通过将电网节点进行客观分类,给雅可比矩阵的降阶创造条件:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_I \\ \Delta Y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{II} & J_{IB} \\ J_{BI} & J_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_I \\ \Delta X_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,下标 I 代表有功率注入的“注入节点”(负荷节

点视为有负的功率注入),下标 B 代表没有功率注入的“中间节点”。当区域电网外部网络电压的波动可以忽略不计时,电网内部中间节点的注入功率变化量同样可以近似忽略不计^[18],即 $\Delta Y_B \approx 0$ 。将式(4)展开:

$$\begin{cases} \Delta Y_I = J_{II} \Delta X_I + J_{IB} \Delta X_B \\ 0 = J_{BI} \Delta X_I + J_{BB} \Delta X_B \end{cases} \quad (5)$$

一般的, J_{BB} 非奇异,通过矩阵运算消去 ΔX_B ,可得:

$$\Delta Y_I = (J_{II} - J_{IB} J_{BB}^{-1} J_{BI}) \Delta X_I = J_I^p \Delta X_I \quad (6)$$

其中, J_I^p 为经过降阶的雅可比矩阵,对 J_I^p 求逆,即得到全网“发电机-负荷”节点对的灵敏度因子矩阵 J_{sc} 。

灵敏度因子的计算流程如图 1 所示。

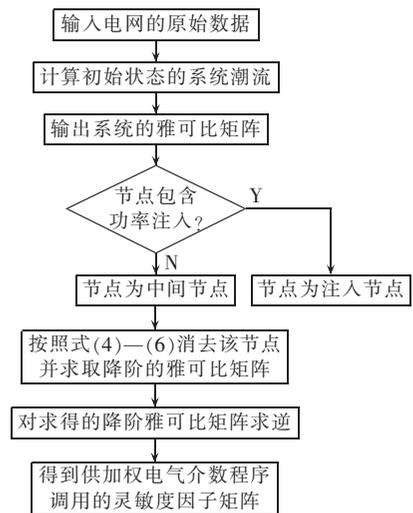


图 1 灵敏度因子的计算流程

Fig.1 Flowchart of sensitivity factor calculation

3 攻击模式的选择

3.1 $N-1$ 小干扰稳定性校验

所谓低频振荡,即系统受到干扰后,由于阻尼不足或负阻尼,导致发电机转子之间相对摇摆,输电线路上的功率持续振荡的现象(振荡频率一般在 0.1~2.5 Hz 之间)。低频振荡在发生初期很难被察觉到,若处置不及时,极易引发连锁反应式的大停电事故。随着我国电力系统大区互联的逐步推进,网架规模不断扩张,低频振荡对电网稳定性的威胁也与日俱增^[19]。鉴于低频振荡模式与小干扰稳定的强相关性,本文将首先以 $N-1$ 小干扰稳定性校验来验证加权电气介数指标在识别电网脆弱性线路时的有效性。

$N-1$ 小干扰稳定性校验是电力系统稳定性校验中最为常见的攻击模式之一,它能够对因需要(如例行检修)或是故障造成某一网络元件退运时的系统稳定性进行快速而有效的在线或离线评估,从而为电网的规划和调度运行提供必要的参考和建议^[20]。本文将通过分别开断若干条高加权电气介数值线路的方式,来对比各 $N-1$ 网络小干扰稳定性水平的优劣。具体差异的量化结果通过特征值分析的方法给出。

特征值分析是电力系统小干扰稳定分析中应用最为普遍的方法之一。采用特征值分析法,可以方便直观地求出系统所包含的所有振荡模式和非振荡模式,即系统状态矩阵的一个实特征根对应系统的一个非振荡模式,一对共轭复根对应系统的一个振荡模式^[21]。对于共轭复根

$$\lambda = \delta \pm j\omega \quad (7)$$

实部 δ 表征了系统对该振荡模式的阻尼,其中,负实部对应正的阻尼,即促使振幅逐步衰减,零实部对应无阻尼的等幅振荡,而正实部对应负的阻尼,即促使振幅逐步增大。显然,只有系统状态矩阵所有特征值的实部均为负值,系统才能够渐近趋稳。虚部 ω 表征了该振荡模式的频率。

评价各 $N-1$ 网络小干扰稳定性水平的优劣,拟采用阻尼比指标 ξ ^[22]:

$$\xi = \frac{-\delta}{\sqrt{\delta^2 + \omega^2}} \quad (8)$$

$\xi < 0$ 时,该振荡模式不稳定; $\xi = 0$ 时,该振荡模式临界稳定; $\xi > 0$ 时,该振荡模式稳定,且 ξ 的值越大,该振荡模式的稳定裕度越大,反之亦然。

3.2 静态攻击

考察电网安全性和电网故障的连锁反应机理,常见的攻击模式包括静态攻击、随机攻击和动态攻击^[7]等。

本文选用连锁故障攻击仿真中最为常用的静态攻击模式,按照加权电气介数值的高低排序依次切除电网中的若干条线路,考察系统暂态稳定性指标的恶化趋势。

然后按照文献[8]模型对应的排序顺序重新进行上述静态攻击。2次仿真具体差异的量化结果在DIGSILENT/PowerFactory 软件中的暂态稳定性时域仿真图中体现。

4 算例分析

4.1 算例系统

为了验证本文模型的有效性和正确性,选用 IEEE 9 节点和 IEEE 39 节点网络作为算例系统分别如图 2、3 所示。IEEE 9 节点网络包含 3 台发电机、3 个负

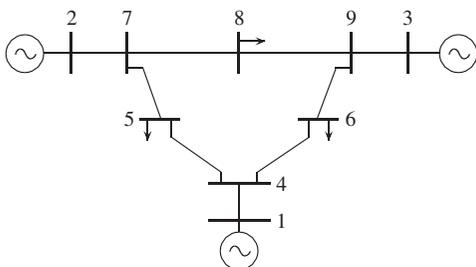


图 2 IEEE 9 节点系统结构

Fig.2 Structure of IEEE 9-bus system

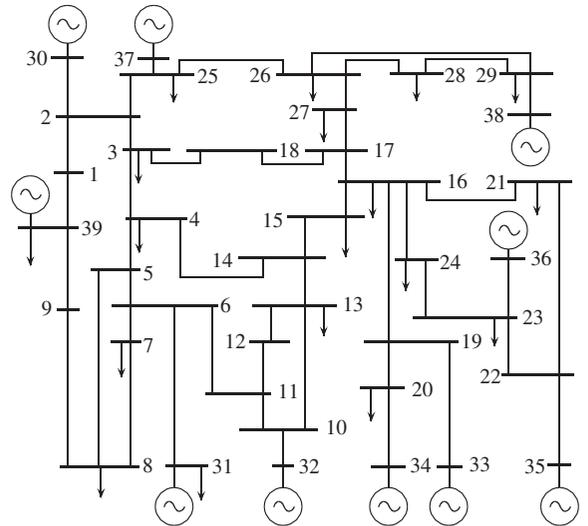


图 3 IEEE 39 节点系统结构

Fig.3 Structure of IEEE 39-bus system

荷和 9 条支路;其中,1 号发电机(母线 1 所接发电机,后类似)为该系统的平衡机。IEEE 39 节点系统为北美新英格兰州的一个实际的区域电网,包括 10 台发电机、19 个负荷和 46 条支路;其中,31 号发电机为该系统的平衡机。

4.2 脆弱性线路识别

使用本文提出的计及灵敏度因子的加权电气介数对上述 2 个算例系统分别进行脆弱性线路识别。限于篇幅,仅将部分结果列于表 1 和表 2,并与采用文献[8]模型计算所得的仿真结论进行了对比。

表 1 IEEE 9 节点系统脆弱性线路识别
Tab.1 Vulnerable line identification for IEEE 9-bus system

脆弱线路	本文模型排序	文献[8]模型排序
2-7	1	1
7-8	2	2
3-9	3	4
5-7	4	6
8-9	5	3
6-9	6	5

表 2 IEEE 39 节点系统脆弱性线路识别
Tab.2 Vulnerable line identification for IEEE 39-bus system

脆弱线路	本文模型		文献[8]模型 电气介数排序
	介数值	排序	
16-17	79.3438	1	1
17-27	59.7128	2	5
2-25	51.6435	3	6
15-16	51.1784	4	2
16-19	46.1134	5	4
14-15	45.9777	6	3

IEEE 9 节点网络中,脆弱线路排序的前 2 位,本文模型与文献[8]模型的仿真结论一致,但第 3—6 位的排序出现偏差。

IEEE 39 节点网络中,线路 16-17 的加权电气介

数值排在所有线路的第 1 位,与文献[8]模型的仿真结论一致,但第 2—6 位的排序出现偏差,需要在后续的仿真验证中重点关注。

另外,IEEE 39 节点系统中,线路 16-17 所承担的传输功率经潮流计算为 205.68 MW,并非重载线路。由此可见,线路的脆弱性程度主要与其在系统中所处的拓扑位置有关,而与其自身所承担的传输功率的大小关系不大。

4.3 N-1 小干扰稳定性校验

通过 DIgSILENT/PowerFactory 内置的模态分析 (Modal analysis) 子模块,算得 IEEE 9 节点和 IEEE 39 节点网络的特征值分布。考虑到 IEEE 9 节点网络的网架规模较小,本文仅仅关注其电气介数指标排序第 1—3 位的线路。对线路 3-9 和 8-9 分别进行 N-1 小干扰稳定性校验,算得 2 次 N-1 后各 N-1 网络中的最小阻尼比及其所对应的振荡模式,列于表 3。表 3 中,线路 3-9 的最小阻尼比要明显小于线路 8-9,从而在一定程度上验证了本文模型的有效性和正确性。

表 3 IEEE 9 节点系统的 N-1 校验
Tab.3 N-1 verification for IEEE 9-bus system

开断线路	最小阻尼比/%	对应的振荡模式
3-9	5.248	-0.772±j12.452
8-9	6.192	-0.588±j11.199

对表 2 给出的 IEEE 39 网络中加权电气介数值排名第 1—6 位的这 6 条线路,分别进行线路的 N-1 小干扰稳定性校验,算得 6 次 N-1 后各 N-1 网络中的最小阻尼比及其所对应的振荡模式,列于表 4。

表 4 IEEE 39 节点系统的 N-1 校验
Tab.4 N-1 verification for IEEE 39-bus system

开断线路	最小阻尼比/%	对应的振荡模式
16-17	4.108	-0.385±j9.356
17-27	5.976	-0.536±j8.950
2-25	6.090	-0.530±j8.693
15-16	6.111	-0.548±j8.955
16-19	6.134	-0.548±j8.917
14-15	6.242	-0.577±j7.496

表 4 中,线路 16-17 开断后,IEEE 39 节点网络的最小阻尼比为 4.108%,小于 5%,属于需要给予特别关注的振荡模式^[23]。由此可见,线路 16-17 在 IEEE 39 节点网络中的脆弱性程度最严重。随着 N-1 校验所切除线路加权电气介数值的不断下降,其开断后 IEEE 39 系统的最小阻尼比不断增大,相应振荡模式的稳定裕度也有明显提升。通过上述计算,再次验证了依据本文模型所求得的电网脆弱性线路排序的有效性和正确性。

4.4 静态攻击下电网的暂态稳定性研究

对 IEEE 9 节点网络进行静态攻击时,首先按照本文模型的排序顺序依次开断 2-7、7-8、3-9 这 3 条线路,使用 DIgSILENT/PowerFactory 的 RMS 暂稳分析子模块进行发电机转子角的时域分析,选择 3 号发电机作为研究对象,其转子角如图 4 所示。仿真时长设为 10 s。

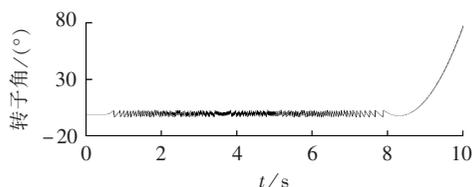


图 4 按照本文模型的排序顺序进行静态攻击
Fig.4 Static attack according to sequence sorted by proposed model

再按照文献[8]模型对应的排序顺序依次开断 2-7、7-8、8-9 这 3 条线路,重复上述仿真过程,得到 3 号发电机转子角如图 5 所示。

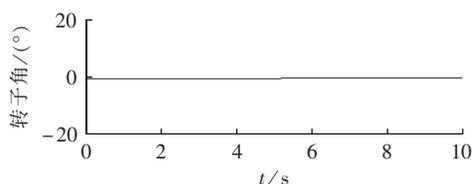


图 5 按照文献[8]模型的排序顺序进行静态攻击
Fig.5 Static attack according to sequence sorted by model in reference[8]

仿真结论显示,在第 1 次静态攻击的过程中,由于 2-7 和 3-9 这 2 条线路都先后退运,直接导致了 2 号和 3 号的这 2 台发电机先后与系统失去同步;而第 2 次静态攻击的过程中,由于线路 3-9 并未退运,3 号发电机仍然能够与系统保持同步,此时的系统虽然失去了 2 号发电机的出力及节点 8 上的全部负荷,但整体的功角稳定性未遭毁灭性破坏,仍能够继续维持。

对 IEEE 39 节点网络进行静态攻击时,同样先按照本文模型的排序顺序依次开断 16-17、17-27、2-25 这 3 条线路。再按照文献[8]模型对应的排序顺序依次开断 16-17、15-16、14-15 这 3 条线路,重复上述仿真过程。选择 33 号发电机作为研究对象,仿真时长设为 30 s。

对比图 6 和图 7 的 33 号发电机转子角波形不难发现,按照文献[8]模型对应的排序顺序对 IEEE 39 节点网络进行静态攻击后,33 号发电机的转子角经过短暂扰动后能够迅速恢复同步,系统的功角稳定性未遭严重破坏。由仿真输出报告可知,母线 15 及其所带的负荷将完全脱网,电网的其余部分能够达到一个新的稳定运行点,系统成功穿越故障。而按

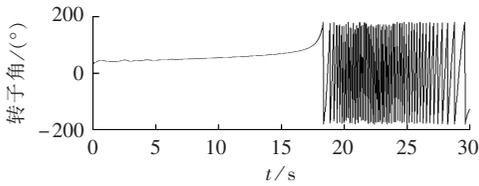


图 6 按照本文模型的排序顺序进行静态攻击
Fig.6 Static attack according to sequence sorted by proposed model

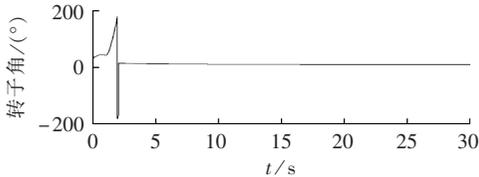


图 7 按照文献[8]的排序顺序进行静态攻击
Fig.7 Static attack according to sequence sorted by model in reference[8]

照本文模型的排序顺序对 IEEE 39 节点网络进行静态攻击后,33 号发电机的转子角在攻击发生后逐渐偏离初值,18.326 s 开始剧烈振荡,18.736 s 完全失去同步后脱网。由仿真输出报告可知,36、35、34、32、30、39 号发电机也将在随后的 3 s 内依次与电网失去同步。

综上,按照本文模型的排序顺序对电网进行静态攻击给电网本身造成的危害更大,最终导致电网发生连锁性故障事故的概率显然也更大。

4.5 讨论

4.4 节中针对 IEEE 39 节点网络的仿真结果,有 3 点需做进一步讨论。

a. 研究对象的选择。考虑到按照本文模型进行静态攻击时 33 号发电机最先失去同步,因而,将其选作研究对象,以期能够较好地反映电网遭受静态攻击后发电机暂态参数的变化趋势。若选除平衡机外的其余 8 台发电机,得到的时域仿真曲线与选 33 号发电机时基本类似,只是在时间轴上略微有所滞后。

b. 攻击规模的确定。考虑到按照本文模型的顺序连续开断 3 条高加权电气介数线路对电网产生的冲击已足够剧烈,本文并未继续开断剩余的线路。

c. 关于静态攻击开始 18.326 s 后 33 号发电机才开始振荡失去同步,可以解释为系统在临界稳定区域的摇摆时间。由特征值分析法可知,此时,系统将出现一个位于虚轴上的实根,系统在故障过程的中段进入了临界稳定状态,10 个低频振荡模式的振荡频率集中在 0.2~1.5 Hz。由临界稳定过渡到失稳应该是由低频振荡和多重故障冲击共同作用所致。

5 结论

本文在已有模型的基础上,提出将计及灵敏度因子的加权电气介数应用于电网脆弱性线路的识别。

在 IEEE 9 和 IEEE 39 节点网络中通过 $N-1$ 校验和静态攻击 2 种方式验证了本文模型的有效性。

加权电气介数值较高的线路并不意味着一定是重载线路。一旦上述线路开断或发生短路故障被保护装置切除,必然会给电力系统的稳定性和供电可靠性造成严重损害,甚至有可能引发全网潮流振荡、崩溃酿成大停电事故。

需要特别说明的是,本文中的算例验证并未深究在随机攻击的模式下,即以非脆弱性网络元件作为故障发起点的故障连锁反应机理,而是仅考察了以加权电气介数值较高的线路作为故障发起点的单一静态攻击模式。另外,鉴于静态攻击模式下电网的稳定性指标及联通性水平的下降速度已十分可观,本文未深究在动态攻击模式下算例网络的故障连锁反应机理。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] CAMERAS A, LYNCH V E, DOBSON I, et al. Complex dynamics of blackouts in power transmission system[J]. Chaos, 2004, 14(3):643-652.
- [2] 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 Baosheng. Blackout in south of London and its lessons [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [3] U.S. Secretary of Energy, Minister of Natural Resources Canada. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. Ottawa, Canada: U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004.
- [4] 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): 38-43.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. Power system vulnerability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 38-43.
- [5] MOTTER A E, LAI Yincheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 1-4.
- [6] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American Power Grid[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 025103/1-025103/4.
- [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性线路识别[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [8] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键性线路识别中的应用[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.
- [9] MEI Shengwei, NI Yixin, WANG Gang, et al. A study of self-organized criticality of power system under cascading failures based on AC-OPF with voltage stability margin[J]. IEEE Trans on Power systems, 2008, 23(4): 1719-1726.

- [10] LIN Z Z, WEN F S, CHUNG C Y, et al. Division algorithm and interconnection strategy of restoration subsystems based on complex network theory[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(6): 674-683.
- [11] ARIANOS S, BOMPARD E, CARBONE A, et al. Power grid vulnerability: a complex network approach[J]. Chaos, 2009, 19(1): 013119.
- [12] 邵莹, 于继来. 采用源流路径电气剖分信息的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 34-39.
SHAO Ying, YU Jilai. Power grid vulnerability assessment based on electrical dissection information of the electric power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 34-39.
- [13] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 46-49.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.
- [14] MAO Junfa, KUH E S. Fast simulation and sensitivity analysis of lossy transmission lines by the method of characteristics[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1997, 44(5): 391-401.
- [15] YUAN Fei, OPAL A. Noise and sensitivity analysis of periodically switched linear circuits in frequency domain[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(7): 986-998.
- [16] HISKENS I A, PAI M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid system[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2000, 47(2): 204-220.
- [17] MINGUEZ R, CONEJO A J. State estimation sensitivity analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 1080-1091.
- [18] 邵宣祥, 陈宁, 朱凌志, 等. 基于降阶雅克比矩阵的并网风电场局部静态电压支撑能力评估[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 14-19.
SHAO Yixiang, CHEN Ning, ZHU Lingzhi, et al. Reduced Jacobian matrix based method to assess local static reactive power/voltage supporting ability of interconnected wind farm[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 14-19.
- [19] MARTIN K E. Phasor measurement systems in the WECC[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006. Montreal, Canada: [s.n.], 2006: 1-7.
- [20] HU Zechun, LI Furong. Network expansion planning considering $N-1$ security criterion by iterative mixed-integer programming approach[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting 2010. New York, USA: [s.n.], 2010: 1-6.
- [21] YE Hua, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Low frequency oscillation analysis and damping based on Prony method and sparse eigenvalue technique[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference of Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. Ft Lauderdale, FL, USA: [s.n.], 2006: 1006-1010.
- [22] YANG Junzhe, LIU Chihwen, WU Wengiang. A hybrid method for the estimation of power system low-frequency oscillation parameter[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2115-2123.
- [23] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000: 56-70.

作者简介:

徐青山(1979-), 男, 江苏姜堰人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为新能源发电、微网运行与控制(**E-mail**: xuqingshan@seu.edu.cn);

王伟(1988-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统的规划与运行(**E-mail**: lingyu_seu@126.com)。

Application of weighted electric betweenness considering sensitivity factor in identification of vulnerable grid lines

XU Qingshan¹, WANG Wei¹, LIU Jiankun², LIU Zhongze¹, XIN Jianbo³, XU Qingqiang²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The sensitivity factor between generator node and load node is introduced and the weighted electric betweenness considering the sensitivity factor is redefined based on the complex network theory for the identification of vulnerable lines in power grid. The weights of generator node and load node are revised during the computation of weighted electric betweenness to strengthen the directivity of power flow between generator node and load node. The weighted electric betweenness is calculated for each line of IEEE 9-bus system and IEEE 39-bus system, and the vulnerable lines are respectively sorted. The $N-1$ small signal stability verification and static attack stability verification are carried out for the leading vulnerable lines and results show the correctness of the proposed identification method.

Key words: weighted electric betweenness; sensitivity factor; vulnerable line; $N-1$ verification; static attack; stability; models