

DOI: 10.7500/AEPS20130501005

输电线路的潮流介数及其在关键线路识别中的应用

梁 才¹, 刘文颖¹, 但扬清¹, 徐 鹏¹, 周喜超²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 国网节能服务有限公司, 北京市 100052)

摘要: 根据输电线路在电网发电负荷节点对间的功率传输中被利用的程度, 同时考虑发电容量和负荷水平的影响, 提出输电线路的潮流介数指标, 并以此作为辨识关键输电线路的判据。该判据能够适应电网不同运行方式下潮流分布的特点, 量化了输电线路在全网功率传输中的作用和贡献, 其物理背景更加符合电力系统实际。甘肃电网的实际算例表明, 电网中输电线路的潮流介数具有显著的异质性特点, 少数的几条输电线路在电网的功率交换中起到关键作用; 基于潮流介数的相继故障方式下的负荷损失明显高于已有电气介数指标和随机故障方式; 以潮流介数指标识别出的关键输电线路以及电网不同运行方式对潮流介数的影响结果, 非常符合甘肃电网的实际运行特点; 从而证明了利用潮流介数辨识关键输电线路的有效性。

关键词: 电力系统; 潮流介数; 异质性; 连锁故障; 可靠性

0 引言

近年来, 国外电网大停电事故时有发生, 尤其是印度“7·30”和“7·31”世界上影响人口最多的停电事故, 造成了巨大的经济损失和严重的社会影响^[1], 同时也为中国电网的安全运行和大停电预防敲响了警钟。研究分析表明, 大停电事故往往由个别输电线路的故障引发, 继而负荷大范围转移引发连锁反应故障, 最终造成负荷损失甚至系统崩溃。电网网架结构存在的不合理的薄弱环节和极少数关键线路对连锁故障的蔓延起到推波助澜的作用^[2-4]。因此, 如何寻找这些关键性线路具有重要的研究意义。

文献[5-6]使用节点或支路的介数来衡量该节点或支路的关键性, 并得到“介数指标能更好辨识电网薄弱环节, 高介数线路和节点对电网脆弱性影响更大”的结论。文献[7-8]提出加权介数的概念, 并引入节点“运行容量”和“运行极限”进行线路电抗修改使分析结果更加精确。文献[9]进一步将节点间的电气距离改进到电压耦合强度和线路可用概率。文献[10]以发电机有功出力作为线路权重, 并将线路加权介数修正为相邻线路中加权介数最高值的方法辨识电网关键线路。上述模型和方法大多假设母线间功率只按最短路径流动(包括最短电气距离), 忽略了电网节点间按 Kirchhoff 定律传输的事实, 于是在计算介数时就忽略了其他可能传输路径的作用。

文献[11-12]基于电路方程提出电气介数的概念, 假设在任意节点对之间注入单位电流, 以线路上的电流绝对值叠加作为线路关键性评价指标; 文献[13]提出采用节点对之间注入单位功率的方法计算线路电气介数; 文献[14]提出结合电网运行状态和网络拓扑的综合评估模型进行关键环节辨识。上述模型克服了原有介数模型假设母线间潮流只沿最短路径流动的不足, 但并未考虑线路中电流的方向性特点。电力网络中输电线路上的潮流具有方向性, 不同的发电负荷节点对在线路上产生的功率可能方向不同, 彼此叠加后会有抵消的现象, 最终使得发电负荷对之间的功率传输只需通过电网中的部分线路即可完成; 加之未考虑负荷水平对电网复杂性和线路电气介数指标的影响, 因而这些模型和方法尚未被电力工程界所广泛接受。

本文基于电网当前运行方式下的潮流分布, 根据输电线路在电网发电和负荷节点对之间的功率传输中被利用的程度, 同时考虑不同发电容量和负荷水平权重, 提出线路的潮流介数指标, 科学量化了输电线路在全网功率传输中的关键作用, 使得其物理背景更加符合电力系统实际。同时, 将指标应用于甘肃实际电网的关键线路识别, 验证了潮流介数识别电网关键输电线路的正确性和有效性。

1 潮流介数的定义

如上所述, 电力系统中发电机 G_m 传输一定有功功率 P_{mn} 到负荷 L_n 往往只需经过电网中的部分线路即可到达。由于输电路径中每条线路传输 P_{mn} 的比例不尽相同, 所以造成每条线路在传输功率

P_{mn} 时承担的作用和重要程度也不相同。本文作者认为一条线路传输 P_{mn} 的比例越大, 则它在 G_m 向 L_n 传输功率中越重要。由于每条线路上经过的发电负荷对不尽相同, 考虑所有经过该线路的发电负荷对后, 可得到线路在全网中的重要性程度指标。

以图 1 为例进行说明。图中矩形的宽度表示线路传输的有功功率, 其中竖线隔开的左右两部分分别表示该线路功率的来源和去向。负荷 L_n 的功率 P_{L_n} 来源于发电机 G_m 和 G_2 , 其中由 G_m 提供的部分为 P_{mn} (该功率即为 G_m 传输到 L_n 的实际功率), 如图中阴影部分所示; 由于电网中从一台发电机到一个负荷点的潮流未必经过电网中的所有输电线路, G_m 到 L_n 的功率传输途径如图中实线所示。对于任意一条途径线路 $i-j$, 设其输送的功率来源于 G_m 和 G_2 , 流向 L_n , L_2 和 L_3 这 3 个负荷点 (线路功率具体的来源和去向可依次通过顺序和逆序潮流追踪法得到), 则在线路 $i-j$ 内由 G_m 流向 L_n 的部分为 $P_{ij}(m, n)$ 。

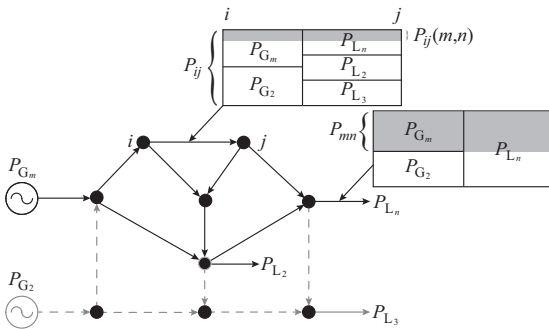


图 1 潮流介数的定义
Fig.1 Definition of flow betweenness

定义基于单一发电负荷对 (m, n) 的线路潮流介数指标为:

$$F_{ij, mn} = \min(S_m, S_n) \frac{P_{ij}(m, n)}{P_{mn}} \quad (1)$$

式中: $P_{ij}(m, n)$ 为 P_{mn} 在线路 $i-j$ 上的分量; $P_{ij}(m, n)/P_{mn}$ 为线路 $i-j$ 对发电负荷对 (m, n) 的输电贡献比例因子; $\min(S_m, S_n)$ 为该发电负荷对的权重, 用 G_m 实际出力和 L_n 实际负荷中的较小值表示, 代表 G_m 与 L_n 之间的最大可用传输功率。

由于电网中每条线路都承担了不同发电负荷对之间的功率输送任务, 从而可能被多个发电负荷对的功率传输路径经过, 其被经过的次数也反映了该线路在电网当前运行方式下的重要性。计及电网中所有发电负荷对的累加效应, 定义线路的潮流介数指标为:

$$F_{ij} = \sum_{m \in G} \sum_{n \in L} F_{ij, mn} \quad (2)$$

式中: G 为该线路功率来源的所有发电机节点集合;

L 为该线路功率流向的所有负荷节点集合。

由式(1)和式(2)可见, 求取 F_{ij} 需要求得 2 个关键量: 一是求取 G_m 向 L_n 传输的 P_{mn} , 即 L_n 的功率组成中由 G_m 提供的部分; 二是求得线路 $i-j$ 内由 G_m 流向 L_n 的部分 $P_{ij}(m, n)$ 。 F_{ij} 的详细求解过程参见附录 A。

2 潮流介数的性质

由潮流介数的定义可以看出, 潮流介数具有如下性质。

1) 在发电负荷对输送功率确定的情况下, 线路对该发电负荷对的输电贡献比例因子越大, 其重要性越高, 而与该线路本身传输的功率无关。如图 2 所示, $P_{mn} = 10$, 虽然线路 1 的输送功率 P_{line1} 比线路 2 的输送功率 P_{line2} 大 ($9 > 5$), 但其输送 P_{mn} 的部分仅为 2。由于线路 1 在 P_{mn} 输送中的贡献比例因子为 $2/10 = 20\%$, 小于线路 2 的贡献比例因子 $3/10 = 30\%$, 因此认为线路 2 比线路 1 重要。

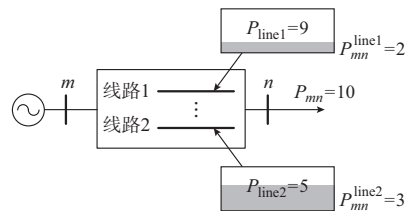


图 2 贡献比例因子对潮流介数的影响
Fig.2 Impact of contribution proportion factor on flow betweenness

2) 在 2 条线路的输电贡献比例因子相等的情况下, 对应发电负荷对的权重越大, 则其潮流介数越大, 表明其在电网功率输送中的作用越大。如图 3 所示, 设线路 1 和线路 2 分别为电网中 2 条从发电机直供负荷的输电线路, 显然 2 条线路的贡献比例因子 α 均为 100% , 但由于发电负荷对 (m, n) 的最大可用传输功率远小于发电负荷对 (f, g) ($10 \ll 100$), 显然线路 2 在电网中的重要程度大于线路 1。

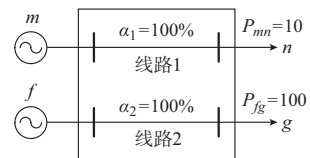


图 3 发电负荷对权重对潮流介数的影响
Fig.3 Impact of generator-load pair weight on flow betweenness

可见, 线路的潮流介数指标综合了线路在电网的功率传输中被利用的深度和广度, 深度即为输电线路对发电负荷对的输电贡献比例, 加之发电负荷

对权重体现了该发电负荷对在电网功率传输中的地位;广度即为输电线路被不同发电负荷节点对利用的数量,体现了该线路承担输电任务的繁重程度。因此,潮流系数指标摆脱了传统关键线路辨识指标只基于电网拓扑结构和假设发电负荷间按最短路径传输的范围,基于当前运行方式下的潮流分布特点,量化了线路对全网功率传输的贡献,客观地体现了线路的重要程度。

3 实际电网算例分析

本文选取某年甘肃电网冬季大负荷运行方式,

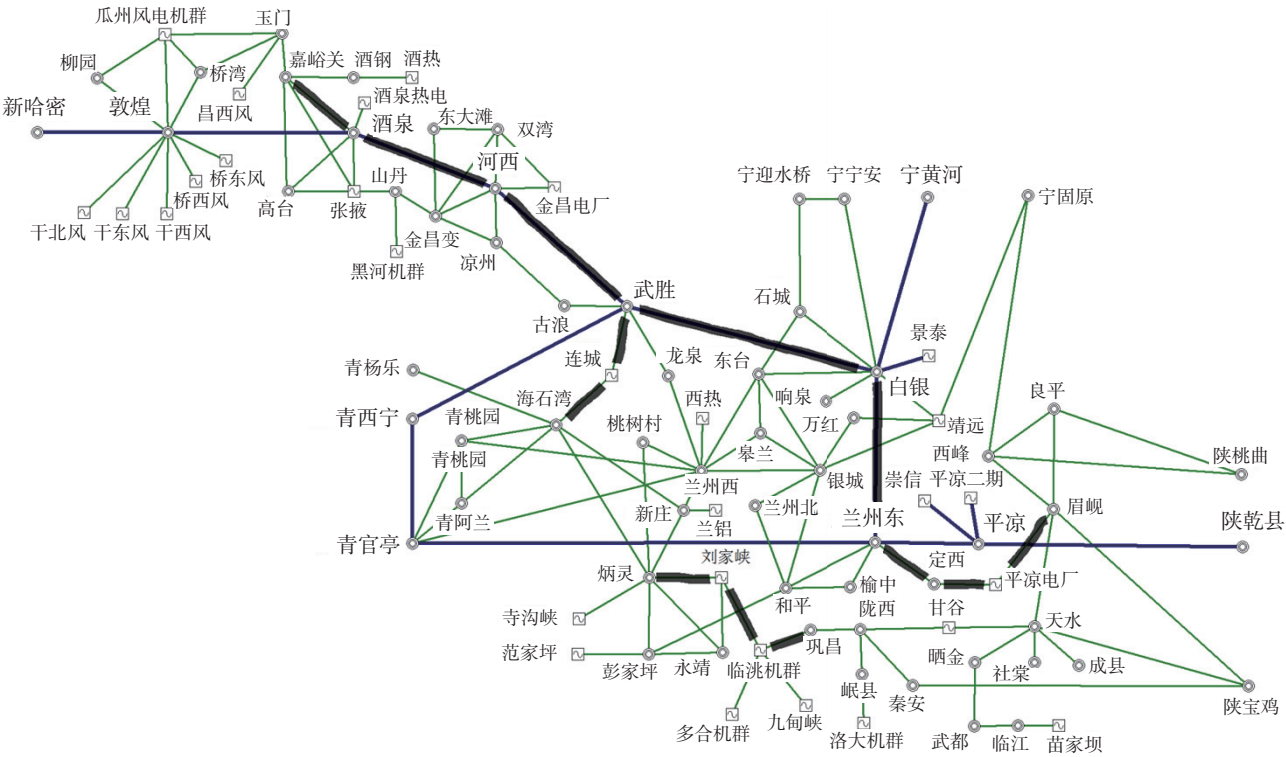


图 4 甘肃电网地理接线图及关键线路位置
Fig.4 Topology graph and critical lines of Gansu power grid

计算输电线路的潮流系数并验证其在关键线路识别中的正确性。在该运行方式下,甘肃电网发电容量为 17 017 MW,有功负荷为 16 810 MW,共投运 750,330,220,110 kV 输电线路 382 条。将双回线、多回线、变压器支路去重合并后的简化地理接线图如图 4 所示。

3.1 输电线路潮流系数分布

将去重合并后的 243 条输电线路按其归一化潮流系数降序排列后绘制于图 5。图中横坐标表示输电线路按潮流系数大小排序之后的增序线路标号。

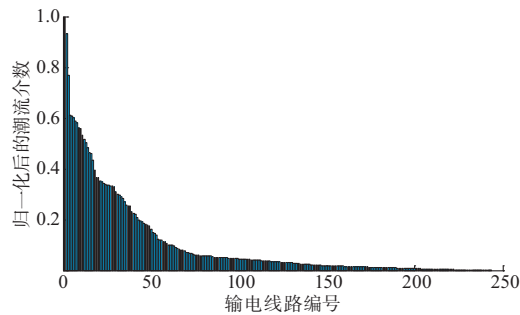


图 5 甘肃电网输电线路的潮流系数分布
Fig.5 Flow betweenness distribution of transmission lines in Gansu power grid

图 5 显示出甘肃电网输电线路的潮流系数呈现典型的异质性特点,归一化指标低于 0.2 的输电线路占输电线路总数的 88%之多,而大于 0.6 的输电线路只有 6 条,仅占输电线路总数的 2.45%。这说明在甘肃电网中,大多数输电线路在电网功率输送中的作用是有限的,仅有少量输电线路作用明显增强,这些线路承担了电网负荷中心与发电中心之间频繁而大量的功率交换,在功率输送中起到中流砥柱的作用,这些线路也就是电网中的关键线路。

为便于比较线路潮流系数与线路潮流的关系,将潮流系数缩小到 10%后与线路潮流同放于图 6。

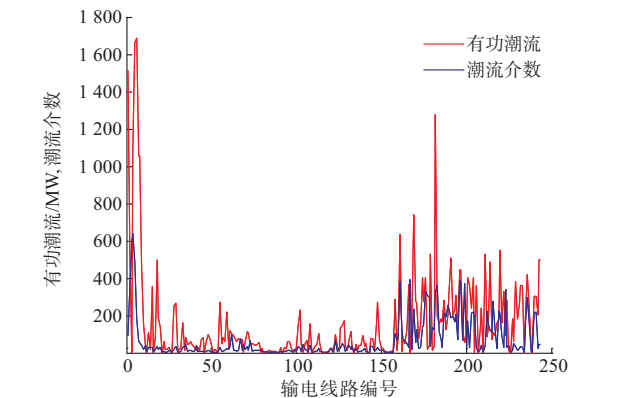


图6 输电线路的潮流大小与潮流介数的关系
Fig.6 Relationship between power flow and flow betweenness

由图6可见,线路的潮流介数与线路潮流之间存在很大的相关性,一般来讲承载潮流较大的线路潮流介数也较大(两者相关系数为0.887 1,远高于自由度为241、显著性水平为0.01的相关系数临界值)。但是,潮流介数的大小取决于3个因素:①被不同发电负荷对实际利用的数目;②被每个发电负荷对利用的贡献比例因子;③发电负荷对的权重大小。综合这3个因素可以看出,潮流介数与潮流大小的相关性并非绝对。例如:酒泉—河西双回线的潮流为1 659.69 MW,大于河西—武胜双回线的潮流1 085.11 MW,但由于河西—武胜双回线是连接河西电网与甘肃主网的主要联络线,承担了河西风电与甘肃主网负荷中心之间,甚至新疆外送与华中地区之间最主要的功率交换任务,处于咽喉地位。因此,计算得到的潮流介数为6 387.62,大于酒泉—河西双回线的潮流介数4 914.21。综上所述,潮流介数指标量化了输电线路在潮流输送中的作用,从而使得评价输电线路的作用不再单纯依靠其电压等级或承担潮流大小,因而具有先进性。

3.2 甘肃电网关键线路辨识结果分析

根据甘肃电网的规模,取潮流介数归一化指标大于0.5的前13条线路为甘肃电网在冬季大负荷方式下的关键线路,如表1所示。这些关键线路在电网中的位置在图4中以黑色粗线标记。

由表1和图4可以看出,甘肃电网在该运行方式下的关键线路主要为750 kV和330 kV输电线路,且均处在重要的输电通道和区域功率交换断面上。其中,排名前3位的线路处于750 kV河西地区输电通道,该通道是疆电外送、酒泉地区风电外送的唯一途径,承担河西地区与甘肃主网负荷中心之间频繁和重要的功率交换,因而在甘肃电网的功率传

输中具有非常重要的地位;而连海线和武连线则为河西输送功率下网通道以及甘肃青海功率交换的主要联络线;刘临线、刘炳线和临巩线则为甘肃刘家峡、多合、临洮等水电功率的主要送出通道,同时也是承担西电东送和东电西送的330 kV输电通道;而定兰线、平定线和平眉线则为东西断面重镇平凉电厂的送出通道,对东西断面的功率交换具有重要影响。因此可见,基于潮流介数的甘肃电网关键线路识别结果非常符合甘肃电网的运行实际。

表1 甘肃电网冬季大负荷方式下的关键线路
Table 1 Critical lines in Gansu power grid under heavy load operation condition in winter

排序	线路名称	电压等级/kV	i 侧母线	j 侧母线	F_{ij}
1	武河线	750	武胜变	河西变	6 387.62
2	白武线	750	白银变	武胜变	5 958.66
3	河酒线	750	河西变	酒泉变	4 914.21
4	连海线	330	连城变	海石湾变	3 907.10
5	平定线	330	平凉电厂	定西变	3 885.23
6	武连线	330	武胜变	连城变	3 839.87
7	定兰线	330	定西变	兰州东变	3 765.26
8	刘临线	330	刘家峡电厂	临洮变	3 720.15
9	刘炳线	330	刘家峡电厂	炳灵变	3 587.66
10	白兰线	750	白银变	兰州东变	3 571.51
11	酒嘉线	330	酒泉变	嘉峪关变	3 403.07
12	临巩线	330	临洮变	巩昌变	3 293.45
13	平眉线	330	平凉电厂	眉岷	3 222.71

同时应注意到,尽管按传统观点330 kV线路所输送功率相对于750 kV线路要少得多,但是有多条330 kV线路的关键性排在白银—兰州东750 kV线路之前。这说明判断电力系统关键线路不能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,综合考虑线路在功率传输中实际发挥的作用。

3.3 关键线路故障下的丢失负荷量对比

实际电力系统运行中,关键线路的连续故障开断往往会引发大范围的丢失负荷,故障范围越广,负荷切除量越大,因此本文选取丢失负荷衡量电力系统受破坏程度。在线路相继开断过程中,系统可能会解列成若干电气岛,若通过调整发电机出力能够保持岛内功率平衡,则不属于丢失负荷范围。本文引入3种线路故障策略以验证基于潮流介数辨识的关键线路对电网的重要程度。

- 1)随机线路故障。每次随机移除一条线路,重复10次之后得到丢失负荷曲线。
- 2)基于电气介数故障。每次移除电气介数最高的一条线路,在每次移除线路后更新线路电气介数。
- 3)基于潮流介数故障。每次移除潮流介数最高

的一条线路,在每次移除线路后更新线路潮流介数。

3种线路故障策略下甘肃电网丢失负荷情况如图7所示。由图7可见:在随机故障下甘肃电网丢失负荷量变化并不明显,直到切除了6条线路之后才有负荷损失;而基于电气介数和潮流介数故障方式下的丢失负荷量随着线路不断切除而迅速增长,并且基于潮流介数的增长曲线高于电气介数,这说明电网中更多的潮流交换通过高潮流介数线路传输,当这些线路被切除时功率的传输将变得困难。从图中可以看出,当第7条高潮流介数线路被切除时负荷损失已达390 MW,而对应电气介数的负荷损失仅有320 MW。因此可以看出,高潮流介数线路在电网中的地位高于电气介数,潮流介数指标能够更有效地辨识电网中的关键线路。

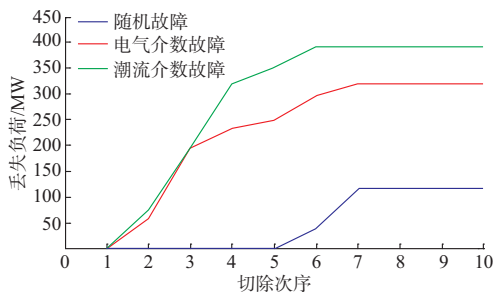


图7 不同线路故障策略下的丢失负荷
Fig.7 Loss of load as lines removed by three different attack strategies

3.4 不同运行方式下潮流介数的特点

为了验证不同运行方式下线路潮流介数的变化特点,选取甘肃电网4种运行方式,比较不同运行方式下输电线路电气介数如图8所示。

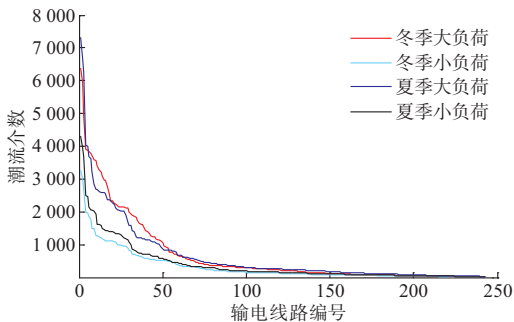


图8 电网运行方式对潮流介数的影响
Fig.8 Impact of power system operation on flow betweenness

由图8可以看出,输电线路在大负荷运行方式下的电气介数明显大于小负荷方式,这说明输电线路在大负荷方式下承担的功率输送任务较重,这与电网机组在不同运行方式下的开机方式特点相符,同时也说明本文模型可较正确地反映发电负荷最大

可用传输功率对线路关键性的影响。显然,在不同的潮流方式下,由于潮流从发电机到负荷的传输路径和输电份额发生变化,必然造成潮流介数的改变,相对应线路在电网功率传输的作用也会不同,从而影响关键线路的排序。这正是基于潮流介数辨识关键线路的特点也是优点所在。

4 结语

根据电力系统潮流传播的特点,提出输电线路的潮流介数指标,并以此作为电网中关键输电线路的判据。该判据基于当前运行方式下的潮流分布,综合输电线路在电网功率传输中被利用的广度和深度,量化了其在电网功率输送中的贡献,并能够反映各运行方式下不同发电容量和负荷水平对线路关键性的影响。甘肃电网的实例分析表明,基于该指标计算得到的关键输电线路以及运行方式对潮流介数的影响非常符合甘肃电网的实际运行特点,从而证明了潮流介数指标辨识电网关键输电线路的有效性。但本文提出模型并未验证线路故障后网络连通性、节点电压和系统频率等参数的变化,这将是下一步研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 汤涌,卜广全,易俊.印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及启示[J].中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [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 Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 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.
LU Zongxiang. Survey of research on the complexity of power grids and reliability analysis of blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 93-97.
- [4] 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 Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jinyan. 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.
- [5] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex

- networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 1-4.
- [6] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. The European Physical Journal, 2005, 46(1): 101-107.
- [7] 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.
- [8] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 89-92.
- LIU Yaonian, ZHU Xi, KANG Kefei, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-92.
- [9] 史进, 涂光瑜, 罗毅. 电力系统复杂网络特性分析与模型改进[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 93-98.
- SHI Jin, TU Guangyu, LUO Yi. Complex network characteristic analysis and model improving of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 93-98.
- [10] 张国华, 张建华, 杨京燕, 等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 21-26.
- ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, YANG Jingyan, et al. Vulnerability assessment of bulk power grid based on weighted directional graph and complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 21-26.
- [11] 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.
- [12] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [13] 王凯. 基于复杂网络理论的电网结构复杂性和脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] 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.
- 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.

梁 才(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统分析、运行与控制、电网调度自动化。
E-mail: liangcai00168@163.com

刘文颖(1955—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源电力系统分析与控制、电力系统智能调度及大电网安全防御。

但扬清(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统分析、运行与控制、电网调度自动化。

(编辑 孔丽蓓)

Flow Betweenness of Transmission Lines and Its Application in Critical Line Identification

LIANG Cai¹, LIU Wenyong¹, DAN Yangqing¹, XU Peng¹, ZHOU Xichao²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Energy Saving Service Company, Beijing 100052, China)

Abstract: A new concept of flow betweenness of power transmission line is proposed as a criterion for critical line identification in a power system. This new concept is based on comprehensive consideration of the extent of a transmission line used by different generator-load pairs, and the influence of generating capacity and load level. The criterion can adapt to the variation of power flow distribution under different operation modes. It can also quantify the contribution and effects of transmission line on the whole grid power transfer with a more comprehensible physical background. Case studies based on Gansu power grid show that the flow betweenness distribution of transmission lines has typical heterogeneous characteristics, i. e. a small number of transmission lines play critical role in the power exchange, and the load loss under cascading failure based on flow betweenness is significantly higher than the existed electrical betweenness and random cascading failure manner. Moreover, the critical line identification results and the influence of different operation modes on flow betweenness are closely in line with the actual operation characteristics of Gansu power grid. The case study results clearly validated the effectiveness of flow betweenness.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 2011103004).

Key words: power system; flow betweenness; heterogeneous; cascading failure; reliability