

复杂电网中基于传输重要度的潮流转移关键线路识别

为提高复杂电网中关键线路识别的效率,提出一种基于传输重要度的关键线路识别方法。该方法应用复杂网络理论和基于网络最大流问题,引入功率传输分布因子(PTDF),定义出线路的传输重要度;进一步确立反映各电源负荷节点对的功率传输对电网影响的权重,综合传输度和权重得出线路关键性判据。该判据不仅考虑到电网的拓扑结构,并将电网简化为有向加权网络模型,计及了线路最大有功传输量的限制,使结果更加符合电网的实际情况。在IEEE 39节点系统上仿真并分析其结果,验证该方法的有效性。

宋 勋 李振兴 袁兆强 张腾飞/三峡大学电气与新能源学院



宋 勋/硕士研究生

自21世纪以来,全球范围内已发生多起大面积停电事故,如2003年美加联合电网大停电、2006年西欧大停电和2012年印度大停电等。对这类事故调查研究结果表明,大停电事故一般是从电网中个别元件的故障开始,在特殊环境下由于某些关键线路的跳闸,对大电网运行事故的扩大往往起到推波助澜的作用,引发连锁故障继而最终导致电网崩溃。因此如何找到电力系统的关键性线路具有重要的理论意义和实用价值^[1-2]。

当今国内外电网大都具有小世界网络模型的特性,而小世界模型以复杂网络理论为基础,通过对大电网拓扑结构的分析来探索电力系统连锁故障发生机理^[3]。国内外学者围绕以小世界模型为基础的电网进行关键线路识别方面的研究,这类研究成果由于利用了小世界模型,可以及早发现电力系统的脆弱环

节,继而可提前采取预防措施。但这种模型只单纯地研究系统的拓扑结构,而忽略系统的实际运行特点,评估结果缺乏准确性。文献[4]结合发电的分布结构引用线路电抗参数,提出有权重的线路指标,不过未体现出所在电网的功率传输特点;文献[5]基于电网中电源和负荷之间的潮流变化对电网中线路占用状况构造线路的电气介数,且以电源和负荷的权重来反映电网运行方式的变化;文献[6]用潮流追踪法来确定发电负荷间的功率传输量及各线路能承载的传输量,以此定义出线路的有向电气介数。但文献[5-6]定义的介数指标都忽视了电网中线路的传输容量约束。同时上述研究的网络模型都是基于无向、无权的,仅从拓扑结构来分析电力系统,没有考虑线路传输极限和功率分布的特点,故其研究结果和实际电网存在一定的差距。值得注意的是,复杂网络理论主要是研究各种貌似互不相同的复杂网络间的共性,应用各种指标的含义体现出这种共性,且以图论理论为基础,从纯拓扑角度来具体定义。但当在分析某类具体网络时,一般直接应用这些指标不能反映其所在网络的特点。因此,在进一步的研究中必须以它们的概念和含义为基础,结合具体网络的特点来改进这些指标的计算方法。

基于上述思路,结合图论中的网络最大流理论和复杂网络理论,提出既考虑网络拓扑特性,又考虑电气特性的传输重要度指标,结合反映各电源负荷节

关键词/Keywords

潮流转移·
最大流·
关键线路识别·
传输重要度·
功率传输分布因子·
复杂网络理论·

湖北省自然科学基金项目(2014CFB680)。

点对的功率传输对电网影响的权重,继而得到电力系统关键性线路的判据,用来识别出复杂电网的关键线路。通过在IEEE 39节点系统上仿真分析,并通过与文献[5]结果的比较验证该方法的有效性。

网络的最大流

1. 最大流问题

网络最大流问题属于网络最优化问题,其目的是找到在容量受限的网络中两点之间最大传输容量。随着信息技术的迅猛发展,有关网络最大流的理论在通信网络、计算机网络等领域中应用广泛。

以图1为例进行说明,该图为一个有向加权图, $N=(V,A,C)$ 。其中, V 为节点集, A 为有向边集, C 为边权值,共有7个节点和12条边,其中节点 v_s 为源点,节点 v_t 为汇点,其余节点为源点和汇点之间的中间节点,边的权值表示边所容许通过的流量最大值。网络最大流问题就是在于如何充分利用其网络拓扑结构实现从 v_s 到 v_t 的最大传输量^[7]。

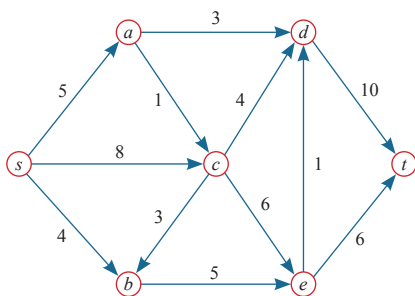


图1 有向网络模型

2. 网络最大流数学模型

网络最大流的数学模型可描述为

$$\begin{aligned} \max_{st} \quad & \sum_{(v_i, v_j) \in A} c(v_i, v_j) - \sum_{(v_i, v_j) \in A} f(v_i, v_j) \\ = \quad & \begin{cases} v(f) & v_i = v_s \\ 0 & v_i \neq v_s, v_t \\ -v(f) & v_i = v_t \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 \leq f(v_i, v_j) \leq c(v_i, v_j) \quad \forall (v_i, v_j) \in A \quad (2)$$

式中, $c(v_i, v_j)$ 为连接节点 v_i 和 v_j 的边上所允许流过的最大流量; $f(v_i, v_j)$ 为边上的实际流量。

式(1)的含义对于不同节点来说,其流入节

点的流量值之和与流出节点的流量值之和的差是不同的。对于任意中间节点,其可行流值为0;对于网络中源点 v_s ,其可行流值为 $v(f)$;对于网络中汇点 v_t ,其可行流值为 $-v(f)$ 。式(2)的含义即对于网络中任何一条边 (v_i, v_j) 的当前流量小于该边的最大流量值。

3. 电网关键线路识别与最大流问题类比

在一个容量有限的有向网络模型,源点和汇点间存在着很多条自源点到汇点的路径,最大流问题理论原理就是尽可能地利用这些路径来计算源—汇两点之间的最大传输流量以及各条弧上的可行流。与之相似的,复杂电网中功率传输的起点可作为电源节点,功率传输的终点可作为负荷节点,当然电源—负荷节点对之间也存在着多条的电能传输路径,其间所传输的功率可类比成流量网络模型中的可行流。

如果将最大流问题理论应用到复杂电网中,计算其中实现电源—负荷节点对之间最大功率传输时各线路的可行流,那么其物理意义在于将节点对之间功率传输对线路的利用状况进行量化,从而体现出线路在功率传输中的承载能力。该理论在基于最短路径的线路介数等指标的基础上,充分地考虑到源—荷节点对间的所有传输途径,故物理应用背景就更加符合电网的实际情况。

基于传输重要度的关键线路识别原理

1. 传输重要度

以图1所示的网络为例来介绍传输重要度的概念。图1为一个简化的电网拓扑结构,其中, s 为发电机节点, t 为负荷节点, a 、 b 、 c 和 e 为该网络的中间节点,节点之间的连线代表支路,支路上的值表示该支路允许流过的传输容量上限。发电机发出的功率经过不同的路径传输到负荷节点 t ,由于各条支路的参数差异及在网络中的拓扑差异,每条支路传输的功率不同,即对单电源—负荷节点对来说,每条支路的传输重要度是不同的。

在直流潮流模型中,功率传输分布因子(Power Transmission Distribution Factor, PTDF)可以对电源—负荷节点对间各支路的潮流传输贡献的

灵敏度进行有效的区分^[8-9]。当发电机注入单位功率为 ΔP_{st} 时,支路 ij 传输的功率会相应的增加 $\Delta P_{st}(i,j)$,两者间关系为

$$\Delta P_{st}(i,j) = \frac{X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}}{x_{ij}} \Delta P_{st} = G_{st}(i,j) \Delta P_{st} \quad (3)$$

式中, X_{is} 、 X_{it} 、 X_{js} 和 X_{jt} 分别为电网节点阻抗矩阵中相应行和相应列的元素(如 X_{is} 为电网络节点阻抗矩阵中第 i 行第 s 列元素); x_{ij} 为支路 ij 的电抗值; $G_{st}(i,j)$ 为电源负荷节点对 (s,t) 之间单位功率交易在支路 ij 上引起的功率传输量,即支路 ij 对应的功率传输分布因子。

借助功率传输分布因子的概念,可定义出线路的传输能力指标,即

$$f_{st}(i,j) = \frac{C(i,j)}{G_{st}(i,j)} \quad (4)$$

式中, $C(i,j)$ 为线路的最大传输容量。

电网中每条支路实际承担多少负荷量不仅与自身的传输能力有关,还受限与其他线路的传输能力。比如对于图1中的支路 $b-e$ 来说, $s-b-e-t$ 为经过它的1个传输路径,经过该支路的负荷量由该条传输路径中传输能力最小的支路决定。故定义单电源-负荷节点对中支路 ij 的传输重要度为

$$\lambda_{st}(i,j) = \sum_{P=1}^L f_{\min,P} \quad (5)$$

式中, P 为经过支路 ij 的1条传输路径; L 为经过支路 ij 的传输路径的总数; $f_{\min,P}$ 为传输路径 P 中最小传输能力支路的传输能力值。

在实际的电网中,一般含有多个电源节点、多个负荷节点。故从电网中电源-负荷节点对功率传输的角度来看,采用叠加原理,得到支路 ij 的综合传输重要度为

$$\lambda(i,j) = \sum_{s \in G} \sum_{t \in L} \lambda_{st}(i,j) \quad (6)$$

式中, G 为电源节点集; L 为负荷节点集。

2. 确立权重系数

如果仅基于式(6)的指标确立重要线路,则会忽视电网中发电机的容量和负荷节点的负荷容量对电网线路功率传输的影响,导致其得到的结果不能有效地反映实际电网中线路功率传输的变

化。因此还需要增加由发电机节点和负荷节点构成的权重系数来弥补这方面的不足。由于几何平均数常用于对数据、参数的评估且效果较好,故使用几何平均数的形式来定义该权重系数,即

$$w(s,t) = \sum_{(s,t) \in (G,L)} \sqrt{w_s w_t} \quad (7)$$

式中, w_s 为发电机节点的权重,为电源点装机容量占整个电网装机总容量的比重; w_t 为负荷节点的权重,为负荷点的负荷占整个电网总负荷的比重。 $w(s,t)$ 反映了节点对的发电负荷水平对支路 ij 的功率传输的影响,即发电机容量或负荷容量小的电源-负荷节点对线路的功率传输影响小,而这更加符合电网的实际情况。

3. 关键线路识别判据

考虑到对于一些特殊节点权重系数 $w(s,t)$ 有可能趋于0,在定义关键线路识别判据时避免比率形式,提出使用乘积形式将综合传输重要度指标 $\lambda(i,j)$ 与权重系数 $w(s,t)$ 结合,定义出线路的关键性指标 $I(i,j)$,继而得到基于传输重要度的关键线路识别判据。

$$I(i,j) = w(s,t) \lambda(i,j) \quad (8)$$

式中, $w(s,t)$ 为支路 ij 相关的电源负荷节点对在全网所占的权重; $\lambda(i,j)$ 为支路 ij 的综合传输重要度。

该判据的物理意义:线路所在的电源负荷对所占比重及其传输重要度越大,其在连锁故障中的关键程度越大。线路的关键性指标 $I(i,j)$ 由于既考虑到电网的网络拓扑特性,又考虑到电源负荷节点对电网的传输能力的影响,其更适合应用于对复杂电网的关键线路识别的研究^[10]。

基于传输重要度的潮流转移关键线路识别流程如图2所示。

算例分析

为验证该算法,利用电磁暂态仿真软件PSCAD搭建的IEEE10机39节点电网系统模型进行仿真验证。仿真系统的单线图及其支路编号如图3所示。图3中,将负荷、发电机和变电站母线当成节点,将三者之间的传输线路当成连接这些节点的边,从而使系统等效成具有相同拓扑结构的有

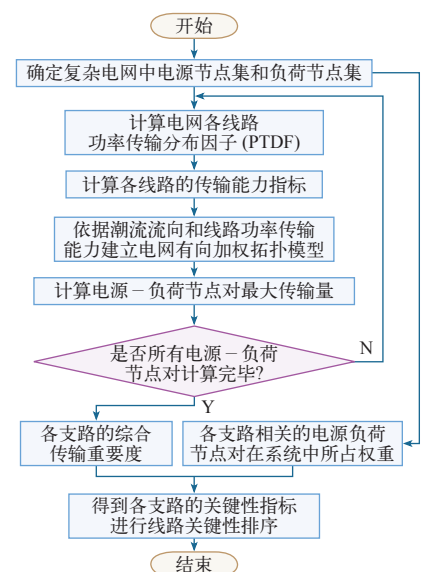


图2 关键线路识别流程

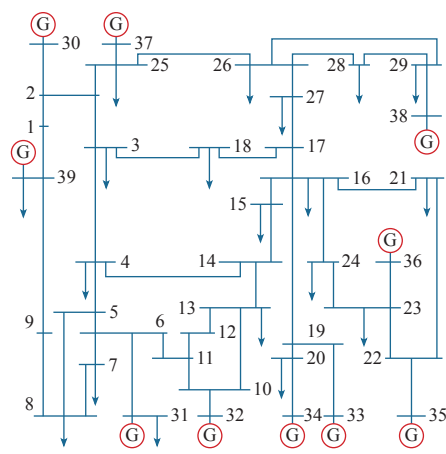


图3 IEEE 10机39节点系统图

向加权网络^[11-12]。

依照所提出的指标计算得到其归一化后的关键线路识别结果，如表1所示。

从表1中可以看出，排名前10位的线路在系统中显得较为关键，结合系统结构图来看。比如，线路2-3在基于传输重要度的关键性指标排名最高，也就说明线路2-3是系统的重负荷线路，一旦系统发生大规模潮流转移，线路2-3处的保护极易发生误动，则会引起线路3-18、17-18和16-17等的传输量急剧增加，继而容易引起连锁故障，最终导致大停电。将本文方法与传统的电气介数指标方法得到的关键性线路排序结果进行比较，如表2所示。

表1 系统线路关键性指标

序号	线路	关键性指标	序号	线路	关键性指标
1	2-3	0.298 3	24	32-10	0.055 0
2	16-17	0.263 8	25	1-2	0.051 2
3	21-16	0.200 7	26	19-20	0.044 4
4	22-21	0.199 8	27	14-4	0.040 8
5	19-16	0.198 5	28	39-1	0.038 4
6	35-22	0.147 5	29	29-28	0.033 3
7	16-15	0.125 3	30	29-26	0.031 5
8	33-19	0.109 9	31	38-29	0.031 4
9	25-2	0.105 5	32	5-4	0.027 2
10	33-19	0.102 0	33	26-27	0.025 7
11	23-24	0.099 9	34	14-15	0.022 2
12	22-23	0.092 4	35	5-8	0.022 0
13	17-18	0.088 8	36	34-20	0.019 2
14	10-13	0.086 1	37	6-11	0.015 7
15	24-16	0.086 0	38	10-11	0.013 6
16	17-27	0.077 7	39	6-7	0.013 1
17	30-2	0.076 8	40	26-28	0.012 8
18	31-6	0.072 5	41	13-12	0.011 0
19	36-23	0.070 2	42	39-9	0.009 6
20	3-18	0.066 6	43	9-8	0.009 4
21	13-14	0.063 0	44	37-25	0.009 2
22	6-5	0.062 9	45	3-4	0.009 0
23	25-26	0.062 8	46	7-8	0.008 8

表2 关键线路的识别比较

线路编号	本文方法		传统方法	
	关键性指标	排序	电气介数指标	排序
16-17	0.263 8	2	31 284	1
19-16	0.198 5	5	20 823	4
16-15	0.125 3	7	22 858	2
25-2	0.105 5	9	19 925	6

从表2中可以看出，排序结果大体相当，说明该方法在识别关键线路方面也具有有效性。

为更好地分析验证关键线路对系统的影响，采用两种方法来攻击该系统。第1种为依次剔除拓扑介数值较高的前10条线路，并计算在每次攻击之后系统的最大传输能力。同样地，第2种为依次剔除关键性指标值较高的前10条线路，并计算在每次攻击之后系统的最大传输能力，其结果如图4所示。

从图4中可以看出，每次攻击后第2种方法比第1种方法对系统的最大传输能力影响更显著。当

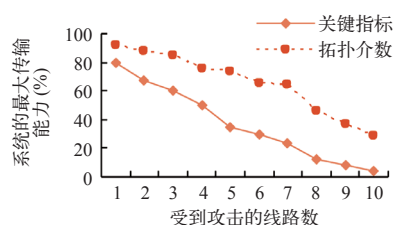


图4 攻击后系统的最大传输能力

按照第1种方法攻击时，系统的传输能力已经降低到很小的数值，对系统影响很大。这也说明关键性指标比拓扑介数更能全面地体现出电网的关键线路。

结束语

针对复杂电网中关键线路识别的效率问题，依据电网拓扑特性和潮流分布的特点，提出一种基于传输重要度的电网关键线路识别方法。该方法有如下特点。

1) 考虑线路传输容量对关键性线路识别的影响，提出了线路传输重要度指标和回路权重的概念，综合两者乘积形式构建线路关键性识别新判据。

2) 将电网简化为有向加权网络模型，计及了线路最大有功传输量的限制，使识别结果更加符合电网的实际情况。

3) 应用功率传输分布因子确立各支路的潮流传输贡献的灵敏度，解决了现有的复杂网络模型假设电流仅仅只沿最短电气路径传输的问题，提高了复杂电网中关键线路识别的效率。

由于该方法仅在IEEE 39节点系统上进行验证，并未结合实际电网进一步分析验证，因此在下一步的研究工作中还需结合实际电网进行研究分析。

参考文献

[1] 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): 2-6.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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识别[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.

[5] 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.

[6] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于有向电气介数的脆弱线路选取[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6): 91-96.

[7] 王志强, 孙小军. 网络最大流的新算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(10): 2357-2359.

[8] 华科, 谢开, 郭志忠. 采用直流和交流功率传输分布因子的输电权交易[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 71-74.

[9] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.

[10] 刘耀年, 何俊, 曲晓, 等. 基于关键性指标的电网脆弱线路识别[J]. 电测与仪表, 2012, 49(10): 42-45.

[11] 张富超, 黄家栋. 基于关键线路识别的电力系统连锁故障风险评估模型[J]. 陕西电力, 2014(8): 55-58, 64.

[12] 慕宗江, 徐岩, 杨雨昂, 等. 基于传输贡献度的继电保护定值在线校核评估方法[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1887-1889.

(收稿日期: 2015-03-17) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告