

电力系统脆弱线路的识别及其输电断面搜索

任建文, 魏俊姣

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 提出要实现电力系统连锁故障的预防控制需做到 3 步: 识别系统的脆弱线路, 搜索脆弱线路的输电断面, 给出控制策略。根据脆弱线路不仅易受到系统扰动的影响, 而且其切除极有可能导致全网潮流的大范围转移, 提出分别利用冲击脆弱性和转移脆弱性来表征线路的抗冲击能力和其断开对系统的危害, 进而得到识别脆弱线路的综合指标。为了判断脆弱线路切除后是否会导致连锁故障, 利用各线路功率传输分布因子的差异系数, 提出输电断面搜索新算法。从而只需通过分析线路切除对输电断面内线路的影响即可快速评估线路断开对整个系统的影响。IEEE 39 节点标准算例结果, 验证了所提指标和算法均有效、可行。

关键词: 电力系统; 预防控制; 功率传输分布因子; 脆弱性; 脆弱线路; 输电断面; 搜索; 差异系数

中图分类号: TM 862

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.007

0 引言

近年来国内外大停电事故的频繁发生, 给电力系统安全稳定控制工作带来新的挑战^[1-2]。通过分析可知, 大停电事故发生的主要原因为: 传统的后备保护及自动装置仅仅根据本地测量信息, 未顾及线路断开对整个系统的影响而直接将过载线路切除, 引发潮流大范围转移, 造成相邻线路功率越限, 进而导致连锁跳闸事故的发生。由此可知, 过载线路的切除以及相邻线路无法消纳转移功率而出现新的过载现象对连锁故障的发生起到推波助澜的关键作用。因此, 为了防止大停电事故的再次发生, 学者们分别从以下两方面进行了深入研究。

a. 寻找引发连锁故障的“个别线路”。研究发现大停电事故的发展、扩大阶段与系统的脆弱环节息息相关^[3], 在电力系统中, 这些脆弱环节大多表现为少数具有长程连接的线路, 即脆弱线路。文献[3]通过采用基于全局效能的连锁故障模型, 证明电力系统的脆弱性与网络拓扑有着密切的联系, 同时指出介数指标能够很好地揭示系统的脆弱环节。在此基础上, 文献[4]和文献[5]分别提出将输电线路介数、潮流熵作为脆弱线路的辨识指标。

b. 快速识别受“个别线路”影响较大的线路集合, 组成输电断面^[6-10]。文献[6]利用图论相关知识, 在分区的基础上进行输电断面搜索, 算法简单, 搜索速度快, 但存在区内漏选问题。文献[7]通过寻找断开支路首末端点之间的最短路径, 结合支路开断分布系数确定输电断面的组成。

本文首先根据“在系统发生扰动时, 线路受到的

冲击越大、线路退出运行所造成的潮流转移越大, 线路越脆弱”这一基本原理^[11], 利用功率传输分布因子 PTDF (Power Transfer Distribution Factor) 和有功增加因子提出识别系统脆弱线路的新指标, 实现预防控制的第一步, 即识别脆弱线路。为了实现预防控制的第二步, 即分析当线路过载时是采取线路切除还是进行紧急负荷控制, 本文提出一种基于功率传输分布因子的输电断面识别方法。所提算法可以有效搜索出脆弱线路的输电断面, 以此快速分析脆弱线路断开是否会导致连锁故障, 进而完成对电力系统连锁故障进行预防控制。

1 脆弱线路的识别

1.1 介数指标的不足之处及其改进

传统脆弱线路的识别方法, 往往利用复杂网络理论, 根据介数 (加权介数) 指标的大小来表征线路的脆弱性^[12-14]。介数的定义如下:

$$B_0(l) = \sum_{s, t \in V, s \neq t} \frac{\delta_{st}(l)}{\delta_{st}} \quad (1)$$

其中, δ_{st} 为经过节点 s 和节点 t 之间最短路径的次数; $\delta_{st}(l)$ 为节点 s 和节点 t 之间经过线路 l 的最短路径次数; V 为所有节点的集合。

由介数的定义可知, 直接利用介数来反映线路所起的传输作用, 存在一定的局限性。因为在电力系统中, 功率在线路上的流动, 并非只沿着最短路径, 而是在所有可能路径上进行传输。过载线路的出现以及在潮流转移后其余线路出现的功率越限问题对连锁故障的发生起到关键作用, 因此本文抓住问题的主要影响因素, 提出判断一条线路是否为脆弱线路, 不应仅仅考虑线路的结构脆弱性, 而应从线路抵抗系统扰动的能力大小 (冲击脆弱性 C_l) 和线路断开对系统的危害程度 (转移脆弱性 Z_l) 这 2 个方面来综合分析。对连锁故障的预防控制而言, 脆弱线

收稿日期: 2014-05-05; 修回日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50837002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50837002)

路不仅在系统扰动时容易出现功率越限,同时它的退出运行引起全网潮流的大范围转移的概率极大。换言之,识别脆弱线路的指标应该兼顾线路的冲击脆弱性以及转移脆弱性。同时,因为连锁故障主要是由潮流转移导致的静态稳定问题,因而所提指标顾及到线路的热稳定极限,而不考虑线路的暂态稳定问题。下文将详细介绍冲击脆弱性指标 C_l 和转移脆弱性指标 Z_l 的形成。

1.2 基于系统扰动的线路冲击脆弱性指标

为了分析线路受系统扰动(负荷增加)的影响,本文首先引入功率传输分布因子^[15]。在一定运行方式下,当一个节点对之间功率交换量变化时,其余线路上的功率也会发生相应变化,由于无功功率一般采取就地补偿,因此本文采用基于直流模型求解得到的功率传输分布因子,求解过程如下。

假设发电节点 s 到负荷节点 t 之间的功率交换量增加 ΔP_{st} ,那么线路 l (首、末节点分别为 a, b)上的功率相应发生 ΔP_{ab} 的变化,在直流模型下,可以得到:

$$T_{st}(l) = \frac{\Delta P_{ab}}{\Delta P_{st}} = \frac{X_{as} - X_{bs} - X_{at} + X_{bt}}{x_{ab}} \quad (2)$$

其中, X_{as} 为在当前运行方式下的网络阻抗矩阵第 a 行第 s 列所对应的元素, X_{bs}, X_{at}, X_{bt} 类似; x_{ab} 为线路 l 自身电抗; $T_{st}(l)$ 为线路 l 对节点 (s, t) 的功率传输分布因子。

本文将线路 l 在节点对负荷增加时所分担输送功率的大小,即线路 l 对各节点对的功率传输分布因子定义为线路 l 在系统扰动时所受到的冲击。由此可知,线路受到的扰动冲击可分为全局冲击和局部冲击^[11],其中全局冲击为线路受到的来自每一节点对波动引起的潮流冲击在线路上的叠加,局部冲击为线路受到的来自节点对负荷增加时引起的最大冲击。全局冲击和局部冲击的定义式如式(3)和式(4)所示。

$$C_{l1} = \sum_{s \in G, t \in L} T_{st}(l) \quad (3)$$

$$C_{l2} = \max_{s \in G, t \in L} (T_{st}(l)) \quad (4)$$

其中, G 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合; C_{l1} 和 C_{l2} 分别为线路 l 所受到的全局冲击和局部冲击。

为了综合考虑线路所受到的冲击,本文首先将全局冲击和局部冲击按照式(5)进行归一化处理,再由式(6)得到线路 l 的冲击脆弱性指标 C_l 。

$$Y^* = \frac{Y - Y^{\min}}{Y^{\max} - Y^{\min}} \quad (5)$$

$$C_l = \frac{1}{2} (C_{l1}^* + C_{l2}^*) \quad (6)$$

其中, $Y^{\max}$ 和 $Y^{\min}$ 分别为指标 Y 的最大值和电小值; C_{l1}^*, C_{l2}^* 分别为归一化的全局冲击、局部冲击。

分析式(3) — (6)可知,当线路的冲击脆弱性指

标 C_l 越大,表明在系统负荷增加时,线路上功率增加的概率越大,在一定程度上,线路越脆弱。

1.3 基于潮流转移的线路转移脆弱性指标

在电力系统中,当线路 l 因过载而退出运行后,系统中的其余线路就会分担线路 l 原来传输的功率,为此学者采用支路开断分布系数 λ_{k-l} 来量化线路 k 在线路 l 断开后所受到的影响,定义如下^[6]:

$$\lambda_{k-l} = \frac{P_{kl} - P_{k0}}{P_{l0}} = \frac{x_{cd}(X_{ca} - X_{cb} - X_{da} + X_{db})}{x_{cd}(X_{ab} - X_{aa} - X_{bb} + 2X_{ab})} \quad (7)$$

其中, c, d 分别为线路 k 的首、末节点; x_{cd} 为线路 k 的电抗; X_{ca} 为线路 l 断开前的网络电抗矩阵 $\mathbf{X}$ 第 c 行第 a 列对应的元素, $X_{cb}, X_{da}, X_{db}, X_{aa}, X_{bb}, X_{ab}$ 类似; P_{l0}, P_{k0} 分别为线路 l 和线路 k 的初始有功功率; P_{kl} 为线路 l 断开后,线路 k 的功率。

由 λ_{k-l} 的定义可知, $\lambda_{k-l} > 0$ 表明在线路 l 退出运行后,线路 k 的功率增加, λ_{k-l} 越大,表示转移到线路 k 的潮流越大;当 $\lambda_{k-l} < 0$ 时,线路 k 上的功率不增反减,值得一提的是,当 λ_{k-l} 很小时,线路 k 上的功率有可能出现反向增大的情况,而此时 λ_{k-l} 不能有效反映出有功潮流方向的改变和潮流的变化情况。因此本文通过采用有功增加因子来确定在线路 l 断开后,其余线路功率的增加情况,定义如下^[16]:

$$A_{k-l} = \begin{cases} \lambda_{k-l} & \lambda_{k-l} \geq 0 \\ |\lambda_{k-l}| - \frac{2P_{k0}}{P_{l0}} & \lambda_{k-l} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,当 $A_{k-l} > 0$ 时,线路 l 的功率增加; $A_{k-l} \leq 0$ 表示线路 k 的功率不变或变小,即线路 l 断开不会对其造成危害。因此本文只考虑线路 l 断开对满足 $A_{k-l} > 0$ 线路的影响,另一方面,线路 l 的初始功率 P_{l0} 越大,其切除对系统各线路的影响就越大,综上,本文所提转移脆弱性指标 Z_l 定义如式(9)所示。

$$Z_l = P_{l0} \sum_{k \in T} A_{k-l} \quad (9)$$

其中, T 为满足有功增加因子 $A_{k-l} > 0$ 的线路集合。线路 l 的转移脆弱性指标 Z_l 反映了线路退出运行后,对系统其余线路总的潮流增加程度, Z_l 越大,线路的切除对系统的危害就越大。

1.4 脆弱线路的识别

对于具有大冲击脆弱性 C_l 、小转移脆弱性 Z_l 的线路而言,虽然其易受扰动影响,为系统的薄弱环节,但因为它退出运行后,系统其余线路总的功率增加量较小,线路断开对系统的危害很小,线路 l 不属于脆弱线路。同样地,当线路 l 的冲击脆弱性 C_l 小而转移脆弱性 Z_l 大时,虽然它的断开对系统其余线路影响较大,但较小的 C_l 说明线路所传输的功率大小不容易受到扰动的影响,在当节点对功率增加时,其过载的概率较小,即因潮流转移而出现过载的可能性小,也不属于脆弱线路。因此,脆弱线路应

该同时具有较大的 C_l 和较大的 Z_l , 为此本文提出利用综合指标 V_l 来识别脆弱线路, 其定义如下:

$$V_l = C_l Z_l \quad (10)$$

由式(10)可知, 线路 l 的 V_l 越大, 线路越脆弱, 其断开对电网的影响越大, 在日常安全工作中应重点监视这些脆弱线路, 这是连锁故障预防控制的第一步。同时, 当脆弱线路出现过载时, 工作人员必须做到在保护动作之前, 快速分析脆弱线路的切除是否会引引起其余线路功率越限, 进而决定是保护动作还是采取紧急负荷控制。要实现这一过程就需要实施预防控制的第二步, 寻找脆弱线路的输电断面, 以找出影响较大的相邻线路进行分析。

2 基于功率传输分布因子的输电断面搜索

由第 1 节可以知道, 线路 l 的 V_l 越大, 其断开对电网的影响越大。为了判断脆弱线路断开后, 是否引起全网的连锁故障, 需要搜索出线路 l 的并行输电断面, 并对其进行分析。在实际电力系统中, 工作人员根据地理位置等, 将电源中心与负荷中心的一些联络线路集合构成相应的输电断面。但到目前为止, 学者尚未对输电断面做出过统一的定义。本文根据文献[6], 将在某一基态潮流下, 与脆弱线路有相同电源区或负荷区的输电断面称为线路的并行输电断面。

为了有效识别线路 l 的并行输电断面, 本文提出一种基于功率传输分布因子的输电断面搜索方法。该方法利用上一步的计算结果, 只需进行简单的计算, 不需进行矩阵运算、路径搜索等大规模运算。

通过对输电断面的分析可知, 组成输电断面的线路大多为其并行输电线路, 且互为并行输电线路的 2 条线路, 功率组成成分相似, 传输来自相同的节点对之间的功率即它们的功率传输分布因子存在较为密切的关系^[17]。通过对多个算例分析可知, 除了以下 2 种特殊情况外, 针对线路 l 和线路 k , 它们对节点对 (s, t) 之间的功率传输分布因子越接近, 它们为并行输电线路的可能性越大。

a. 图 1 为单电源向多负荷供电。由图可知, 线路 l 和线路 k 为电源节点 s 向负荷节点 t 进行功率传输的 2 条并行输电线路。根据功率传输分布因子的定义可知, 线路 l 和线路 k 承担由电源节点 s 到负荷节点 t 之间增加的全部功率。因此, 线路 l 和线路 k 的功率传输分布因子 $T_{st}(l)$ 和 $T_{st}(k)$ 关系满足:

$$T_{st}(l) + T_{st}(k) = 1 \quad (11)$$

$$T_{st}(l) + T_{st}(m) = 1 \quad (12)$$

b. 线路 l 、线路 k 和线路 m 为不同电源向同一负荷节点 t 传输功率, 如图 2 所示。

图 2 中当由电源节点 s 到负荷节点 t 输送的功

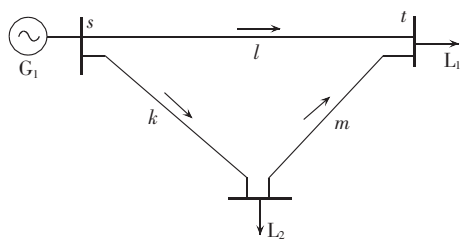


图 1 单电源向多负荷供电示意图

Fig.1 Schematic diagram of single power source to multiple loads

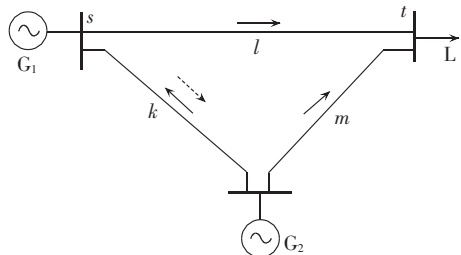


图 2 不同电源向负荷供电示意图

Fig.2 Schematic diagram of multiple power sources to single load

率增加一单位时, 线路 k 的潮流“反向”(如图 2 虚线所示), 与线路 m 组成了由电源节点 s 到负荷节点 t 的另一条路径(除路径 l 外)。这时在求解线路 k 的功率传输分布因子时, 线路 k 的首末节点交换, 即 $\hat{T}_{st}(k) = -T_{st}(k)$ ($T_{st}(k)$ 、 $\hat{T}_{st}(k)$ 分别为线路 k 首末节点交换前、后的功率传输分布因子), 因此 3 条线路之间的 $T_{st}(l)$ 、 $T_{st}(k)$ 和 $T_{st}(m)$ 满足关系:

$$T_{st}(l) - T_{st}(k) = 1 \quad (13)$$

$$T_{st}(k) = -T_{st}(m) \quad (14)$$

分析式(11)~(13)可得, 这 3 个式子可以用式(15)代替表示:

$$|T_{st}(l)| + |T_{st}(k)| = 1 \quad (15)$$

本文正是基于并行输电线路功率传输分布因子的上述关系, 提出了基于功率传输分布因子的输电断面的搜索方法。下面给出其基本原理。

a. 计算脆弱线路 l 与其余输电线路之间的差异系数。

首先分别对满足关系式(14)和(15)的功率传输分布因子进行以下处理, 然后计算线路 l 和线路 k 功率传输分布因子之间的差异系数 D_{k-l} 。

$$d_{st,k-l} = \begin{cases} (T_{st}(l) + T_{st}(k))^2 & |T_{st}(l) - T_{st}(k)| \leq \varepsilon \\ (|T_{st}(l)| + |T_{st}(k)| - 1)^2 & ||T_{st}(l)| + |T_{st}(k)| - 1| \leq \varepsilon \\ (T_{st}(l) - T_{st}(k))^2 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$D_{k-l} = \sum_{s \in G, t \in L} d_{st,k-l} \quad (17)$$

其中, ε 为很小的正数。由式(16)和(17)可知, 2 条线路之间的功率传输分布因子差异系数 D_{k-l} 越小,

它们互为并行输电线路的可能性越大。因此通过计算 2 条线路功率传输分布因子之间的差异系数,即可初步判断线路 l 和线路 k 是否为并行输电线路。

b. 确定脆弱线路 l 的输电断面。

通过步骤 a 的计算,得到其余线路对脆弱线路 l 关于功率传输分布因子差异系数 D_{k-l} 排序 $P(l)$,结合有功增加因子 A_{k-l} 来确定脆弱线路 l 的输电断面,方便工作人员的监视工作,减少紧急状况下的分析量。由输电断面的定义可知,其为有功增幅较大的线路集合,因此本文通过依次计算排序 $P(l)$ 中各线路关于线路 l 的有功增加因子 A_{k-l} 与有功增加因子门槛值 $A_{k-l, \text{set}}$ 的关系 ($A_{k-l, \text{set}} \in (0.2, 0.3)$, 本文取 $0.2^{[6]}$), 确定线路 k 是否属于输电断面。当 $A_{k-l} < A_{k-l, \text{set}}$ 时,搜索结束,输出线路集合,即得到输电断面。

基于功率传输分布因子的脆弱线路关键输电断面搜索方法流程如图 3 所示。其中 N_{st} 为节点对总数, M 为除了脆弱线路 l 外的支路数。

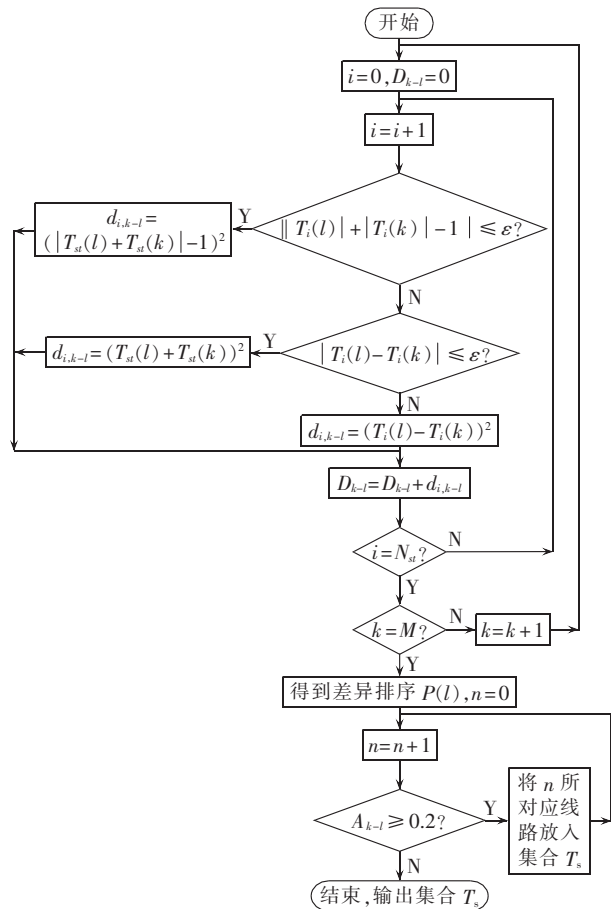


图 3 脆弱线路关键输电断面搜索流程图

Fig.3 Flowchart of key transmission section search for vulnerable line

3 算例分析

为了验证所提方法的有效性,本文采用 IEEE 39 节点标准系统为例进行仿真说明。该系统共有 10 台发电机、39 个节点、12 台变压器和 34 条线路,拓

扑结构如图 4 所示。

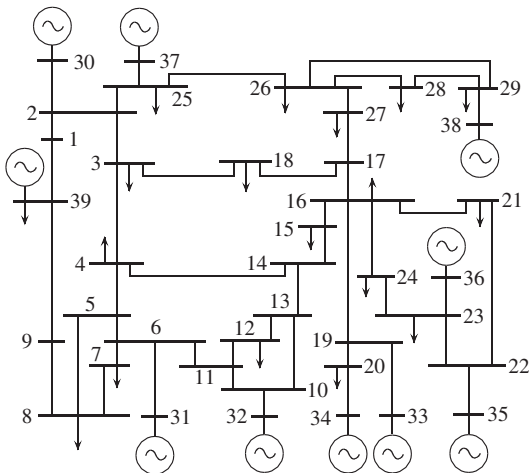


图 4 IEEE 39 节点系统接线图

Fig.4 Wiring diagram of IEEE 39-bus system

3.1 脆弱线路识别结果分析

按照第 1 节所提的脆弱性指标计算方法得到 IEEE 39 节点标准系统 34 条线路归一化后的综合脆弱性指标 V_l^* 部分结果如表 1 所示。为了验证所提指标的有效性,表 1 还包括冲击脆弱性指标 C_l^* 、转移脆弱性指标的归一值 Z_l^* 以及介数指标(本文的最短路径均只考虑电源节点与负荷节点之间的最短路径,共 53 条)。由表 1 可知,同时具备最大的转移脆弱性和排序为第 5 的冲击脆弱性,使得线路 16-15 成为系统最脆弱的线路。线路 16-15 不仅容易受到系统负荷扰动的影响,同时它的退出将引起全网各线路功率的大幅度增加,然而若仅仅从线路的介数来判断其脆弱性,排序仅为 15 的线路 16-15 毫无疑问将被漏选。另一方面,介数排序第 1 的线路 16-17 在本文所提的综合脆弱性指标中排序第 5,说明了本文所提指标在一定程度上也可以反映具有结构脆弱性的线路。冲击脆弱性指标排序第 1 的线路 19-16,虽然在系统负荷增加时,极有可能出现过载现象,但其退出运行所造成的潮流增加程度在所有线路的排序中仅为第 24,即因线路的切除而造成相邻线

表 1 IEEE 39 节点脆弱线路

Table 1 Vulnerable lines of IEEE 39-bus system

线路		指标 V_l^*		指标 C_l^*		指标 Z_l^*		介数	
首端	末端	数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序
16	15	1.0000	1	0.6056	5	1.0000	1	3/53	15
22	21	0.7711	2	0.6287	3	0.7428	3	7/53	4
2	3	0.7431	3	0.6205	4	0.7252	4	4/53	11
25	2	0.4420	4	0.3422	14	0.7822	2	3/53	15
16	17	0.3994	5	0.6662	2	0.3533	14	12/53	1
26	27	0.3887	6	0.4144	10	0.5836	8	3/53	15
19	16	0.1214	17	1.0000	1	0.0735	24	4/53	11
17	27	0.0236	25	0.5270	6	0.0272	28	6/53	5
25	26	0.1245	15	0.4724	7	0.1597	20	6/53	5
14	4	0.0814	21	0.0844	30	0.5840	7	1/53	29

路过载的概率较低,因而不是脆弱线路,线路 17-27、线路 25-26 类似。另一方面,转移脆弱性排序第 7 的线路 14-4,虽然其退出运行,会导致系统潮流较大范围的转移,但因其抗冲击能力强,出现过载现象的可能性极低,因此线路对系统的危害较小,不属于脆弱线路。由此可知,本文所提脆弱性指标通过综合考虑线路的抗冲击能力和切除危害性,量化线路引起连锁故障的概率,能有效搜索出系统的脆弱线路。

3.2 输电断面搜索结果分析

本文通过对最脆弱线路 16-15 和脆弱性排序为 5 的线路 16-17 分别进行关键输电断面搜索,并利用 Power world 仿真软件对线路断开后系统各线路上潮流变化情况进行仿真,以验证方法有效可行。搜索结果分别如表 2 和表 3 所示。由表可知,本文所提方法可以可靠地搜索出当线路 16-15 和线路 16-17 退出运行后,全网所有潮流变化较大的线路。另外,分析表 3 可得,本文所提方法不仅可以可靠地搜索到潮流正向增大的并行输电线路,同时还能有效识别出潮流反向且增大的线路(表 3 的线路 18-3、线路 14-15 等),能有效减少反向漏选问题。不可否认,如表 3 所示,本文所提方法存在极少数漏选线路,究其原因,基于直流模型的功率传输分布因子,由于没考虑当前运行方式负载情况等对其数值的影响,

所以存在少数漏选线路。但通过对漏选线路的分析可知,本文所漏选线路 25-26,其支路开断分布系数为 0.2202,但负载情况排序仅为 29/34(77.1 MW,表示线路当前传输的功率在 34 条线路中排在 29 名),线路负载率较低,有功裕度足够大,因而当线路 16-17 断开后,其剩余容量完全可以传输转移的潮流,不会出现过载现象。

4 结论

为了方便电力系统连锁故障的预防控制,本文首先分析大停电事故发生的主要原因:脆弱线路因过载退出运行后,引起潮流的大范围转移,造成相邻线路出现功率越限,进而导致连锁故障的发生。因此,本文提出在识别脆弱线路的基础上,搜索脆弱线路的输电断面,如此,工作人员在日常工作中只需监视脆弱线路及其输电断面。本文所提指标和算法具有以下特点。

a. 所提识别脆弱线路的指标,综合考虑线路的抗冲击能力和其切除对系统的影响,克服了传统脆弱性指标假设功率只沿着最短路径传输的不足之处。同时当系统的运行方式发生变化时,才重新进行脆弱线路的识别。

b. 所提输电断面搜索方法,巧妙利用已有计算结果,算法只需计算功率传输分布因子之间的差异系数,无需进行大规模矩阵运算、路径搜索等,简单有效,并且能够发现潮流反向增大的线路,进一步减少漏选问题。

参考文献:

[1] 葛睿,董昱,吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术,2007,31(3):1-6.
GE Rui,DONG Yu,LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lesson to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology,2007,31(3):1-6.
[2] PHADKE A G,THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages[J]. IEEE Computer Application in Power,1996,9(3):20-23.
[3] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报,2007,22(10):138-144.
CAO Yijia,CHEN Xiaogang,SUN Ke. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(10):138-144.
[4] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的的大电力系统脆弱线路辨识[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.
[5] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,

表 2 线路 16-15 关键输电断面搜索结果
Table 2 Results of key transmission section search for line 16-15

线路类型	线路		D_{k-l}		A_{k-l}	完全交流计算结果分析
	首端	末端	数值	排序		
搜索情况	14	15	0.068 982	1	1.006 0	增大
	17	18	0.234 256	2	0.779 6	增大
	3	4	0.239 381	3	0.827 4	增大
	18	3	0.341 663	4	0.773 8	增大
	16	17	0.461 512	6	1.003 1	增大
	17	27	0.941 078	7	0.219 8	增大
	25	2	1.027 271	8	0.214 3	增大
	13	14	1.047 832	9	0.285 3	增大
	10	13	1.049 861	10	0.261 8	增大
	边界线路	2	1.065 021	11	0.158 2	增大

表 3 线路 16-17 关键输电断面搜索结果
Table 3 Results of key transmission section search for line 16-17

线路类型	线路		D_{k-l}		A_{k-l}	完全交流计算结果分析
	首端	末端	数值	排序		
搜索情况	16	15	0.107 537	1	0.992 1	增大
	14	4	0.112 952	2	0.712 1	增大
	18	3	0.527 218	4	0.318 8	反向且增大
	11	6	1.330 365	5	0.274 0	增大
	10	11	1.350 943	6	0.251 1	增大
	26	27	1.416 816	7	0.219 3	增大
	14	15	1.573 918	8	0.669 6	反向且增大
	边界线路	6	1.602 782	9	0.191 9	增大
	漏选线路	25	1.893 020	10	0.220 2	增大

- 33(10):40-46,100.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10):40-46,100.
- [6] 周德才, 张保会, 姚峰. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12):32-38.
- ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12):32-38.
- [7] 倪宏坤, 徐玉琴. 基于动态规划原理分支界限算法的关键输电断面搜索方法[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(4):11-15.
- NI Hongkun, XU Yubin. Fast search for the key transmission section based on dynamic-programming principle[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(4):11-15.
- [8] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):193-201.
- WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4):193-201.
- [9] 李响, 张国庆, 郭志忠. 输电断面潮流的 $N-1$ 静态安全约束[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11):10-13, 17.
- LI Xiang, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. $N-1$ principle steady state security restriction on power flow of transmission tie line group[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11):10-13, 17.
- [10] 赵峰, 孙宏斌, 张伯明. 基于电气分区的输电断面及其自动发现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5):42-46.
- ZHAO Feng, SUN Hongbin, ZHANG Boming. Electrical zone division based automatic discovery of flowgates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5):42-46.
- [11] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19):11-16.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19):11-16.
- [12] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE F. Extended topological approach for the assessment of structural vulnerability in transmission networks[J]. IEEE System Journal, 2012, 6(3):481-487.
- [13] BOMPARD E, PONS E, WU Di. Extended topological metrics for the analysis of power grid vulnerability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(6):716-724.
- [14] 徐青山, 王伟, 刘建坤, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10):53-58.
- XU Qingshan, WANG Wei, LIU Jiankun, et al. Application of weighted electric betweenness considering sensitivity factor in identification of vulnerable grid lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10):53-58.
- [15] 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.
- HUA Ke, XIE Kai, GUO Zhizhong. Research on power flow-based transmission by use of DC and AC power transfer distribution factor[J]. Power System Technology, 2007, 31(13):71-74.
- [16] 李莎, 任建文. 基于有功增加因子的潮流转移快速搜索[J]. 电网技术, 2012, 36(12):176-181.
- LI Sha, REN Jianwen. Fast search of power flow transfers based on active power increase factor[J]. Power System Technology, 2012, 36(12):176-181.
- [17] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10):50-56.
- CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast search for key transmission section based on power component of line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10):50-56.

作者简介:



任建文

任建文(1961—),男,山西吕梁人,教授,博士,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等(E-mail: rjw219@126.com);

魏俊姣(1990—),女,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail: wjj903239@163.com)。

Vulnerable line identification and its transmission section search for power system

REN Jianwen, WEI Junjiao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Three steps are proposed to realize the prevention and control of power system cascading failure: vulnerable line identification, transmission section search and control strategy design. Since the vulnerable line is easily affected by the system disturbance and its removal may cause the power flow transfer in whole power network, a comprehensive index is proposed to identify the vulnerable lines, which applies the impact vulnerability to represent its impact-resistance ability and the transfer vulnerability to represent the damage caused by its removal to system. A method of transmission section search based on the difference coefficient of power transmission distribution factor between transmission lines is proposed to determine whether the removal of a vulnerable line will cause a cascading failure. Therefore, the impact of transmission line removal on whole system can be quickly evaluated by only analyzing its impact on the lines within the transmission section. Results of calculation for the standard IEEE 39-bus system verify the proposed index and method are effective and feasible.

Key words: electric power systems; prevention and control; power transfer distribution factor; vulnerability; vulnerable line; transmission section; search; difference coefficient