

电力系统脆性源辨识初探

徐建军, 闫丽梅, 付光杰, 赵玉峰, 李宏玉

(大庆石油学院 电气工程系, 黑龙江 大庆 163318)

[摘 要] 电力系统的脆性源是电力系统脆性激发的源头, 基于直流潮流和分布因子法相结合, 提出了快速找到系统脆性源的方法和步骤, 并以三母线电力系统脆性源辨识为例, 证明了此方法的有效性。

[关键词] 电力系统; 系统脆性; 脆性源辨识; 直流潮流; 分布因子; 脆性激发

[中图分类号] TM 711

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0231-04

Initial study of brittle source identification of electric power system

XU Jian-jun, YAN Lim ei, FU Guang-jie, ZHAO Yu-feng, LI Hong-yu

(Electric Engineering Department, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract Brittle source of electric power system is the element of inducing brittleness. Based on the combination of direct current ride and distributing factor method, a method to locate the brittle sources was put forward. Then analysis of a three generatrix system proved the effectiveness of this method.

Key words: electric power system; system brittleness; brittle source identification; breach tide; distributing factor; brittleness motivation

脆性是系统的一种属性^[1]。系统的脆性问题已引起了不少学者的关注, 如闫丽梅等^[1-2]从复杂系统的特性方面分析了系统崩溃的过程, 并对复杂系统的崩溃机理进行了初步探索; 金鸿章等^[3]基于滑动检验法对SARS疫情进行了脆性分析; 韦琦等^[4]、徐建军等^[5]分别利用脆性势函数和模糊层次分析法对系统的脆性进行了分析。对系统脆性的研究发现, 只有一部分子系统或元件才能引起系统的脆性^[2,5]。一般将这类子系统或元件称为系统的脆性源。

系统中的脆性源一旦受到系统外界或内部条件的影响, 就会在系统内部引起连锁式的崩溃, 最终使整个系统处于崩溃的境地, 即系统中的脆性被激发出来, 从而给系统造成不可估量的损失。而脆性源是造成脆性事故发生的前提, 所以如何求出系统中的所有脆性源, 是防止系统脆性激发的关键。只有有效地对脆性源进行辨识, 进而对其进行控制和管理, 才能有效控制脆性的激发几率, 或在脆性被激发的初

期根据脆性激发的轨迹, 采取有效措施切断脆性传播的路径, 达到防止或控制脆性激发的目的, 这对于确保系统的安全具有非常重要的意义。

脆性源辨识的方法就是建立系统模型, 对每个元件进行脆性故障激发的模拟, 最终找出所有的脆性源。但迄今为止, 尚未有脆性源辨识方面的研究报告。本文基于直流潮流和分布因子的方法, 对三母线电力系统进行了脆性分析, 找到了此三母线系统的脆性源, 并在此基础上总结了电力系统脆性源的一些特点, 以期能快速、及时地发现电力系统中的脆性源提供参考。

1 电力系统的脆性

脆性激发的一个本质特征就是连锁性崩溃的形成。对电力系统大停电现象的研究发现, 电力系统发生的大停电主要是由电力系统的连锁性故障引起

° [收稿日期] 2006-01-09

[基金项目] 黑龙江省教育厅科学技术研究基金项目(11511021, 10551014)

[作者简介] 徐建军(1971-), 男, 江苏如皋人, 副教授, 博士, 主要从事电气控制理论与应用研究。

的^[6-8]。连锁性故障表现为由于干扰或其他原因,使电力系统的一部分电力传输线路或一部分供电电源自动与线路断开,这将会使其他的线路或电源承受其所带来的冲击,导致这些线路或电源的连锁反应跳闸,使系统发生电压崩溃、频率崩溃或解列,最终使整个电力系统出现不可避免的大停电事故。电力系统的这种连锁性故障行为,实际上就是系统脆性的传播过程。引起故障传播的断开线路或元件实际上就是电力系统的脆性源,电力系统发生的大停电现象就是电力系统脆性激发的结果。所以进行电力系统的脆性分析,是解决目前电力系统大停电的一种良好措施。

2 电力系统脆性源的辨识方法

电力系统中包含的元件很多,但并不是所有的元件都能引起电力系统的脆性,所以需要对电力系统中的脆性源进行辨识,找出能导致电力系统脆性激发的脆性源,对其进行重点监视,以减小电力系统脆性的激发几率。

电力系统脆性源的辨识方法就是建立电力系统模型,然后对所有的元件进行故障模拟,如果此元件的开断引起电力系统其他元件的开断,并能使故障连锁性地传播,最终导致整个电力系统中的所有线路全部开断,就说明此元件为脆性源。反之,如果某元件的开断对其他线路的影响较小,则此元件就不是脆性源。

建立电力系统模型后,就要对电力系统中各线路的潮流进行求解。求解电力系统潮流的方法很多,如高斯法、牛拉法、PQ分解法、直流潮流法、最优潮流法等等。由于电力系统的脆性源一旦被激发,将会给整个系统造成灾难性的影响,因此希望在电力系统运行的同时,时时在线地求取电力系统中的脆性源,使得在脆性激发的初期就意识到脆性的严重后果,在脆性源受到外界的打击而崩溃退出运行并断开后,能立即采取快速有效的措施,避免脆性传播的扩大,因此一般要求具备脆性源判断的快速性。直流潮流法应用于对计算精度要求不高,而对计算速度要求很高的情况,一般情况下计算出来的系统的直流潮流和同样条件下计算出来的交流潮流相比相差很少。因此在误差允许的范围内,采用直流潮流法可以快速求出每个支路中的电流。

用直流潮流法计算出整个系统的初始潮流分布后,再用分布因子法计算出某条线路开断后引起的

线路潮流的重新分配情况,如果重新分配的结果使得系统中的某条线路过载,且过载系数达到 $1.2^{[9]}$,则此条线路就必然开断,使得系统中的潮流在整个电力系统中又再次重新分配,如此往复,直至所有线路开断或所有线路都在过载值以内结束。为了求出系统中的所有脆性源,就必须对每条线路都作此处理,直至找到系统中的全部脆性源为止。

脆性源辨识的步骤如下:

步骤1: 给出系统各节点给定的注入有功功率 P_i^{SP} ;

步骤2: 给出系统中节点 i 和 j 间各支路的标号 l 和电抗值 $x_{ij} = x_l$;

步骤3: 选定某一节点为参考节点,该节点电压相角 θ 为零,即 $\theta = 0$;

步骤4: 建立去除参考节点的节点导纳矩阵 $B_0^{[7]}$ 。 B_0 是 $(n-1) \times (n-1)$ 阶矩阵,其中的元素为

$$\begin{cases} B_0(i, i) = \sum_{j \neq i} 1/x_{ij}, \\ B_0(i, j) = -1/x_{ij}; \end{cases}$$

步骤5: 求节点导纳矩阵 B_0 的逆矩阵,即为阻抗矩阵 $X = B_0^{-1}$;

步骤6: 求各节点的电压相角矩阵 $\theta = XP^{SP}$;

步骤7: 求各支路的有功潮流^[10]: $P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij}$;

步骤8: 对支路 l ($l = 1, 2, \dots, m$)依次开断,令中间变量 $\eta = XM_l$,其中 M_l 是支路 l 的关联矩阵;

步骤9: 求其他各支路相对于支路 l 的自阻抗和互阻抗,即 $X_{k-l} = M_k^T \eta$, $X_{l-l} = M_l^T \eta$;

步骤10: 求支路 k ($k \neq l$)与支路 l 间的支路潮流分布因子 $D_{k-l}^{[10]}$,即 $D_{k-l} = \frac{X_{k-l}/X_k}{1 - X_{l-l}/X_l}$;

步骤11: 求开断后各支路的潮流 $P^{[7]}$ 。有 $P_k^l = P_k + D_{k-l}P_l$;

步骤12: 假定各支路都工作于额定值,求各支路的潮流增加量。

若超过额定值的20%,则此支路开断。重做步骤8,否则结束。

3 实例应用

以下面的三母线电力系统为例,求此系统的脆性源。已知系统的节点注入功率如图1所示,其中(1), (2), (3), (4)为支路; , 为节点。各支路的电抗(x)为: $x_{32} = x_{12} = 0.2$, $x_{21} = x_{23} = x_{34} = x_{31} = x_{44} = 0$ 。其中支路(2), (3)是双回输电线。

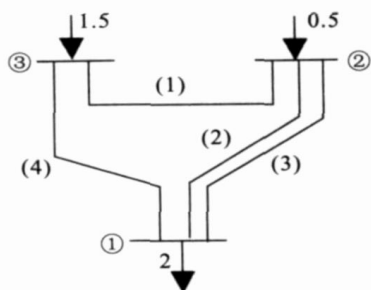


图1 三母线电力系统示意图

Fig 1 Three lines diagram of electric power system

选取节点 1 为参考节点, 该节点的电压相角为零。则

$$B_0 = \begin{bmatrix} 15 & -5 \\ -5 & 10 \end{bmatrix}, X = B_0^{-1} = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 3 \end{bmatrix},$$

$$P^{SP} = \begin{bmatrix} -2 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \theta = X P^{SP} = \begin{bmatrix} -0.14 \\ -0.02 \end{bmatrix}.$$

各支路的潮流为

$$P_{12} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{X_{12}} = -0.6, \text{ (由于 } \theta_1 > \theta_2 \text{, 节点间为双回}$$

母线, 则每条线上的潮流为 } -0.3), P_{13} = \frac{\theta_1 - \theta_3}{X_{13}} =

$$-1.4, P_{23} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{X_{23}} = -0.1.$$

则各条支路上的潮流如图2所示。

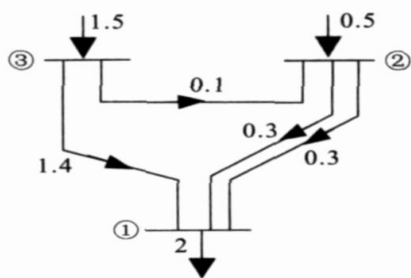


图2 三母线电力系统潮流分析

Fig 2 Tide of three lines of electric power system

分别开断支路(1), (2), (3), (4), 研究某一支路断开对其他支路的影响。

3.1 断开支路(2), (3)

由于断开支路(2), (3)中的任何一条支路时的形式完全一样, 所以对(2), (3)支路开断只计算1次。设断开(2), 则

$$\eta_2 = X M_2 = \begin{bmatrix} -0.04 \\ 0.08 \end{bmatrix}.$$

支路(1), (3)和(4)与支路(2)节点间的自阻抗

和互阻抗为:

$$X_{1-2} = M_1^T \eta_2 = -0.08, X_{2-2} = M_2^T \eta_2 = 0.12,$$

$$X_{3-2} = M_3^T \eta_2 = 0.12, X_{4-2} = M_4^T \eta_2 = -0.04.$$

支路(2)断开引起支路(1), (3)和(4)的潮流分布因子分别为:

$$D_{1-2} = \frac{X_{1-2}/X_1}{1 - X_{2-2}/X_2} = -\frac{4}{7},$$

$$D_{3-2} = \frac{X_{3-2}/X_3}{1 - X_{2-2}/X_2} = \frac{3}{7},$$

$$D_{4-2} = \frac{X_{4-2}/X_4}{1 - X_{2-2}/X_2} = \frac{4}{7}.$$

开断后的潮流为:

$$P_1^2 = P_1 + D_{1-2} P_2 = -0.07143,$$

$$P_3^2 = P_3 + D_{3-2} P_2 = -0.42857,$$

$$P_4^2 = P_4 + D_{4-2} P_2 = 1.57143.$$

则各支路的潮流增加量为:

$$\Delta P_1^2 = -0.6143 < 0, \Delta P_3^2 = 0.42857, \Delta P_4^2 = 0.12245.$$

由于支路(3)达到额定值的20%而开断。则由于支路(3)开断引起的(1), (4)支路潮流分布因子为:

$$D_{1-3} = \frac{X_{1-3}/X_1}{1 - X_{3-3}/X_3} = -1,$$

$$D_{4-3} = \frac{X_{4-3}/X_4}{1 - X_{3-3}/X_3} = 1.$$

开断后的潮流为:

$$P_1^3 = P_1 + D_{1-3} P_3 = -0.35714,$$

$$P_4^3 = P_4 + D_{4-3} P_3 = 2.$$

则各支路的潮流增加量为:

$$\Delta P_1^3 = -3.9999, \Delta P_4^3 = 0.27273.$$

由以上计算可知, 由于支路(2)开断而导致支路(3)开断, 从而引起支路(1)和(4)开断, 所以支路(2)为脆性源。同理, 支路(3)也是脆性源。因此, 如果电力系统中的支路为双母线, 则其特性相同, 即如果其一是脆性源, 则另一个也是脆性源, 反之亦成立。从计算结果可以看出, 开断支路电流比较大的支路容易引起脆性激发。

3.2 断开支路(1)

支路(1)开断引起支路(2), (3)和(4)的潮流分布因子分别为:

$$D_{2-1} = \frac{X_{2-1}/X_2}{1 - X_{1-1}/X_1} = 0.25,$$

$$D_{3-1} = \frac{X_{3-1}/X_3}{1 - X_{1-1}/X_1} = 0.25,$$

$$D_{4-1} = \frac{X_{4-1}/X_4}{1 - X_{1-1}/X_1} = 0.25.$$

开断后的潮流为:

$$P_2^1 = P_2 + D_{2-1}P_1 = 0.325,$$

$$P_3^1 = P_3 + D_{3-1}P_1 = 0.325,$$

$$P_4^1 = P_4 + D_{4-1}P_1 = 1.425.$$

则各支路的潮流增加量为:

$$\Delta P_2^1 = 0.08333, \Delta P_3^1 = 0.08333, \Delta P_4^1 = 0.01786.$$

由此可知,支路(1)的开断并不会导致脆性的激发,所以支路(1)不是脆性源。这也说明了并不是系统中的所有元件都为脆性源。

3.3 断开支路(4)

支路(4)开断引起支路(1)、(2)和(3)的潮流分布因子分别为:

$$D_{1-4} = \frac{X_{1-4}/X_1}{1 - X_{4-4}/X_4} = 1,$$

$$D_{2-4} = \frac{X_{2-4}/X_2}{1 - X_{4-4}/X_4} = 0.5,$$

$$D_{3-4} = \frac{X_{3-4}/X_3}{1 - X_{4-4}/X_4} = 0.5.$$

则开断后的潮流为:

$$P_1^4 = P_1 + D_{1-4}P_4 = 1.5,$$

$$P_2^4 = P_2 + D_{2-4}P_4 = 1,$$

$$P_3^4 = P_3 + D_{3-4}P_4 = 1.$$

各支路的潮流增加量为:

$$\Delta P_1^4 = 1.4, \Delta P_2^4 = 0.33, \Delta P_3^4 = 0.33.$$

由此可知,支路(4)开断后,导致支路(1)、(2)、(3)全部开断,故支路(4)也是脆性源。

综上所述,系统的脆性源为(2)、(3)和(4)支路。在这里需要特别说明的是,系统的3个母线也是系统的元件,也可以计算其是否为脆性源。其计算方法类似,这里不再赘述。

4 结论

只有系统的脆性源才会引起脆性的激发。因此

对脆性源的辨识也成为有效预防脆性激发的一个有效措施。本文基于直流潮流和分布因子的方法,提出了快速确定系统脆性源的步骤,通过3节点系统的计算,得到了此系统的脆性源。通过求取的过程,可以看到电力系统的脆性源具有高潮流值的特点。只要对脆性源进行实时监控,就会降低系统脆性激发的风险。

[参考文献]

- [1] 闫丽梅,金鸿章,荣盘祥,等.系统的脆性及其脆性源[J].哈尔滨工程大学学报,2006,27(2):223-226.
- [2] 闫丽梅,金鸿章,付光杰,等.复杂系统崩溃机理初探[J].大庆石油学院学报,2004,28(5):56-60.
- [3] 金鸿章,郭健,韦琦,等.基于滑动检验法的非典型性肺炎疫情的脆性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2003,24(6):640-645.
- [4] 韦琦,金鸿章,郭健.基于脆性的复杂系统崩溃的研究[J].哈尔滨工程大学学报,2003,24(2):161-165.
- [5] 徐建军,闫丽梅,刘小斌.模糊层次分析法在变压器脆性分析中的应用[J].电工技术学报,2005,20(2):94-98.
- [6] Dobson I, Chen J, Throp J S, et al. Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events[C]//35th Hawaii International Conference on System Sciences Maui, Hawaii: Hawaii Press, 2002: 63-70.
- [7] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts[C]//Proceeding of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii: Hawaii Press, 2000: 705-709.
- [8] Carreras B A, Newman D E. Evidence for self-organized criticality in electric power blackouts[C]//34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui, Hawaii: Hawaii Press, 2001: 4038-4045.
- [9] 耿毅.工业企业供电[M].北京:冶金工业出版社,1985.
- [10] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.