

一种考虑连锁过载和隐性故障的 电网脆弱区域分析方法

邓慧琼¹, 张颖²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林长春 132012; 2. 河北科技大学电气信息学院, 河北石家庄 050018)

摘要:针对电网的连锁过载现象,提出了一种划分和识别电网脆弱区域的算法。首先从初始故障支路对剩余系统支路产生作用的角度,提出了受动敏感性和使动敏感性的概念,然后在考虑继电保护隐性故障的模式下,给出了初始故障支路和剩余系统支路之间的关联作用指标以及初始故障支路对剩余系统支路形成敏感性的指标,将这些指标作为特征输入量给出了一种基于聚类方法的电网脆弱区域的划分和识别算法,并在IEEE 39节点系统上进行了算例分析,验证了算法的合理性。

关键词:电力系统;连锁故障;相继开断;关联作用;隐性故障;敏感性

中图分类号:TM711 文献标志码:A

A method for distinguishing sensitive areas in power network based on hidden failure of relay cascading successive failures

DENG Huiqiong¹, ZHANG Ying²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin Changchun 132012, China; 2. School of Electrical Engineering and Information Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: Based on DC flow algorithm, the key correlation factors for cascading successive failures are analyzed. Furthermore, with the probability model of hidden failure of relay considered, the sensitive behaviors in cascading successive failures are analyzed, and effects of the key correlation factors on the sensitive behaviors are analyzed. Then, based on the key correlation factors and the sensitive indexes, and from the view of subjecting and actuating, the basic structure and algorithm for distinguishing sensitive areas in power network under the condition of cascading successive failures are proposed. Some examples with IEEE 39-bus test system show the rationality of the algorithm.

Key words: power system; cascading failure; successive failure; correlation; hidden failure; sensitivity

在电网中,连锁过载跳闸事件有可能引起更复杂的连锁反应事件甚至大停电事故,所以长期以来受到了人们普遍的重视。文献[1]研究了连锁过载深度发展所形成的多重故障的概率表示方法,文献[2]研究了基于广域信息的防止连锁过载跳闸的距离保护原理,文献[3]研究了基于潮流转移灵敏度的用于防止连锁过载的距离保护算法,文献[4]提出了基于地理信息系统的连锁过载分析算法,文献[5]研究了基于线路过负荷的连锁过载识别方法,等等。这些研究为进一步研究电网的连锁过载现象及其防治策略提供了良好的借鉴。

引起电网连锁过载的重要因素是大规模的潮流转移和继电保护的隐性故障^[6-9]。连锁过载事件的发生

收稿日期:2012-12-06;修回日期:2012-12-23;责任编辑:李穆

作者简介:邓慧琼(1972-),男,山西大同人,讲师,博士,主要从事电网连锁故障分析方面的工作。

E-mail:denghuiqiong66@126.com

说明电网中存在一些脆弱的环节,一方面,如果某一支路发生初始故障后因潮流转移引起了连锁过载,说明该初始故障支路是电网中的一个脆弱环节;另一方面,初始故障发生后,若剩余系统的某些支路发生了连锁过载,说明这些支路相对于其他支路更容易受到初始故障的影响,对初始故障更加敏感,所以也可以视为电网中的一些脆弱环节。笔者针对上述2方面的问题,针对初始故障为支路故障的情形,从初始故障支路对剩余系统支路施加敏感性和剩余系统支路对初始故障支路接受敏感性的角度,分别提出了使动敏感性和受动敏感性的概念,在结合考虑继电保护隐性故障的情况下,对2种敏感性表现进行了分析,然后在此基础上提出了电网脆弱区域划分和识别的算法。

1 基本分析

由潮流转移引起的连锁过载事件其一般表现是:当电网中的某一支路发生初始故障后,该支路原来所传输的功率通过潮流转移分配到其他支路上去,如果某些支路发生过载时,这些支路就有可能跳闸。其跳闸的可能形式是:由于过载,线路的电气测量值进入某些Ⅲ段保护的動作区内而被跳开,或被专门的过负荷保护跳开,或因其传输的功率超过了线路热稳定所允许的极限致使导线软化进而与其下方的物体短路而被保护跳开,等等。笔者主要针对线路传输功率超过其热稳定极限的形式并结合继电保护隐性故障,对潮流转移产生的脆弱性问题进行分析。

连锁过载本质上也是一种连锁故障,只不过是一种特定的连锁故障形式而已,产生这种现象的主要原因是前级故障支路和后续故障支路之间的连锁关联作用。设初始故障支路为 L_j ,由直流潮流法可知,当 L_j 开断后,剩余系统中的支路 L_i 的传输功率为^[10]

$$P_i = P_{i(0)} + \Delta P_i(j) = P_{i(0)} + \lambda_j(i) P_{j(0)} \quad (1)$$

式中: $P_{i(0)}$ 和 $P_{j(0)}$ 分别为支路 L_i 和 L_j 原来传输的功率; $\Delta p_i(j)$ 是支路 L_i 的功率增量; $\lambda_j(i)$ 是支路 L_j 故障前支路 L_i 的功率增量系数。由式(1)可见,支路 L_j 对支路 L_i 的关联作用主要由 $\lambda_j(i)$ 来体现。当然,支路 L_i 是否发生过载跳闸还要看 P_i 和其允许极限 P_{limit} 之间的关系,在考虑继电保护隐性故障时,可用支路 L_i 的跳闸概率 $P_{\text{HF}}(i)$ 来衡量其表现, $P_{\text{HF}}(i)$ 的取值由式(2)确定^[9,11-12]:

$$P_{\text{HF}}(i) = \begin{cases} P_H, & F_i < F_{\text{limit}}; \\ (F_i - F_{\text{limit}}) \frac{P_M - P_H}{1.4F_{\text{limit}} - F_{\text{limit}}} + P_H, & F_{\text{limit}} < F_i < 1.4F_{\text{limit}}; \\ P_M, & F_i > 1.4F_{\text{limit}}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:为了便于区别,将概率以“ P ”表示,功率以“ F ”表示,其中, F_{limit} 为支路 L_i 的允许潮流限值; F_i 为支路 L_i 的传输功率; $P_{\text{HF}}(i)$ 为支路 L_i 的動作概率; P_M 为继电保护正确動作概率; P_H 可看作是继电保护的基础隐性故障概率^[6]。

当支路 L_i 发生连锁开断后,支路 L_i 所传输的功率 P_i 将进一步在电网中扩散,可采用如下的指标来表示支路 L_i 开断后的风险:

$$R(i) = P_i \times P_{\text{HF}}(i) \quad (3)$$

综合以上分析,当支路 L_j 发生初始开断故障时,支路 L_i 的相继开断故障概率 $P_{\text{HF}}(i)$ 和相继开断风险 $R(i)$ 可以分别用来表征支路 L_i 对支路 L_j 的敏感性。就二者之间的关系而言,支路 L_j 是这种敏感性的使动者,而支路 L_i 是这种敏感性的受动者,造成这种敏感性的基础是二者之间的关联作用,所以可以利用 $\lambda_j(i)$, $P_{\text{HF}}(i)$ 和 $R(i)$ 这些指标分别从使动和受动的角度来分析电网的脆弱环节。

2 脆弱区域分析的基本结构及算法流程

2.1 从受动的角度分析电网的脆弱环节

从受动的角度分析电网脆弱环节的基本结构如图1所示。该结构反映的是某一支路 L_j 发生初始故障后,电网其余部分的任一支路对此初始故障的敏感反应及其表现的严重程度。

对于图1所示的形式,当支路 L_j 发生初始故障后,由于剩余系统各支路的 λ_j 和 P_{HF} 以及 R 这3项指标的取值各不相同,所以分析这种情形下的脆弱环节的主要思路是:利用 λ_j 和 P_{HF} 以及 R 作为特征输入量,采用聚类方法对剩余系统的支路进行划分,将那些 λ_j , P_{HF} 和 R 值都比较接近的支路划分在一起,并从划分的

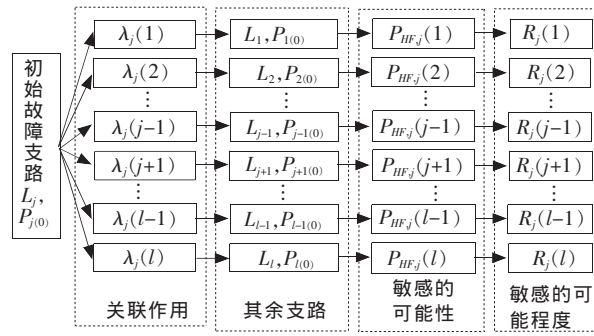


图 1 受动敏感性的作用示意图

Fig. 1 Sensitivity schematic diagram of branches subjected to an initial failure

结果中找出 λ_j, P_{HF} 和 R 值较大的集合,进而以此作为剩余系统中受扰严重的脆弱环节。为了便于叙述,笔者将这些划分出来的支路集合称为区域。算法的基本流程如下。

- 1) 设定可能的初始故障支路 L_j , 并取受扰的故障支路集合 $S = \{L_1, L_2, \dots, L_{j-1}, L_{j+1}, \dots, L_l\}$, 即除支路 L_j 以外的其余所有支路的集合。
- 2) 计算与支路 L_j 对应的各支路的 λ_j 值。
- 3) 当 $\lambda_j(i) = 0$ 或 $\lambda_j(i)$ 小于某一很小的设定值时,说明该支路和初始故障支路 L_j 的关联性极小,可以直接从集合 S 中去掉,不予进一步考虑。
- 4) 对集合 S 中剩下来的支路,按式(2)、式(3)计算其 P_{HF} 值和 R 值。
- 5) 考察集合 S 中剩下来的支路数量,如果集合 S 中的支路数量较少,例如小于或等于 2,则可以根据 3) 和 4) 的计算结果直接给出敏感区域的划分和识别,并转向 7), 终止进一步的分析;如果集合 S 中的支路数量较多,则利用 3) 和 4) 的计算结果并采用聚类方法进行划分,然后转向 6)。
- 6) 利用聚类的结果筛选受扰严重的支路集合。
- 7) 结束分析。

2.2 从使动的角度分析电网的脆弱环节

从使动的角度分析电网的脆弱环节的基本结构如图 2 所示。

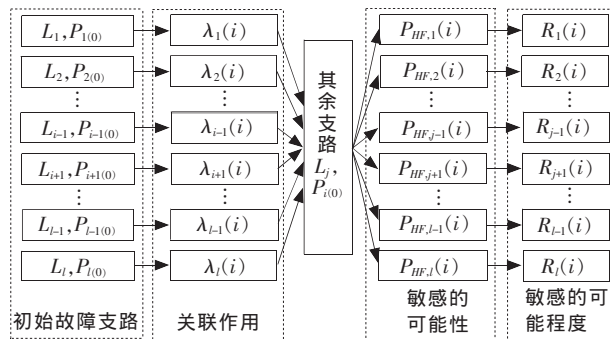


图 2 使动敏感性的作用示意图

Fig. 2 Sensitivity schematic diagram of branches with initial failure of some line

该结构反映的是对于电网的某一支路 L_i , 电网中其他任一支路 L_j 发生初始故障后对其产生的敏感作用。和图 1 的作用形式类似,分析电网脆弱环节的算法仍以 λ_j 和 P_{HF} 以及 R 作为特征输入量,然后对不同的初始故障支路进行划分,最后再从划分的结果中找出 λ_j, P_{HF} 和 R 值较大的集合,以此作为初始故障中施扰严重的脆弱环节。具体的算法流程如下。

- 1) 设定可能的受初始故障波及的支路 L_i , 并取初始故障支路集合 $S = \{L_1, L_2, \dots, L_{i-1}, L_{i+1}, \dots, L_l\}$, 即除支路 L_i 以外的其余所有支路的集合。

- 2) 计算每一初始故障支路和 L_i 之间的 $\lambda_j(i)$ 值。
- 3) 当 $\lambda_j(i) = 0$ 或 $\lambda_j(i)$ 小于某一很小的设定值时, 直接将该初始故障支路从集合 S 中去掉。
- 4) 对集合 S 中剩下来的初始故障支路, 按式(2)、式(3)计算其对支路 L_i 造成的 P_{HF} 值和 R 值。
- 5) 考察集合 S 中剩下来的初始故障支路数量, 如果集合 S 中的支路数量较少, 则根据 3) 和 4) 的计算结果直接给出敏感区域的划分和识别, 并转向 7); 如果集合 S 中的初始故障支路数量较多, 则利用 3) 和 4) 的计算结果并采用聚类方法进行划分, 然后转向 6)。
- 6) 利用聚类的结果筛选施扰严重的支路集合。
- 7) 结束分析。

3 算例分析

为了进一步对算法进行说明, 笔者采用 IEEE 39 节点系统进行算例演示。在此算例中, 计算采用标么值进行, 系统的基准容量取为 100 MVA。在计算时, 由于缺乏 P_H , P_M 和 P_{limit} 等数据, 算例中采用虚拟数据进行模拟。以下分别给出一个受动敏感性算例和一个使动敏感性算例, 即下面的算例 1 和算例 2。

3.1 算例 1

按照 2.1 中的流程, 设定初始故障支路为节点 14 和节点 15 之间的支路。为了便于将分析结果列表, 以下将支路的表示由前面的以编号表示的形式改为以支路两端的节点表示的形式, 如节点 14 和节点 15 之间的支路表示为 L_{14-15} 。IEEE 39 节点系统的节点编号可参见图 3。

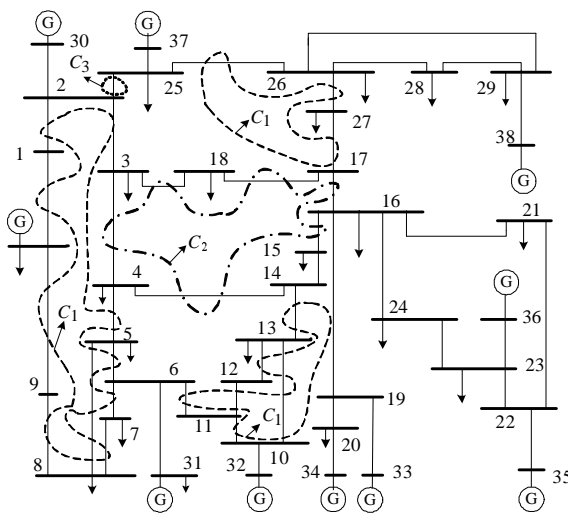


图 3 算例系统及算例 1 的结果示意图

Fig. 3 Diagram of IEEE 39-bus system and the results of the first example

设定初始故障支路后, 主要的分析过程如下。

1) 计算和初始故障支路 L_{14-15} 对应的其余各支路的 $\lambda_j(i)$ 值。 $\lambda_j(i)$ 值的计算采用文献[13]中的方法, 然后将那些 $\lambda_j(i) < 10^{-10}$ 的支路略掉, 剩下的支路一共有 26 条。在分析时, 考虑到 $\lambda_j(i)$ 反映的是支路间的关联作用, 尽管关联作用有可能导致支路 L_i 增加的功率与其原来传输的功率相反, 从而会出现关联所用较大而敏感性较小的情况, 但由于在脆弱区域的划分和识别算法中, λ_j , P_{HF} 和 R 这 3 个量是被放在一起通盘考虑的, 关联作用较大而敏感性较小的情况可以单独划分为一类, 所以, 这里将 $\lambda_j(i)$ 取为绝对值。

2) 对剩下来的 26 条支路, 由于其数量比较多, 按 2.1 的算法流程, 对其采用聚类方法进行分析。在聚类分析中, 采用了较为广泛使用的模糊 C 均值(FCM)聚类算法, 采用该算法主要是因为该算法的程序实现较为简单。其算法流程和聚类损失函数的定义采用文献[14]的形式, 最佳类数采用划分熵[15]来确定。

进行聚类分析后, 受动敏感区一共划分为 3 类, 其结果见表 1~表 3。在分析中, 对于 P_M 的取值, 考虑

到线路保护的正確动作率比较高,一般可以达到 90%以上^[16],所以这里假定为 0.91;对于 P_H 的取值,参照文献[9], P_H 一般比较小,文献[9]分别取 $P_H=0.0203$ 和 $P_H=0.0013$,由于缺乏这方面的数据,本文折中考虑,暂取为 $P_H=0.01$ 来计算。不过这些数据均为虚拟数据,主要是为了算例演示。由式(2)可见, P_H 和 P_M 取不同值时会影响到 P_{HF} 的结果,进而由式(3)可见这会进一步影响到 R 的结果,所以会影响到支路的划分结果。由于本文重在讨论脆弱支路的划分,同时限于篇幅,所以只列出 P_H 和 P_M 取上述假定值时脆弱支路的划分结果。

与表 1~表 3 所列的各类区域相对应,图 3 中画出了这些区域,分别由曲线 C_1, C_2 和 C_3 所穿越的范围来表示。

表 1 算例 1 的第 1 类结果

Tab. 1 First kind of results in the first example

| 受扰支路 | P_{limit} | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|-------------|-------------|----------------|----------|-----------|
| L_{1-2} | 1.3 | 0.040 025 | 0.01 | 0.010 912 |
| L_{1-39} | 1.3 | 0.040 025 | 0.01 | 0.010 343 |
| L_{2-3} | 3.8 | 0.016 139 | 0.01 | 0.033 468 |
| L_{4-5} | 2 | 0.031 621 | 0.01 | 0.016 464 |
| L_{5-6} | 5 | 0.048 655 | 0.01 | 0.047 146 |
| L_{5-8} | 3.3 | 0.017 034 | 0.01 | 0.031 221 |
| L_{6-7} | 4.5 | 0.022 991 | 0.01 | 0.041 810 |
| L_{6-11} | 3.8 | 0.071 646 | 0.01 | 0.034 286 |
| L_{7-8} | 2.3 | 0.022 991 | 0.01 | 0.019 045 |
| L_{8-9} | 1 | 0.040 025 | 0.01 | 0.000 833 |
| L_{9-39} | 1 | 0.040 025 | 0.01 | 0.001 268 |
| L_{10-11} | 4 | 0.065 201 | 0.01 | 0.032 681 |
| L_{10-13} | 3.2 | 0.065 201 | 0.01 | 0.028 203 |
| L_{11-12} | 1 | 0.006 445 | 0.01 | 0.000 207 |
| L_{12-13} | 1 | 0.006 445 | 0.01 | 0.000 422 |
| L_{13-14} | 3.3 | 0.071 646 | 0.01 | 0.029 146 |
| L_{17-27} | 1 | 0.056 164 | 0.01 | 0.000 828 |
| L_{25-26} | 1 | 0.056 164 | 0.01 | 0.007 205 |
| L_{26-27} | 3 | 0.056 164 | 0.01 | 0.023 927 |

表 2 算例 1 的第 2 类结果

Tab. 2 Second kind of results in the first example

| 受扰支路 | P_{limit} | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|-------------|-------------|----------------|----------|-----------|
| L_{3-4} | 1 | 0.217 91 | 0.01 | 0.005 854 |
| L_{3-18} | 1 | 0.201 77 | 0.01 | 0.003 288 |
| L_{4-14} | 3 | 0.186 29 | 0.01 | 0.026 306 |
| L_{15-16} | 3.3 | 0.257 93 | 0.01 | 0.026 824 |
| L_{16-17} | 2.2 | 0.257 93 | 0.01 | 0.018 781 |
| L_{17-18} | 2.3 | 0.201 77 | 0.01 | 0.016 378 |

表 3 算例 1 的第 3 类结果

Tab. 3 Third kind of results in the first example

| 受扰支路 | P_{limit} | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|------------|-------------|----------------|----------|-----------|
| L_{2-25} | 2.5 | 0.056 164 | 0.300 85 | 0.849 340 |

由图3和表1~表3可见,对于第1类支路集合,各受扰支路和初始故障支路有一定的关联度,但是其对初始故障的敏感性不大,即 P_{HF} 和 R 值较低,所以这类支路可以放在比较次要的位置上;对于第2类支路集合,各受扰支路对初始故障的敏感性不强,但其和初始故障支路之间的关联度比较大,这类支路应引起一定的重视,因为其与初始故障之间的关联作用比较大,当运行条件改变时, P_{HF} 和 R 值也可能会增加;对于第3类支路集合,各受扰支路和初始开断支路之间的关联度与第1类支路集合相似,但是其对初始故障的敏感性比较大,所以在当前运行条件下应引起重视。

3.2 算例2

按照2.2的流程,设定支路 L_{13-14} 为待考察支路,然后通过分析其他任一支路发生初始故障后对支路 L_{13-14} 造成的影响,将各初始故障支路进行划分。和算例1类似,首先计算各初始故障支路和 L_{13-14} 之间的 $\lambda_j(i)$ 值,然后根据该值舍弃那些和支路 L_{13-14} 之间关联很小的初始故障支路,舍弃的原则和算例1相同。保留下来的支路一共有26条,由于数量较多,仍然按聚类算法进行划分,聚类算法和算例1相同。通过聚类分析之后一共得到4类结果,分别由图4中曲线 C_1, C_2, C_3 和 C_4 所穿过的支路表示。

在该算例中,支路 L_{13-14} 的 P_H 值和 P_M 值同算例1, P_{limit} 的标么值设为3.3。各类支路集合的详细数据见表4~表7。

表4 算例2的第1类结果

Tab.4 First kind of results in the second example

| 初始故障支路 | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|-------------|----------------|----------|-----------|
| L_{1-39} | 0.048 798 | 0.01 | 0.028 866 |
| L_{2-3} | 0.015 621 | 0.01 | 0.029 900 |
| L_{2-25} | 0.007 890 | 0.01 | 0.029 153 |
| L_{3-4} | 0.028 749 | 0.01 | 0.029 188 |
| L_{3-18} | 0.031 710 | 0.01 | 0.029 252 |
| L_{5-6} | 0.044 434 | 0.01 | 0.031 465 |
| L_{5-8} | 0.007 839 | 0.01 | 0.029 133 |
| L_{6-7} | 0.024 397 | 0.01 | 0.030 395 |
| L_{7-8} | 0.012 198 | 0.01 | 0.029 608 |
| L_{9-39} | 0.048 798 | 0.01 | 0.029 309 |
| L_{15-16} | 0.031 036 | 0.01 | 0.030 184 |
| L_{16-17} | 0.029 385 | 0.01 | 0.028 801 |
| L_{17-18} | 0.019 551 | 0.01 | 0.029 044 |
| L_{17-27} | 0.015 872 | 0.01 | 0.029 361 |
| L_{25-26} | 0.029 633 | 0.01 | 0.029 585 |
| L_{26-27} | 0.013 486 | 0.01 | 0.029 697 |

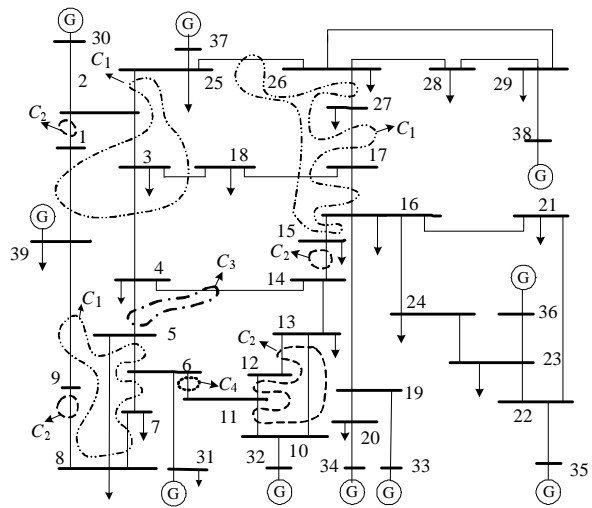


图4 算例2的结果示意图

Fig.4 Results of the second example

表 5 算例 2 的第 2 类结果

Tab. 5 Second kind of results in the second example

| 初始故障支路 | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|-------------|----------------|----------|-----------|
| L_{1-2} | 0.080 225 | 0.01 | 0.028 491 |
| L_{8-9} | 0.070 855 | 0.01 | 0.029 309 |
| L_{10-11} | 0.077 253 | 0.01 | 0.031 885 |
| L_{10-13} | 0.077 253 | 0.01 | 0.027 182 |
| L_{11-12} | 0.077 253 | 0.01 | 0.029 377 |
| L_{12-13} | 0.077 253 | 0.01 | 0.029 408 |
| L_{14-15} | 0.071 646 | 0.01 | 0.029 146 |

表 6 算例 2 的第 3 类结果

Tab. 6 Third kind of results in the second example

| 初始故障支路 | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|------------|----------------|-----------|-----------|
| L_{4-5} | 0.227 71 | 0.017 003 | 0.056 286 |
| L_{4-14} | 0.212 08 | 0.01 | 0.023 925 |

表 7 算例 2 的第 4 类结果

Tab. 7 Fourth kind of results in the second example

| 初始故障支路 | $\lambda_j(i)$ | P_{HF} | $R(i)$ |
|------------|----------------|----------|----------|
| L_{6-11} | 0.161 88 | 0.138 85 | 0.484 44 |

由图 4 和表 4~表 7 可见,第 1 类支路集合中的各初始故障支路和支路 L_{13-14} 之间的关联作用比较小,造成支路 L_{13-14} 的敏感性也不大,可以放在次要的位置上;第 2 类支路集合中的各初始故障支路和支路 L_{13-14} 之间关联作用要比第 1 类的略大,但是其造成支路 L_{13-14} 的敏感性也不大,也可以放在比较次要的位置上;第 3 类支路集合中的各初始故障支路和支路 L_{13-14} 之间关联作用最大,其 P_{HF} 值和第 1、第 2 类相同,但 R 值较大,应引起一定的重视;第 4 类支路集合中的各支路和支路 L_{13-14} 之间关联度也比较大,其造成支路 L_{13-14} 的敏感性较强,因此,应予以重点对待。

由上述算例可见,按上述算法划分后,可以对电网中的脆弱环节有一个比较清晰的了解。

4 结 语

当电网的初始故障支路被切除后,在随后的潮流转移过程中,由于支路之间的关联作用和继电保护隐性故障的存在,剩余系统支路存在连锁过载跳闸的风险,这是电网内在脆弱性的一种表现。利用支路间的关联作用指标、剩余系统支路连锁过载跳闸的概率和风险指标提出了划分电网脆弱区域的算法,并分别从受动和使动的角度给出了具体的算法流程,可实现以下两方面的目标。

- 1) 从受动的角度对电网的脆弱区域进行划分,可识别出受初始故障波及的严重支路集合。
- 2) 从使动的角度对电网的脆弱区域进行划分,可识别出对某些关键支路产生严重波及作用的支路集合。

这样处理后,可方便地帮助运行人员识别出其中的严重脆弱环节,为进一步采取预防措施提供合理的依据。

参考文献/References:

[1] 韩学军,石磊,朱岩,等.考虑多重故障的连锁过载分析[J].电网技术,2008,32(16):86-89.

HAN Xuejun, SHI Lei, ZHU Yan, et al. Analysis on cascading overload considering multiple failures[J]. Power System Technology,

- 2008, 32(16):86-89.
- [2] 王 艳,张艳霞,徐松晓.基于广域信息的防连锁过载跳闸保护[J].电力系统自动化,2008,32(10):37-41.
WANG Yan, ZHANG Yanxia, XU Songxiao. A protection scheme against chain over-load trip based on wide-area information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10):37-41.
- [3] 张亚迪,陈柏超,邢海英,等.基于转移潮流反应灵敏度的新型距离保护算法[J].电力自动化设备,2008,28(11):35-39.
ZHANG Yadi, CHEN Baichao, XING Haiying, et al. Algorithm of distance protection based on transfer power flow sensibility[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11):35-39.
- [4] 闫丽梅,赵国成,陈 娟,等.基于GIS的大庆油田电力系统连锁过负荷故障分析系统[J].电力系统保护与控制,2010,38(23):75-81.
YAN Limei, ZHAO Guocheng, CHEN Juan, et al. GIS based overload cascading failure analysis system in Daqing oil-field power system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23):75-81.
- [5] 卢锦玲,陈 媛,朱永利.基于输电线路过负荷特性的连锁事件识别[J].华北电力大学学报,2007,34(5):27-31.
LU Jinling, CHEN Yuan, ZHU Yongli. Identification of cascading failures based on overload character of transmission lines[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(5):27-31.
- [6] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于WAMS的潮流转移识别算法[J].电力系统自动化,2006,30(14):14-19.
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. WAMS based flow transfer identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14):14-19.
- [7] 邓慧琼,王 帅,孙克军,等.一种考虑二级连锁过载的电网故障关联区域划分方法[J].河北科技大学学报,2012,33(3):237-243.
DENG Huiqiong, WANG Shuai, SUN Kejun, et al. A method for partitioning correlate areas in power network considering cascading overload with two stage[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(3):237-243.
- [8] 邓慧琼,苏爱宁,孙克军.考虑潮流水平变化的电网二级连锁过载中的涨落现象研究[J].河北科技大学学报,2012,33(4):313-318.
DENG Huiqiong, SU Aining, SUN Kejun. Research on fluctuation phenomenon of cascading overload with two stages in power network considering power flow level[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(4):313-318.
- [9] 杨明玉,田 浩,姚万业.基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):1-5.
YANG Mingyu, TIAN Hao, YAO Wanye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9):1-5.
- [10] 丁理杰,刘美君,曹一家,等.基于隐性故障模型和风险理论的关键线路辨识[J].电力系统自动化,2007,31(6):1-5.
DING Lijie, LIU Meijun, CAO Yijia, et al. Power system key-lines identification based on hidden failure model and risk theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6):1-5.
- [11] CHEN J, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.
- [12] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985.
WU Jishun. Power System Static Security Analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1985.
- [13] 邓慧琼,李 争,孙丽华,等.电网连锁故障的激发因素研究[J].河北科技大学学报,2010,31(3):222-226.
DENG Huiqiong, LI Zheng, SUN Lihua, et al. Research in triggering factors of power network cascading failure[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2010, 31(3):222-226.
- [14] 边肇祺,张学工.模式识别[M].北京:清华大学出版社,2000.
BIAN Zhaoqi, ZHANG Xuegong. Pattern Recognition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [15] 范九伦,吴成茂,丁 夷.基于样本最大分类信息的聚类有效性函数[J].模糊系统与数学,2001,15(3):68-73.
FAN Jiulun, WU Chengmao, DING Yi. A cluster validity function based on maximum classification information[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2001, 15(3):68-73.
- [16] 沈晓凡,舒治淮,吕鹏飞,等.2006年国家电网公司继电保护装置运行情况[J].电网技术,2008,32(3):18-21.
SHEN Xiaofan, SHU Zhihuai, LYU Pengfei, et al. Operation situation of protective relayings of state grid corporation of china in 2006 [J]. Power System Technology, 2008, 32(3):18-21.