

基于故障影响域的多重预想故障集筛选方法

李传栋¹, 张逸^{1,2}, 杨桂钟³, 郭瑞鹏²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对省级电网静态安全分析中多重预想故障数量庞大以及由此带来的计算效率低下、耗时过长等问题, 研究并实现了一种基于故障影响域的多重预想故障集自动筛选方法。首先, 利用转移系数表示某设备在其他设备开断前后的有功潮流变化; 随后, 根据转移系数将开断后潮流明显增大且接近短时过载能力的设备划归为此开断设备的故障影响域; 最后, 根据分析不同预想开断的故障影响域之间的关系确定需要重点关注的 $N-2$ 多重故障集。此方法原理简单, 容易编程实现。通过在 IEEE 39 节点系统和省级电网中的成功应用证明了此方法的可靠性和实用性。

关键词: 省级电网; 转移系数; 故障影响域; 多重预想故障; 自动筛选

An anticipated multi-contingencies selection method based on fault influence domain

LI Chuandong¹, ZHANG Yi^{1,2}, YANG Guizhong³, GUO Ruipeng²

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: To solve the issues of low calculating efficiency and long calculating time caused by large amount of anticipated multi-contingencies in the static security analysis of provincial power grid, an anticipated multi-contingencies automatic selection method based on fault influence domain is researched and implemented. Firstly transfer coefficient is used for signifying the active power flow change of devices before and after contingency of another device. Then according to the transfer coefficient, the devices which the power flow is significantly increased and closed to the short-term overload capacity are defined as the fault influence domain of certain device. Finally the important anticipated $N-2$ contingencies are automatically selected according to the relationship between every fault influence domain. The theory of this method is simple, and facilitates programming realization. The IEEE 39-bus system and actual provincial power grid examples prove the reliability and practicality of this scheme.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A118).

Key words: provincial power grid; transfer coefficient; fault influence domain; anticipated multi-contingencies; automatic selection

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0092-08

0 引言

电力系统静态安全分析中需要研究系统发生预想故障时元件过负荷的情况, 其主要分析方法是针对预想故障集进行潮流计算^[1-3]。随着电力系统规模的不断增大, 多重预想故障的数量越发庞大, 如果采用精确的潮流计算分析所有可能的多重预想故

障, 则计算负担沉重, 计算耗时过长, 难以满足实时性的要求^[4-5]。实际上, 大多数多重预想故障并不影响系统的正常运行, 对所有故障进行详细分析既不现实也无必要, 因此, 需要对多重预想故障进行筛选。

静态安全分析中多重预想故障的筛选需要避免对无害故障集的搜索与分析, 提高故障集的生成和分析效率, 以便对严重的多重预想故障进行详尽的完全潮流分析。目前, 实际工作中, 运行专业人员

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A118)

一般依据经验筛选多重预想故障, 工作量大, 且筛选结果的正确性与专业人员的经验密切相关。因此, 有必要研究一种计算机程序可实现的多重预想故障集自动筛选方法。

故障集筛选在在电网风险评估^[6]、电压稳定安全评估^[7]、在线动态安全分析^[8]、暂态功角稳定性判断^[9]、风电连锁故障在线预警^[10]等研究中均有应用。但是目前国内针对静态安全分析中多重预想故障集筛选的研究报道还较少。早期文献[4]提出一种基于行为指数的预想事故自动排序算法。文献[5]提出计及不确定性的预想事故自动选择方法。以上文献均未针对多重预想故障进行筛选。文献[11]提出一种多重故障集的自动批量生成方法, 但未涉及故障集的筛选。同时, 现有预想故障筛选方法大多是根据不同的应用目的计算故障全集中每个故障的某种指标值, 并依此排序, 从而重点关注排名靠前的故障^[11-14]。

本文提出一种基于故障影响域的多重预想故障集自动筛选方法, 通过计算 $N-1$ 开断后的转移系数确定单重预想开断的故障影响域, 并利用不同故障影响域之间的关系直接确定需要重点关注的 $N-2$ 多重故障集, 无需对故障全集进行计算和排序, 不但计算量较少, 同时可克服不同指标的片面性和不确定性。

1 故障影响域

1.1 故障影响域的概念

近几年一系列大停电事故均表明, 故障引发大范围潮流转移, 进而导致连锁过载跳闸是事故发生的原因之一。随着电网的互联和远距离大功率输电的发展, 支路的输送功率接近其容量极限。在这种情况下, 当系统发生事故时, 支路可能过载并成为系统连锁故障的促发因素^[15-16]。因此, 静态安全分析中针对潮流转移情况进行过载分析至关重要。

电力系统的潮流转移通常发生在网络的拓扑结构发生变化之后, 当系统中某支路被切除后, 其潮流将转移到系统中其他正常运行的支路且可能引起某些正常支路过载。实际运行中, 为保证电网电压质量, 抑制电网无功损耗, 重载线路及主变的运行功率因数一般较高, 因此, 过载分析中一般仅需保证支路有功潮流不超过线路有功潮流上限, 即

$$P_k = P_k^0 + \Delta P_{k,l} \leq P_{k,\max} \quad (1)$$

式中: P_k 为支路开断后支路 k 上的有功潮流; P_k^0 为支路 l 开断前支路 k 上的有功潮流; $\Delta P_{k,l}$ 为支路 l 开断后支路 k 上的潮流增量; $P_{k,\max}$ 为支路 k 的最大

允许有功功率。

支路的跳闸必将引起系统潮流的重新分布, 其对各输电回路造成的影响是大不相同的, 其潮流变化与跳闸支路的位置以及跳闸前的潮流有关。理论上, 所有支路的潮流都可能受影响, 但实际上影响较大, 值得关注的支路是很有限的。

在进行预想故障集筛选时, 对于某支路断开后, 潮流变化较小的支路可不必具体分析, 只需重点关注开断后潮流明显增大且接近支路短时过载能力的支路, 将这些支路划归为此断开支路的故障影响域。可根据支路开断前后的潮流转移系数, 并参考支路短时过载能力与开断后支路潮流的差额确定故障影响域。

1.2 转移系数的计算

如上所述, 实际电网中的潮流越限主要是由于有功潮流太大造成的。在高压电网中, 有功潮流间一般具有较好的线性关系, 局部线性化效果较好, 计算误差较小, 故可以通过线性化近似表示电网预想开断前后有功潮流间的关系。

转移系数的计算可采用基于直流潮流的分布系数法或交流潮流法, 前者计算速度快, 但由于忽略了基态潮流的影响, 其相对于精确的潮流计算会有 10% 以内的计算误差^[6], 故本文中采用逐一预想开断的方法, 应用交流潮流法计算设备开断后的转移系数。由于 $N-1$ 静态安全分析是电网分析的基本工作, 因此, 在进行 $N-1$ 故障开断扫描时附带计算转移系数并不会增加过多的耗时, 同时也保证了计算结果的精度。

预想开断主要考虑线路、主变以及母线的 $N-1$ 故障, 考虑到并联运行的线路或并列运行的主变, 本文将预想开断的支路统一定义为设备组。当预想开断发生于某一设备组时, 该设备组的有功潮流将可能转移至其他各设备组, 其他某设备组在此预想开断前后的有功潮流增量与预想开断设备组的开断前潮流之间的比例称为转移系数^[17]。

$N-1$ 开断故障包括单重故障和多重故障两类。对于线路或变压器这类 $N-1$ 单重开断故障, 预想开断将断开单一设备, 即单个设备组内的单个设备; 对于母线故障这类多重故障, 预想开断可能断开多个设备, 如母线故障, 则需要开断母线所连的所有出线和变压器支路, 即可能开断多个设备, 且这些设备可能位于多个不同的设备组。因此, 需要对多重故障进行单独处理, 将其等价于多个单重故障的组合。假设预想故障 k 将开断 $S_k \in S_T$ (S_T 为设备组集合) 内的设备, 由于预想故障后的潮流分布将与 S_k 中各设备组故障前的潮流有关, 为计算预想故障

前后设备组有功潮流间的关系, 可将预想故障 k 看成逐一开断与设备组 $i \in S_k$ 相关设备的结果。设预想故障 k 第 s 步开断与设备组 f 相关的设备, 根据转移系数的定义, 有

$$W_{ft}^{k,s} = \frac{P_t^{k,s} - P_t^{k,s-1}}{P_f^{k,s-1}} \quad t \in S_T - \{f\} \quad (2)$$

式中: $W_{ft}^{k,s}$ 为第 s 步开断时设备组 f 向设备组 t 的转移系数; $P_f^{k,s}$ 为预想故障 k 第 s 步开断时设备组 f 的有功潮流。

1.3 故障影响域的确定

根据转移系数的计算结果, 确定某个预想开断的故障影响域, 即将开断后潮流明显增大且接近短时过载能力的设备划归为此设备的故障影响域。

实际应用中, 对于转移系数小于一定阈值的设备, 认为其影响可以忽略, 转移系数大于此阈值的设备认为是潮流明显增大的设备。此时应注意, 不同电压等级的设备间容量可能相差较大, 因此, 高电压等级设备开断对低电压等级设备的转移系数小于 0.02 时可忽略, 同一电压等级阈值取 0.03, 低电压等级向高电压等级转移阈值则取 0.05。本文中选取了较小的阈值以保证不会发生漏选的情况, 虽然多选的故障集略多, 但也在可接受的数量范围内, 详见本文第三节算例分析中的筛选结果。同时, 本方法中将开断后潮流大于 50% 短时允许载流量的设备划归为接近其短时过载能力。

2 多重预想故障集的自动筛选方法

2.1 理论推导

设已被断开的设备组为设备组 1; 拟再断开的设备组为设备组 2; 而未被断开的任一设备组为设备组 3, 根据前文 1.2 节中已经给出的单设备组断开时的转移系数计算公式(2), 可推导得设备组 1 已断开后, 设备组 2 再断开时任一第三设备组上的功率增量 ΔP_3 如式(3)所示, 具体推导过程见附录 A。

$$\Delta P_3 = \frac{P_2(W_{3-2} + W_{1-2}W_{3-1})}{1 - W_{1-2}W_{2-1}} \quad (3)$$

式中, W_{1-2} 为设备组 2 断开后转移到设备组 1 的转移系数, 其余参数含义类似。

由式(3)可知, 如果断开设备组 2, 转移到设备组 1 上的潮流很少, 即转移系数 W_{1-2} 很少, 以至于可以忽略, 此时由式(3)可推导得式(4)为

$$\Delta P_3 = P_2 W_{3-2} \quad (4)$$

即此时断开设备组 2 转移到设备组 3 上的潮流中不必考虑由于另一条设备组 1 断开引起的潮流转

移, 可以直接视为单独断开设备组 2 转移到设备组 3 上的潮流。

同理可知, 如果断开设备组 1, 转移到设备组 2 上的潮流很少, 则断开设备组 2 后再断开设备组 1 时转移到设备组 3 的潮流近似等于单独开断设备组 1 转移到设备组 3 上的潮流。

因此, 可得到以下结论: 如果设备组 1、2 的断开均不会引起对方设备组上潮流的明显变化, 则设备组 1、2 同时断开, 引起设备组 3 的潮流变化可以看作是两设备组单独断开时引起潮流变化的叠加。

2.2 筛选流程

基于故障影响域的 $N-2$ 预想故障集自动筛选方法流程如图 1 所示。

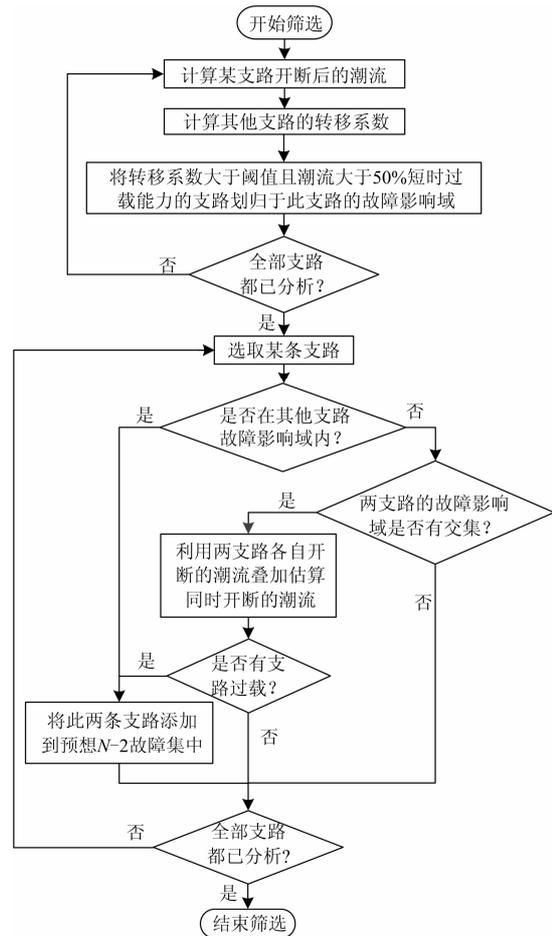


图 1 基于故障影响域的 $N-2$ 预想故障集筛选流程图

Fig. 1 Selecting flow diagram of anticipated $N-2$ contingencies based on fault influence domain

在获得所有设备开断的故障影响域后, 即可筛选需要详细分析的多重预想故障集。具体筛选流程为: 首先, 遍历分析每个预想开断设备与其他设备故障影响域之间的关系, 可归纳为以下三种情况:

(1) 预想开断的设备位于另一设备故障影响域之内。

(2) 预想开断的设备位于另一设备故障影响域之外, 但两个设备的故障影响域有交集。

(3) 预想开断的设备位于另一设备故障影响域之外, 且两个设备的故障影响域没有交集。

随后, 对以上三种情况进行分别分析如下。

对于情况(1), 如果此两个设备同时开断, 则近似等效于同一输电断面上的设备同时断开, 其后果可能引起大范围的潮流转移, 进而导致连锁过电压跳闸事故发生^[16], 同时, 由以上 2.1 节中理论推导和实际计算结果可知, 此情况如果用两个 $N-1$ 开断后的交流潮流计算结果进行线性化叠加近似, 将造成较大误差。因此, 应将此情况中的两个设备添加入 $N-2$ 预想故障集中进行详细分析。

对于情况(2), 如果此两个设备同时开断, 可能导致故障影响域交集内的设备发生过载, 由以上 2.1 节中理论推导结果可知, 其潮流可用两个 $N-1$ 开断后的潮流结果进行线性化叠加近似。由于此前通过对所有设备的 $N-1$ 开断交流潮流计算已能获得断开后各设备上的潮流, 因此, 可直接通过叠加此两设备各自断开后的潮流来估算是否有其他设备过载。

因此, 此两设备可不加入 $N-2$ 预想故障集中。

对于情况(3), 由于故障影响域没有交集, 此两设备同时断开对电网的影响与任意断开其中一设备后的影响近似相同。因此, 如果可以保证所有 $N-1$ 开断的安全性, 则此两个设备同时开断也是安全的, 因此, 实际中可不必分析此种多重故障情况。

最后, 遍历所有预想开断与其他设备故障影响域的关系分析后, 即可得到筛选后的 $N-2$ 预想故障集。本方法中, 对预想开断后将导致系统网络解列的情况需要单独分析。

3 算例分析

3.1 IEEE 39 节点系统算例

采用新英格兰 10 机 39 节点系统对所提方法进行仿真验证。在 IEEE 39 节点系统中, 不包括引起系统解列的情况, 网络 $N-2$ 故障总数为 562 个。采用本文方法时, 依据 1.3 节中所选阈值, 筛选后可得 $N-2$ 预想故障 28 个, 故障影响域有交集的设备 25 个(对应于 2.2 节中情况 2)。对 39 节点系统全部 $N-2$ 故障进行精确交流潮流计算以验证本方法筛选结果的正确性, 结果有 6 个 $N-2$ 故障将引起其他线路的过载, 如表 1 中所示。

表 1 本文方法 IEEE 39 节点系统筛选结果

Table 1 IEEE 39-bus system selection results of the proposed method

类别	$N-2$ 故障集断开支路编号
本文方法筛选的 $N-2$ 预想故障	(1,3) (1,11) (2,3) (2,11) (3,25) (3,31) (4,31) (8,9) (8,12) (8,16) (9,11) (9,13) (10,11) (10,13) (12,17) (12,18) (16,17) (16,18) (17,9) (18,7) (18,9) (20,21) (20,25) (23,29) (27,24) (27,28) (27,29) (33,34)
将造成过载的 $N-2$ 故障(冒号后为将过载支路的编号)	(8,9:11) (8,12:21) (9,11:8,17,18) (9,13:17,18) (9,17:11) (9,18:11,13)
故障影响域有交集的支路	(1,2) (1,9) (1,10) (1,25) (1,31) (2,9) (2,10) (2,25) (2,31) (3,4) (3,20) (8,11) (8,13) (8,17) (8,18) (9,10) (11,13) (11,17) (11,18) (12,16) (13,17) (13,18) (17,18) (23,27) (25,31)

由表 1 中可知, 一方面, 造成过载的六个故障均在本文方法筛选后的故障集中, 没有出现漏选的现象; 另一方面, 多选的路数有限, 不影响筛选效率。同时, 多选的故障中存在支路接近过载的情况, 其在进一步分析 $N-3$ 故障时仍有指导意义。以上算例证明了本方法的正确性和可靠性。

3.2 福建电网算例

针对福建电网 2013 年 11 月某运行方式, 采用本文方法进行了 $N-2$ 预想故障集的筛选。在此运行方式下, $N-1$ 故障总数为 710, $N-2$ 故障总数为 216 245, 采用本文方法筛选后的 $N-2$ 预想故障数为 802 个, 仅为总数的 0.4%, 大大减少了计算量, 结合多任务并行计算技术, 可在短时间内完成对筛选后的全部 $N-2$ 故障的精确潮流计算。对全网 $N-2$ 故

障进行扫描, 发现将导致过载的故障有 25 个, 如表 2 所示, 其全部包含在本方法筛选后的 $N-2$ 预想故障集中。

对于设备故障影响域有交集的 3 573 个 $N-2$ 故障, 仅需根据之前已获得的 $N-1$ 潮流计算结果进行线性叠加即可。

由以上结果可见, 采用本文方法可实现针对省级大规模电网 $N-2$ 预想故障的静态安全分析。

3.3 性能与误差测试

以 IEEE 39 节点系统和福建电网实例, 对本文方法性能进行了对比测试, 并分析了基于直流潮流的分布系数法^[18]的误差。测试计算机 CPU 为 Intel®Core™i7-4500U, 内存 4 G。

表 2 福建电网2013年11月某运行方式下将造成过载的N-2故障集
Table 2 Overload N-2 contingencies of certain operating mode in Fujian grid in November 2013

类别	N-2 故障集
将造成过载的 N-2 故障	(丹源 I 路,田桂路)(韩桐线,树后 I 路)(韩桐线,树桐 I 路)(红口线,中浦线)(红莆线,马良 I 路)
	(红莆线,漳马 I 路)(黄鹤线,兴鹤线)(旧策线,莲策线)(旧策线,塘莲 I 路)(列新线,玉新 I 路)
	(棉锋线,紫北线)(棉贤线,贤旧线)(南童线,田桂线)(莆盖 I 路,莆盖 II 路)(三梅 I 路,三梅 II 路)
	(田安 I 路,田安 II 路)(五凤 I 路,紫北线)(五紫 I 路,紫北线)(兴银 I 路,兴银 II 路)(增龙 I 路,增龙 II 路)
	(总兴 I 路,总兴 II 路)(安故 I 路,邵安线)(安故 I 路,邵故线)(海鸿 I 路,海鸿 II 路)(漳龙 I 路,漳龙 II 路)

待测试方法定义如下。

方法一：采用交流潮流法对 N-2 故障全集进行遍历分析；

方法二：采用基于直流潮流的分布系数法计算转移系数，对 N-2 故障全集进行筛选，对筛选后的预想故障集进行交流潮流分析。

此两种方法与本文方法的 N-2 故障分析耗时对比如表 3 所示。

表 3 三种N-2故障分析方法的性能比较

Table 3 Comparison of performance for three N-2 contingency analysis methods

	方法一耗时/s	方法二耗时/s	本文方法耗时/s
IEEE-39	3.20	0.53	0.62
福建电网	1 627.88	14.81	18.43

由表 3 可以看出，本文方法和方法二计算耗时基本相当，相比方法一故障全集分析在性能上具有明显优势。

对方法二的计算误差进行测试。以 N-1 断开后基于直流潮流的计算结果为测试值，以交流潮流计算结果为准确值，将不同相对误差范围对应的支路数分别进行统计，IEEE 39 节点系统和福建电网部分计算结果分别如表 4、表 5 所示。

表 4 方法二IEEE 39节点系统误差支路数统计结果

Table 4 Statistical result of error branches of the second method in the IEEE 39-bus system

相对误差	N-1 断开支路编号						
	3	12	16	20	33	34	36
0~5%	5	8	6	7	5	4	3
5~10%	35	30	32	31	32	30	36
10%~15%	0	2	3	4	1	1	1
15%~20%	1	3	2	0	1	2	1
>20%	4	2	2	3	6	8	4

表 5 方法二福建电网误差支路数统计结果

Table 5 Statistical result of error branches of the second method in the Fujian grid

相对误差	N-1 断开支路编号					
	23	30	35	40	43	60
0~5%	23	59	72	82	77	70
5~10%	354	321	304	290	299	299
10%~15%	15	16	17	18	17	21
15%~20%	11	10	10	12	10	10
>20%	46	43	46	47	46	49

由表 4、表 5 可以看出，采用方法二计算 N-1 后的潮流，大量支路存在 5%~15%的计算误差，同时也有部分支路存在大于 20%的误差。由于线路长期和短期允许载流量之差一般也仅为 10%~20%，因此，采用方法二可能会出现漏选严重故障的情况。利用本文方法不但耗时相差无几，而且保证了计算精度，可避免漏选，具有更高的正确性和可靠性。

4 结语

本文提出并实现了一种基于故障影响域的多重预想故障集自动筛选方法。此方法仅需一次 N-1 故障扫描即可得到需要重点关注的 N-2 故障集，能有效提高故障集的生成和分析效率，且原理简单，便于计算机程序实现。实际电网的算例分析证明此方法能提高分析效率，具有较高的正确性和可靠性，能实现省级电网的 N-2 预想故障自动筛选和完整分析。下一步将继续研究将此方法应用于 N-3 故障集筛选的可行性。

附录 A

以下推导一条支路断开后，再断开另一条支路时，任一第三条支路上的功率增量表达式。

根据转移系数定义可知单支路断开的转移系数计算公式如式(A.1)。

$$W_{ft}^{k,s} = \frac{P_t^{k,s} - P_t^{k,s-1}}{P_f^{k,s-1}} \quad t \in Sr - \{f\} \quad (A.1)$$

式中： $W_{ft}^{k,s}$ 为第 s 步断开时设备组 f 向设备组 t 的转

移系数; $P_f^{k,s}$ 为预想故障 k 第 s 步开断时设备组 f 的有功潮流。

令已被开断的支路为线路 1; 拟再开断的支路为线路 2; 而未被开断的任一支路为线路 3。推导步骤如下:

步骤 0 线路 1 已被开断, 于是在线路 2 和线路 3 中有功功率分别为 P_2 和 P_3 ;

步骤 1 开断线路 2, 即 P_2 应等于 0, 此时有:

假如线路 1 还未被断开, 则在线路 1 中将有增量有功功率 $\Delta P_{1-2}^{(1)}$ 如式(A.2)。

$$\Delta P_{1-2}^{(1)} = P_2 W_{1-2} \quad (\text{A.2})$$

式中, W_{1-2} 为线路 2 断开后转移到线路 1 的转移系数, 上角注(1)表示步骤 1。

同时, 在未断开的任一线路 3 中, 将出现增量有功功率如式(A.3)。

$$\Delta P_{3-2}^{(1)} = P_2 W_{3-2} \quad (\text{A.3})$$

步骤 2 事实上线路 1 已经被断开, 即式(A.2)的增量有功功率 $\Delta P_{1-2}^{(1)}$ 应等于零, 于是有:

假如线路 2 还未被断开的话, 则因开断线路 1 而使 $\Delta P_{1-2}^{(1)} = 0$, 必将在线路 2 中引起增量有功功率如式(A.4)。

$$\Delta P_{2-1}^{(2)} = (\Delta P_{1-2}^{(1)}) W_{2-1} = (P_2 W_{1-2}) W_{2-1} \quad (\text{A.4})$$

因开断线路 1 使 $\Delta P_{1-2}^{(1)} = 0$, 必将在线路 3 中引起增量有功功率如式(A.5)。

$$\Delta P_{3-1}^{(2)} = (\Delta P_{1-2}^{(1)}) W_{3-1} = (P_2 W_{1-2}) W_{3-1} \quad (\text{A.5})$$

由于步骤 1 和 2, 而使线路 3 中的总增量有功功率如式(A.6)。

$$\begin{aligned} \Delta P_3^{(1)+(2)} &= \Delta P_{3-2}^{(1)} + \Delta P_{3-1}^{(2)} = P_2 W_{3-2} + \\ & (P_2 W_{1-2}) W_{3-1} = P_2 (W_{3-2} + W_{1-2} W_{3-1}) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

步骤 3 事实上线路 2 已被开断, 这等价于令 $\Delta P_{2-1}^{(2)} = 0$, 于是:

假如线路 1 还未被开断, 则因开断线路 2 而使 $\Delta P_{2-1}^{(2)} = 0$, 必将在线路 1 中引起增量有功功率如式(A.7)。

$$\Delta P_{1-2}^{(3)} = (\Delta P_{2-1}^{(2)}) W_{1-2} = P_2 W_{1-2}^2 W_{2-1} \quad (\text{A.7})$$

因开断线路 2 使 $\Delta P_{2-1}^{(2)} = 0$, 必将在线路 3 中引起增量有功功率如式(A.8)。

$$\Delta P_{3-2}^{(3)} = (\Delta P_{2-1}^{(2)}) W_{3-2} = P_2 W_{1-2} W_{2-1} W_{3-2} \quad (\text{A.8})$$

而线路 3 中的总增量有功功率如式(A.9)所示。

$$\begin{aligned} \Delta P_3^{(1)+(2)+(3)} &= \Delta P_3^{(1)+(2)} + \Delta P_{3-2}^{(3)} = P_2 (W_{3-2} + \\ & W_{1-2} W_{3-1} + W_{1-2} W_{2-1} W_{3-2}) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

步骤 4 事实上线路 1 已被开断, 这等价于令 $\Delta P_{1-2}^{(3)} = 0$, 于是:

假如线路 2 还未被开断, 则因线路 1 的开断, 必将在线路 2 中引起增量有功功率, 如式(A.10)所示。

$$\Delta P_{2-1}^{(4)} = (\Delta P_{1-2}^{(3)}) W_{2-1} = P_2 W_{1-2}^2 W_{2-1} \quad (\text{A.10})$$

因线路 1 的开断, 必将在线路 3 中引起增量有功功率如式(A.11)。

$$\Delta P_{3-1}^{(4)} = (\Delta P_{1-2}^{(3)}) W_{3-1} = P_2 W_{1-2}^2 W_{2-1} W_{3-1} \quad (\text{A.11})$$

从而线路 3 中的总增量有功功率如式(A.12)。

$$\begin{aligned} \Delta P_3^{(1)+(2)+(3)+(4)} &= \Delta P_3^{(1)+(2)+(3)} + \Delta P_{3-1}^{(4)} = P_2 (W_{3-2} + W_{1-2} W_{3-1} + \\ & W_{1-2} W_{2-1} W_{3-2} + W_{1-2}^2 W_{2-1} W_{3-1}) = P_2 (W_{3-2} + \\ & W_{1-2} W_{3-1}) (1 + W_{1-2} W_{2-1}) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

依次再对线路 2 和线路 1 进行开断, 即得步骤 5 和步骤 6 的结果。如表 A.1 所示。

表 A1 步骤 5 和步骤 6 中线路 3 的总增量功率表达式

Table A1 Total increasing power expression of line 3 in step 5 and step 6

步骤	开断线路号	线路 1 的功率	线路 2 的功率	线路 3 的总增量功率
5	2	$P_2 W_{1-2}^3 W_{2-1}^2$	0	$\Delta P_3^{(1)+(2)+(3)+(4)} + P_2 W_{1-2}^2 W_{2-1}^2 W_{3-2}$
6	1	0	$P_2 W_{1-2}^3 W_{2-1}^3$	$\Delta P_3^{(1)+(2)+(3)+(4)} + P_2 (W_{3-2} + W_{1-2} W_{3-1}) W_{1-2}^2 W_{2-1}^2$

根据以上的推导, 每两个步骤(步骤 1-2、3-4、5-6)分别代表完成线路 1、2 开断的一次循环, 为此, 当步骤 n 很大且为偶数时, 有:

1) 线路 1 中的有功功率为 0;

2) 线路 2 中的有功功率为 $P_2 (W_{1-2} W_{2-3})^{\frac{n}{2}}$;

3) 线路 3 中的总增量有功功率为式(A.13), 取 $\frac{n}{2}$ 项:

$$\begin{aligned} \Delta P_3 &= P_2 (W_{3-2} + W_{1-2} W_{3-1}) [1 + (W_{1-2} W_{2-1})^1 + \\ & (W_{1-2} W_{2-1})^2 + (W_{1-2} W_{2-1})^3 + \dots] \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

当偶数 $n \rightarrow \infty$ 时, 则有:

- 1) 线路 1 中的有功功率为 0;
- 2) 线路 2 中的有功功率 $\rightarrow 0$, 因为所有转移系数 W 一般均为小于 1 的值;
- 3) 线路 3 中的总增量有功功率是一个无穷级数, 其收敛于式(A.14)。

$$\Delta P_3 = \frac{P_2 (W_{3-2} + W_{1-2} W_{3-1})}{1 - W_{1-2} W_{2-1}} \quad (\text{A.14})$$

式(A.14)即为双重支路开断时任一第三条支路上的功率增量表达式。

参考文献

- [1] 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, 1984.
- [2] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-237.
MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-237.
- [3] YU Jiaxi, GUO Zhizhong, BAI Xuefeng, et al. Power system static security analysis with time process-oriented method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 142-149.
- [4] 王民有, 吴际舜. 一种新颖的预想事故自动选择算法[J]. 上海交通大学学报, 1986, 20(3): 84-91.
WANG Minyou, WU Jishun. An algorithm for automatic contingency selection[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1986, 20(3): 84-91.
- [5] 王守相, 赵玮, 王成山, 等. 计及不确定性的预想事故自动选择区间方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 27-31.
WANG Shouxiang, ZHAO Wei, WANG Chengshan, et al. Automatic contingency selection based on interval method considering uncertainty of generation and load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 27-31.
- [6] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [7] 张勇军, 蔡广林, 邱文锋. 基于最优乘子潮流估计的故障筛选与排序[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 123-138.
ZHANG Yongjun, CAI Guanglin, QIU Wenfeng. Contingency screening and ranking based on optimal multiplier power flow evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 123-138.
- [8] 王守相, 张建军. 基于统计学习的模糊暂态稳定事故筛选与排序[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 112-117.
WANG Shouxiang, ZHANG Jianjun. Fuzzy contingency filtering and ranking of power system transient stability based on statistical learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 112-117.
- [9] 刘静琨, 李勇, 张宁, 等. 基于典型故障集的暂态功角稳定近似判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 1-7.
LIU Jingkun, LI Yong, ZHANG Ning, et al. Approximately evaluating power system transient angle stability based on typical failure set[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 1-7.
- [10] 吕颖, 孙树明, 汪宁渤, 等. 大型风电基地连锁故障在线预警系统研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 142-147.
LÜ Ying, SUN Shuming, WANG Ningbo, et al. Study and development of on-line cascading fault early-warning system for large-scale wind power base[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 142-147.
- [11] 张晓东, 张振安, 徐得超, 等. 基于三道防线的故障集自动批量生成方法[J]. 电力系统及其自动化, 2012, 34(5): 53-55.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Zhenan, XU Dechao, et al. A method for automatically generating fault set in batches based on three-defense lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 34(5): 53-55.
- [12] ERNST D, RUIZ-VEGA D, PAVELLA M, et al. A unified approach to transient stability contingency filtering, ranking and assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 435-443.
- [13] FU C, BOSE A. Contingency ranking based on severity

- indices in dynamic security analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 980-985.
- [14] 王守相, 张伯明, 郭琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性能指标法[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 60-64.
WANG Shouxiang, ZHANG Boming, GUO Qi. Integrated performance index method of contingency screening in online dynamic security assessment[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 60-64.
- [15] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-10, 16.
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): 8-10, 16.
- [16] 张保会, 姚峰, 周德才. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 1-7.
ZHANG Baohui, YAO Feng, ZHOU Decai. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.
- [17] 陈祎, 郭瑞鹏, 叶琳, 等. 电网断面热稳定限额计算模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.
CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in a power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.
- [18] 李立德, 林韩, 蔡金锭, 等. 基于支路开断分布因子的严重故障筛选[J]. 电力与电工, 2013, 33(2): 15-18, 27.
LI Lide, LIN Han, CAI Jinding, et al. Research on serious fault filtering based on LODF[J]. Electric Power & Electrical Engineering, 2013, 33(2): 15-18, 27.

收稿日期: 2014-11-01; 修回日期: 2015-01-30

作者简介:

李传栋(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网规划与系统分析方面的研究;

张逸(1984-), 男, 通信作者, 博士后, 高级工程师, 主要从事电能质量与主动配电网方面的研究;
E-mail: zhangyiscu@163.com

杨桂钟(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析和控制方面的研究。

(编辑 葛艳娜)