

面向时间过程的概率性静态安全分析方法

为快速有效地评估电网时间区间的安全状况,提出了一种面向时间过程概率性静态安全分析方法。综合考虑全时间过程的各个断面的相关性及系统变量的不确定性,通过利用特征断面直流概率性预想事故筛选结果,进行自适应的面向时间过程划分,以保证划分结果的准确性,从而将全过程时刻断面安全分析过程转化为少量子时间过程的静态安全分析,提高了安全分析的速度。定义了时间过程预想事故集分类,并在时间过程中对预想事故进行综合性校验。NX电网151节点系统验证了该方法的有效性和准确性。与传统单断面概率性静态安全分析结果进行对比,所提方法能大幅提高运算效率,具有一定的实用价值。

陈 中 梁欢利/东南大学电气工程学院

0 引言

静态安全分析是电力系统调度及运行方式安排部门必须要进行的一项工作,其目的是提高系统的安全性^[1]。传统静态安全分析方法将系统变量看作确定常量,设想各种设备开断的情况,完成相应的潮流计算,得到系统是否安全的结果^[2]。

为解决电力系统的静态安全问题,许多学者在这一领域进行了深入的研究^[3-9]。针对计算速度的改进,文献[3]提出了一种基于稀疏向量技术的快速算法,使静态安全分析程序的计算效率得到显著的提高;文献[4]利用因子表附加链技术和动态网络接线分析方法减少静态安全计算的所用时间。另外,考虑系统跟随时间的连续变化,文献[10]提出了一种面向时间过程的静态安全分析方法,摆脱了传统单一时刻断面逐一分析

的弊端,并保证了安全分析的准确性。但是这些方法都采用确定性潮流的方法,随着可再生能源的接入以及电网运行方式的不确定性,传统确定性静态安全分析将可能无法满足现代电力系统的发展要求,因此学者们将概率性潮流引入到静态安全分析算法中,解决了电力系统不确定性因素引起的安全隐患^[11-16]。文献[11]在静态安全分析 $N-1$ 校验中,采用线性化概率潮流模型,推导了支路功率期望和方差的算式,从而对大电网在多运行条件下的性能作出了综合评价;文献[12]引入区间分析方法来处理电力系统静态安全分析中的不确定性问题,具有一定的应用价值。但目前研究工作均是基于单断面逐一分析的电力系统概率性静态安全分析,并且随着电网规模的扩大和随机性能源接入点的增多,由于计算强度的规模化增加,目前单断面概率性分析方法能否满足要求还需要深入考虑。

因此,本文考虑全时间过程的各个断面的相关性及不确定性,提出了一种面向时间过程的概率性静态安全分析方法。首先采用自适应的静态安全时间过程划分方法,将全过程时刻断面划分为少量子时间过程,从而将全过程时刻断面扫描分析提升为子时间过程分析;然后对划分后的子时间过程进行特征断面提取,通过对特征断面的静态安全分析结果综合衡量电网整个时间过程的安全状况,从而避免了单断面逐一分析的过程,在保证准确性的同时,有效降低了计算强度,减少了计算时间。



陈 中/研究员

关键词/Keywords

时间过程·
概率潮流·
静态安全分析·
自适应划分方法·
预想事故集·

国家自然科学基金资助项目(51277029)。

1 电网时间过程

过程是数据的变化在时间上的持续。电力系统的状态随着时间过程不断地变化,但是电力系统分析计算基本上是基于断面数据采用以点带面的方式进行,即对于一个时间过程的电力系统分析问题通常转化为对等间隔时刻断面的问题分析。所以电网时间过程的状态变化由电网各时刻断面状态信息的连续变化体现。

1.1 电网时刻断面信息向量

电力系统中,电网第 i 时刻断面信息向量表示形式^[17]为

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ip}\} \quad (1)$$

式中, c_{ij} 为第 i 时刻第 j 状态变量, $j = 1, 2, \dots, p$ 。

通常状态变量取该时刻电网的节点电压、节点注入功率和支路潮流等。设电力系统时间过程 L 是由 n 个等间隔连续时刻组成的,则该时间过程的电网信息矩阵由 n 个电网时刻断面信息向量组成,即为

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (2)$$

通过面向时间过程划分方法,将时间段 L 进行时间过程划分成为非等间隔连续 k 个子时间过程,即为

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_k\} \quad (3)$$

经过划分后,每个子时间过程 L_i 的静态安全状况相似,在对时间子过程进行静态安全分析时,为节约计算强度,只需要通过对特征断面的安全性进行分析即可。文献[18]提出了确定性场景下的静态安全风险指标,用来提取子时间过程的三个特征断面,以表征整个时间区间的断面信息。本文考虑到随机性,运用该时间子过程的期望中值断面信息数据,基于该静态安全风险指标来提取子时间过程的三个特征断面信息,分别为最大特征断面 C_{imax} 、最小特征断面 C_{imin} 和中值特征断面 C_{imid} 。其中, C_{imax} 为该子时间段支路潮流越限风险最高的断面; C_{imin} 为该子时间段节点电压越限风险最高的断面; C_{imid} 为该时间子过程的平均负荷水平组成的虚拟断面信息^[10,17-19]。

1.2 相邻时刻的电网状态距离指标

在高维数据空间中,为了度量分类对象之间

的相似程度,需要定义一些分类统计量作为分类的数量指标,例如距离^[20]。对于 n 个 p 变量样本,可以视为 p 维空间的 n 个点,用点间距离来度量样本间的接近程度^[21]。用 d_{ij} 表示第 i 个样本和第 j 个样本间的距离,距离越小,两个样本之间的相似程度越高。常用的样本距离有欧氏距离、马氏距离和切比雪夫距离等。本文选用欧氏距离衡量两个时间断面的接近程度,并考虑时刻断面信息向量中各状态变量的重要程度,设其权重变量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p)$,则对于任意 i, j 时刻断面信息向量 C_i 和 C_j 间的距离^[17]为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p \omega_k (c_{ik} - c_{jk})^2} \quad (4)$$

1.3 面向时间过程状态自适应划分方法

面向时间过程电网状态划分的基本思想是基于电网状态的时变特征,并结合电网安全性评估状况,对其进行合理的时间过程划分,从而达到在时间区间上对电网进行安全分析的目的。目前,电网按照等时间间隔进行状态划分,并未考虑电网状态在时间上连续的变化特征,缺少对电网时间过程的整体把握,从而使安全分析的过程过于繁琐。所以文献[17-18]在静态安全分析过程中,将电网状态进行面向时间过程划分,得到不同时间间隔的时间子过程。但是其所采用的时间过程划分方法并未考虑电网系统时间过程的安全特征,而且划分所得子过程数目为初始设定值,故其划分结果的合理性有待商榷。本文提出一种自适应的时间过程划分方法,在保证划分结果准确性的同时保证子过程数目最小,提高静态安全分析的效率。

面向时间过程电网状态划分的具体步骤如图1所示。

第一步。设定初始数据:初始时间过程数目 k 设为1,子过程划分判断因子 i 设为1。

第二步。提取第 i 个时间子过程的最大、最小特征断面信息,并对这两个断面进行直流概率预想事故排序,得到最大和最小特征断面的预想事故集 S_1, S_2 。

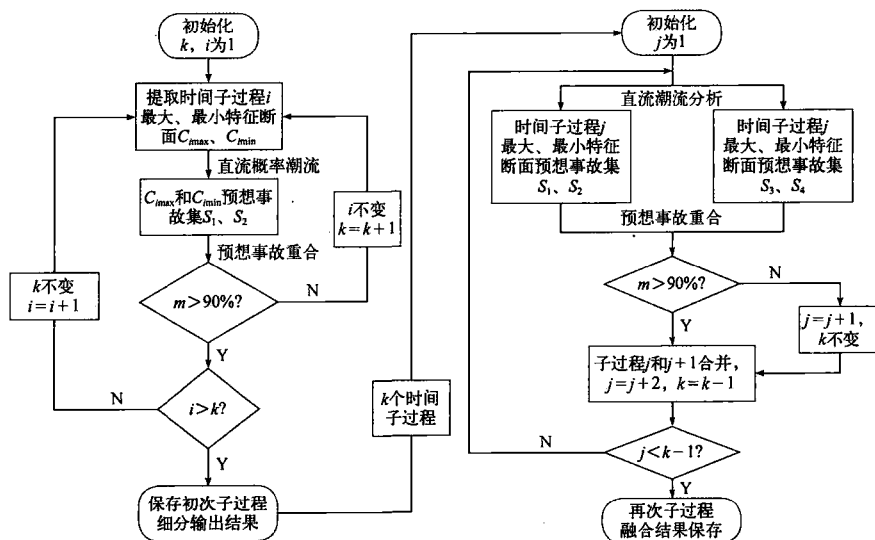


图1 面向时间过程的自适应聚类方法

第三步。比较 S_1 、 S_2 预想事故集重合度 m ，即预想事故集 S_1 、 S_2 排序的前10个预想事故相同程度，通过判断 m ，进行到第四或第五步。

第四步。若 $m < 90\%$ ，将第 i 个子时间过程划分为两个连续的时间子过程，并将 $k = k + 1$ ， i 不变，返回到第二步循环。

第五步。若 $m \geq 90\%$ ，当 $i < k$ 时，将 $i = i + 1$ ， k 保持不变，返回到第二步循环；当 $i \geq k$ 时，循环结束得到 $k_1 = k$ 个连续的子时间过程，初次子过程细分结束。

第六步。依次将相邻两个时间子过程的最大、最小预想事故集进行对比，如果预想事故集重合度 $m > 90\%$ ，将这两个时间子过程进行融合，最后得到 K 个最佳子时间过程。

2 电网时间过程预想事故生成与校验

电网在时间过程中运行状态的缓慢变化会导致预想事故集发生变化，所以在对整个时间过程的电网进行安全分析时，要重新生成预想事故集。以对整个时间过程进行划分后形成的子时间过程为基础，对每个子时间过程进行预想事故集生成，需要对特征时间断面进行分析和研究。

2.1 电网时间过程预想事故集

一个时间过程，即为一个时间区间。在时间区间上电网状态的变化，引起电网预想事故集的

变化。为了涵盖整个时间区间的电网安全状况，将时间过程预想事故集分为三类。

1) 时间过程持续性预想事故，即在整个时间过程中每一个时刻预想事故发生时均会引起安全越限。

2) 时间过程非持续性预想事故，即在整个时间过程中并不是每一时刻预想事故发生时都会引起安全越限，只会在该时间过程中某些时刻发生时引起电网的不安全状态。

3) 安全性预想事故，即在整个时间过程中任意时刻发生该预想事故都不会引起电网的不安全状况，这一性质的事故不用进行安全校验。

2.2 预想事故集生成及校验方法

经过时间过程电网状态划分后得到的各个子时间过程中，各时刻断面电网的安全状况相似，所以可以通过该子过程的三个特征断面（最大、中值和最小特征断面）对整个子过程的静态安全情况进行评估。

时间过程预想事故生成具体方法为：分别对最小、中值和最大特征断面进行完整概率性静态安全分析。即首先分别对各特征断面进行直流概率预想事故排序，然后依据排序结果进行完整的交流概率潮流校验，得到三个断面越限预想事故集合 A 、 B 和 C 。通过对这三个事故集的汇总，得到该时间过程的三类预想事故。

时间过程持续性预想事故集 $D=A \cap B \cap C$, D 中的预想事故在整个该时间过程中任何时刻发生时都会引起潮流越限, 可以为整个时间过程中校正策略提供参考, 该预想事故集的校验以三个特征断面交流概率潮流校验结果为准。

时间过程非持续性预想事故集 $E=(A \cup B \cup C)-D$, E 中的预想事故发生在该时间过程中的某个时刻断面时才会引起电网安全越限, 故需要进一步对其进行逐一时刻校验。

安全性预想事故集 $F=D+E$, F 中预想事故发生在该时间过程中任意时刻均不引起安全越限, 故不需要校验。

3 面向时间过程静态安全分析流程

电力系统的运行状态随时间而变化, 在实际电网中, 相邻时刻电网的状态变化幅度较小, 静态安全状况变化不大, 传统单断面逐一进行静态安全分析耗时较长, 另外考虑电网的不确定性因素, 电网安全分析逐渐向概率性靠拢, 分析时间又进一步增长, 所以将概率性静态安全分析运用到较长时间区间的电网运行状态中, 从而减少静态安全分析的繁琐度, 加快分析的速度。

面向时间过程的概率性静态安全分析将较长时间区间 L 电网运行过程通过自适应时间过程划分方法得到一定数目的子时间过程 $L_1, L_2, \dots, L_k$, 然后再对各个子时间过程 L_i 分别进行特征断面概率性静态安全分析, 通过特征断面安全分析结果得出各时间子过程安全分析状况并进行校验, 其流程如图2所示。

4 算例分析

以实际的NX电网系统为例, 根据本文的方法, 编写面向时间过程的概率性静态安全分析程序。将基于半不变量的概率潮流引入到静态安全分析中, 运用直流概率性 $N-1$ 开断预想事故排序和交流概率性静态安全校验, 进行逐一断面的传统概率性静态安全分析, 并将两种仿真时间和仿真预想事故结果情况进行对比, 验证该方法的可行性。

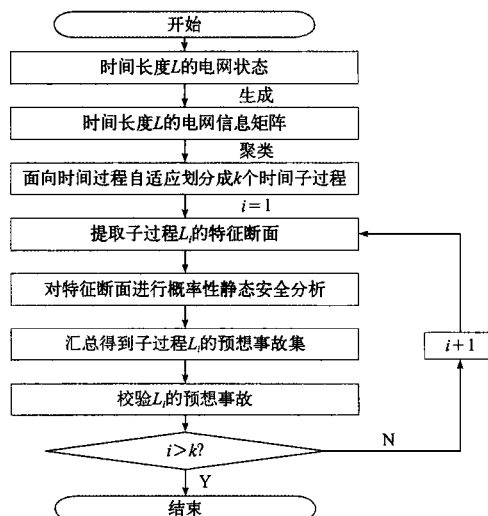


图2 面向时间过程的概率性静态安全分析流程

4.1 仿真参数

NX电网系统中共有151个节点, 其中发电机节点56个, 负荷节点95个, 支路252条。电网的随机性主要由风力发电节点、随机负荷节点以及源荷互动负荷节点体现, 其中风力发电节点为14个, 其概率分布采用正态分布, 方差为其期望值的0.3倍; 随机负荷节点为49个, 源荷互动负荷节点为6个, 其概率分布也采用正态分布, 方差为期望值的0.05倍。仿真采用NX电网2012年2月份某天24 h的时间过程, 电网运行状态信息以10 min为间隔, 共有144个数据点, 其中一天中最大总负荷为10 690.35 MW, 最小总负荷为9 175.729 MW。

4.2 仿真结果

采用1.2节中面向时间过程自适应划分方法, 首先将NX电网24 h时间断面进行初次时间子过程细分为13个时间子过程, 所得结果如表1所示。

由于初次时间子过程细分将整个时间过程循环进行自后向前分解, 再由前向后逐段分解, 而没有考虑分解后相邻时间过程的相似性, 所以根据相邻时间子过程特征断面直流潮流分析结果, 进行再次时间子过程融合过程。最终时间子过程划分结果为9个不同长度的时间子过程, 如表2所示。

采用2.2节中所述预想事故生成及校验方法对各子时间过程进行静态安全分析, 以子过程4为例, 其包含59个时间数据断面, 由表3中最大、

表1 初次时间子过程细分结果

时间子过程	起始时间	结束时间
1	0 : 00	1 : 20
2	1 : 30	2 : 00
3	2 : 10	3 : 30
4	3 : 40	4 : 00
5	4 : 10	7 : 50
6	8 : 00	9 : 50
7	10 : 00	14 : 00
8	14 : 10	15 : 30
9	15 : 40	18 : 00
10	18 : 10	19 : 00
11	19 : 10	20 : 10
12	20 : 20	21 : 20
13	21 : 30	24 : 00

表2 再次时间子过程融合最终结果

时间子过程	起始时间	结束时间
1	0 : 00	2 : 00
2	2 : 10	4 : 00
3	4 : 10	9 : 50
4	10 : 00	14 : 00
5	14 : 10	15 : 30
6	15 : 40	18 : 00
7	18 : 10	19 : 00
8	19 : 10	21 : 20
9	21 : 30	24 : 00

表3 时间子过程4特征断面静态安全分析结果

事故	C ₁	越限概率	C ₂	越限概率	C ₃	越限概率
1	195	6.520 8	196	5.991 4	196	6.121 4
2	196	6.468 3	195	5.991 4	195	6.091 4

注：C₁为最大特征断面；C₂为最小特征断面；C₃为虚拟中值特征断面；越限概率表示该支路开断时引起其他支路越限的概率和。

最小和中值特征断面安全分析结果显示，该时间过程仅存在两个引起安全越限的预想事故，即开断支路195，开断支路196。所以该时间过程的持续性预想事故集合即为开断支路195和开断支路196。采用传统单断面概率性静态安全分析算法对子过程4中所有时间断面进行计算，可知该时间过程中，每个时刻断面引起安全越限的预想事故有且仅有开断支路196、195，与本文方法所得预想事故结果相同。子时间过程4静态安全分析的预想事故结果如表4所示。

表4 时间子过程4静态安全分析结果

序号	预想事故	越限时段
1	195	10 : 00 ~ 14 : 00
2	196	10 : 00 ~ 14 : 00

子过程7包含6个时间数据断面，由表5中最大、最小和中值特征断面静态安全分析结果显示。该时间过程存在6个引起安全越限的预想事故，即开断支路195、196、192、193、121和126。

表5 时间子过程7特征断面静态安全分析结果

事故	C ₁	越限概率	C ₂	越限概率	C ₃	越限概率
1	196	8.036 8	196	8.036 8	196	8.036 8
2	195	7.914 4	195	7.914 4	195	7.914 4
3	193	5.344 5	193	5.344 5	193	5.344 5
4	192	5.289 6	192	5.289 6	192	5.289 6
5	126	2.104 0			126	1.013 1
6	121	2.104 0			121	1.013 1

注：C₁为最大特征断面；C₂为最小特征断面；C₃为虚拟中值特征断面；越限概率表示该支路开断时引起其他支路越限的概率和。

由于在三个特征断面上开断支路196、197、192和193均会引起电网潮流越限，所以在整个子过程7中的时间持续性预想事故集合即为开断支路196、195、192和193。而开断支路126、121仅在最小特征断面上发生时才会引起越限，所以子过程7的时间非持续性预想事故即为开断支路126、121。需要对该非持续性预想事故集进行时间子过程时刻逐一校验。校验结果如表6所示。采用传统单断面概率性静态安全分析算法对子过程7中所有时间断面进行计算，预想事故结果与本文方法所得结果一样，结果如表7所示。

表6 子过程7时间非持续性预想事故校验结果

时刻事故	18 : 10	18 : 20	18 : 30	18 : 40	18 : 50	19 : 00
121	0	0	0.353 1	0.554	0.741 6	0.877 1
126	0	0	0.320 1	0.518	0.711 5	0.864 4

采用面向时间过程概率性静态安全分析计算NX电网24 h数据，用时为14.390 7 s，采用传统单断面概率性静态安全分析计算，用时为177.058 7 s。所以该方法在计算速度上有一定优势，两种方法所得预想事故集的结果相同。

表7 时间子过程7静态安全分析结果

序号	预想事故	越限时段
1	195	18:10 ~ 19:00
2	196	18:10 ~ 19:00
3	193	18:10 ~ 19:00
4	192	18:10 ~ 19:00
5	126	18:30 ~ 19:00
6	121	18:30 ~ 19:00

5 结束语

目前,电力系统静态安全分析与电网的校正控制都是基于单一时间断面数据上进行的,并未考虑负荷动态变化的特征。本文提出的静态安全分析算法,在面向时间过程的安全分析中将离散断面的传统安全分析方法转换为连续时间过程安全分析,可以保证安全分析准确性的同时,减少安全分析的断面数量,节约了整个互动时间过程的安全分析时间。

参考文献

- [1] 邱家驹. 电力系统静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 1982, 6(2): 50-66.
- [2] Meliopoulos A P S, Cheng C S. Performance evaluation of static security analysis methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 1994, 9(3): 1441-1449.
- [3] 何洋, 洪潮, 陈昆薇. 稀疏向量技术在静态安全分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 42-45.
- [4] 丁平, 李亚楼, 徐得超, 等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 77-82.
- [5] 李树鸿, 梁新平, 周胜. 一种有效的事故排序方法[J]. 电力系统自动化, 1986, 6(6): 28-35.
- [6] 袁智强, 陈宇晨, 刘涌, 等. 改进直流法在静态安全分析中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(7): 23-27, 80.
- [7] 王腊梅. 在线静态安全分析方法的改进和完善[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [8] 马乐, 颜湘武, 刘艳萍. 基于直流潮流计算的风电接入能力分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(10): 50-52.
- [9] 汤必强, 李峰, 於益军, 等. 计及自动装置模拟的大电网在线静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 107-111.
- [10] 余加喜, 郭志忠, 白雪峰, 等. 基于面向时间过程的静态安全分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 142-149.
- [11] 王永辉, 王克文, 刘畅, 等. 概率潮流在电力系统静态 $N-1$ 校验中的应用[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 125-129.
- [12] 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.
- [13] 董雷, 程卫东, 杨以涵, 等. 考虑支路随机断线的概率潮流方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 79-84.
- [14] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 120-124.
- [15] 刘亚成. 电力系统概率仿真算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 1999.
- [16] 张传成. 概率潮流在静态安全分析中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [17] 余加喜. 面向时间过程的电网静态安全分析与日发电计划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [18] 石连山. 面向时间过程的特征模式提取及 $N-1$ 静态安全分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [19] 张宝群. 面向时间过程的负荷特征断面提取与日前交易的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [20] 刘铭, 王晓龙, 刘远超. 一种大规模高维数据快速聚类算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(7): 859-866.
- [21] 谢明霞, 郭建忠, 张海波, 等. 高维数据相似性度量方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(5): 92-96.

(收稿日期: 2015-07-09) EA