

电力系统在线安全分析与 预警系统实用化研究

胡迪军¹, 康建东², 鲁广明², 李伟²

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 41000;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对在线安全分析及预警系统部分结果无法达到指导在线运行要求的问题, 提出了暂态稳定曲线在线分析、小干扰稳定振荡模式在线辨识、电压稳定薄弱点在线辨识、危险断面在线搜索的实用化算法。实际系统应用结果表明, 该算法取得了良好的效果, 能够在线为电网调度运行人员提供决策依据。

关键词: 电力系统; 在线安全分析; 预警; 实用化算法

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2018)06-0001-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2018.06.001>

Research on practical algorithm of power system on – line security analysis and early warning system

HU Dijun¹, KANG Jiandong², LU Guangming², LI Wei²

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha Hunan 410000, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the problem that some results of power system on – line security analysis and early warning system can not meet the requirements of guiding on – line operation, a practical algorithm is proposed for on – line analysis of transient stability curve, on – line identification of small signal stability oscillation mode, on – line identification of weak points of voltage stability and on – line search of dangerous cross – section. The actual system application results show that the algorithm has achieved good results and can provide on – line decision – making basis for power network dispatching operators.

Keywords: power system; on – line security analysis; early warning; practical algorithm

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2018.06.001

基金项目: 国家电网公司科技项目(5216A015003G)

收稿日期: 2018-10-09

作者简介: 胡迪军(1976), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化技术研究工作。

在线安全分析及预警是在线监测电网运行的安全隐患,评估当前电网的稳定程度,合理安排和优化电网运行方式,提高电网运行决策的科学性、预见性,为电网的安全稳定运行提供重要的技术保障^[1-4]。目前,在线安全分析及预警系统已有多个成功案例,为电网安全稳定运行起到了积极作用,但是与此同时,由于在线安全分析及预警系统的人为参与环节较少,基本上全部分析过程都是事先配置后,由程序自动完成计算和结果汇总,因此,分析结果中常常出现分析结果不足或与人工判断不同的情况,即实用化程度有待提高。本文从在线安全分析及预警系统实用化的角度出发,在暂态稳定、小干扰稳定、电压稳定、断面稳定裕度等方面提出改进算法,提升实用化水平。

1 在线安全分析实用化方案

1.1 暂态稳定功角曲线在线分析

大扰动情况下,暂态稳定分析摘要结果只能给出定性的信息,即只能给出系统是否稳定和失稳类型这类信息,缺少对动态稳定性即功角或功率曲线的振荡模式进行分析。在线预警系统在暂态稳定仿真的基础上,当系统已出现失稳情况,则直接给出预警信息;当系统稳定时,针对所有功角曲线和功率曲线进行 prony 分析,将分析结果进行排序、对比,找出其中的主导振荡模式,将其中阻尼不足的振荡信息做出预警;同时,在线预警系统需提供曲线查看及拟合曲线对比工具,供用户检查曲线拟合的效果,对于拟合效果不理想的算例,允许用户手工调整 prony 分析参数,并重新进行拟合。

1.2 电压稳定薄弱点在线辨识

电压稳定性往往表现为一种局部现象,电压失稳总是从系统电压稳定性最薄弱的节点,开始引发并逐渐向周围比较薄弱的节点(区域)蔓延,严重时才会引发整个系统的电压崩溃。因此,用户十分关注在重负荷下的关键节点(包括关键负荷节点和关键发电机节点)和关键区域。由电压稳定极限可得出系统的稳定裕度,但稳定裕度仅

是系统的一个全局指标,并不能得到系统电压稳定的薄弱点或薄弱环节。把极限点电压、极限点灵敏度和电压稳定储备系数这 3 个电压稳定分析的重要指标引入在线分析,并分区域进行筛选和统计,最终根据分区域统计指标得出电压薄弱点和薄弱区域。

1.3 小干扰稳定振荡模式在线辨识

大规模电网小干扰稳定计算结果中包含大量的特征向量,这些特征向量又包含电网丰富的稳定信息,如果人为处理这些信息,势必会浪费不必要的时间和精力,这对电网的稳定运行也是不利的。采用数据聚类中融合算法思想对机组进行分群^[5],辅之以特征向量幅值比较方法,并以特征向量之间的夹角为主要判断依据,实现快速自动辨别出某一振荡模式下的主要参与发电机,以及发电机分群情况,大大减少了调度运行人员的工作量,为抑制该模式振荡提供依据。

1.4 危险断面自动辨识

输电断面组成是多种多样的,因此可能出现关键断面裕度较大,但其他断面达到输电瓶颈,处于危险状态,造成安全隐患,所以,需要引入危险断面辨识的功能,自动对当前状态进行分析,发现已处于重载状态的断面,采用图论的理论基础,把厂站或区域作为点,把相连接的线路作为路径,把线路输电功率和限值等数值作为路径的参数,以此构成一个图,进而在此基础上,进行分析和合并,并不断迭代,最终给出形成的断面和排序结果,把排序靠前的断面作为危险断面提示用户。

2 在线安全分析算法设计

2.1 暂态稳定功角曲线在线分析算法

在线 prony 分析是一种基于暂态稳定计算结果的再处理过程,它针对用户事先设置的功角或功率曲线进行计算,分析包含的主导振荡模式,将其中阻尼不足振荡信息做出预警。在线 prony 分析主要包括以下步骤:

(1) 当暂稳分析结果稳定时,针对用户设定

的功角、功率等曲线,自动进行 prony 分析;

(2)找出各曲线的主导振荡模式(非直流分量并且振幅最大);

(3)对比各曲线主导振荡模式,挑选出其中阻尼比最小的,作为暂稳任务的 prony 分析结果;

(4)对于阻尼比小于 5% 的情况,给出用户动态弱阻尼的提示。

2.2 电压稳定薄弱点在线辨识算法

2.2.1 静态电压稳定灵敏度分析

在计算电压稳定极限的过程中,可计算出各负荷母线的电压对系统总功率的变化率,即电压 - 功率灵敏度 $\left(\frac{dV}{d \sum P_L}, \frac{dV}{d \sum Q_L} \right)$,根据该灵敏度由

大到小可确定系统的薄弱节点和薄弱区域。由于是基于静态的潮流方程计算电压 - 功率灵敏度,所以该灵敏度反映的是由于系统网络特性所决定的薄弱节点和薄弱区域,可能与考虑发电机及其励磁系统的模态分析结果有较大差异。

2.2.2 静态电压稳定储备系数

在实际应用中经常用两种储备系数的大小来反映稳定裕度,即静态功率稳定储备系数 K_P 和静态电压稳定储备系数 K_V 。

静态电压稳定储备系数:

$$K_V = \frac{U_Z - U_C}{U_C} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_Z — 负荷母线初始点电压;

U_C — 极限点电压。

当 K_V 指标较小时,有两种可能性:第一种情况是当前运行点距 $P - V$ 曲线的极限运行点很近,这时该负荷节点的电压稳定性差,其相应的 K_P 指标也很小;第二种情况是当前运行点距 $P - V$ 曲线的极限运行点很远,但由于 $P - V$ 曲线变化比较平坦,使临界电压较高,负荷的增加对电压的影响不大,这种情况下,该负荷节点的电压稳定性好,其相应的 K_P 指标也很大。

静态电压稳定储备系数用于体现功率变化前后负荷点电压下降程度,也是当前运行的电压裕度。裕度越低的负荷点,其运行状态更加危险,也是电压相对越薄弱的位置。

2.2.3 关键指标分区统计

进行电压稳定指标分区统计工作,首先需要对其结果数据进行筛选,将其中负荷功率未增长的数据排除在外。

其次,把上述 3 个关键指标按照区域的不同进行区分,区域内可简单计算平均值或按照负荷功率的不同计算加权平均值。统计后,区域间进行对比排序,分 3 种类型给出薄弱区域的结果,其中,极限点电压较低、灵敏度较大、电压稳定储备系数较小的区域排序靠前,可以作为电压稳定薄弱区域的判别指标。

2.3 小干扰稳定振荡模式在线辨识

2.3.1 小干扰模态分群算法

根据数据聚类算法的思想进行电力系统小干扰稳定机组分群,具体步骤如下:

(1)分振荡模式读取特征根和特征向量,筛选掉等值机等不参与振荡的机组。

(2)针对某一振荡模式下所有机组的相关因子进行排序,同时筛选掉参与因子小于 0.000 1 的机组。

(3)初始化机组分群信息,初始认为每个机组独自形成一个群,记录群的数量 N ,此时群数量与机组数量相同。

(4)计算所有机组对应特征向量分量之间的夹角,作为两机间的距离,用此数值表征机组间的相似程度(差异程度)。距离数值越大,代表两个机组差异越大;反之越小代表两个机组相似程度越高。

(5)循环迭代合并相似度较高的机群。

①计算余下机群两两之间距离,找出距离最小的两个机群;

②计算这两个机群的内部最大距离,取其中较大的一个记做 $D_{\max}$;

③若剩下机群数量超过 5 个,则合并距离最小的两个群,机群数量减 1;

④若剩下机群数量不超过 5 个,则计算合并后该群内部最大距离 D_{group} ;如果 $4 \times D_{\max} < D_{\text{group}}$,则取消合并,并且结束迭代;反之,则保持合并,继续迭代。

(6)所有余下机组分群按照所含机组数量的多少,从多到少进行排序。

(7)把余下机群中所含发电机特征向量的平均幅值最大的一群作为第一群,把与第一群间距离最大的机群作为第二群。

(8)振荡模式主要表现为上述第一机群与第二机群间的振荡,分群结束,输出结果信息。

2.3.2 小干扰稳定振荡模式在线辨识

电力系统在运行过程中,主要影响大电网安全运行的振荡模式为区域间振荡模式和省间振荡模式等。对于实际系统而言,由于各个电网元件和参数是确定的,因此振荡模式只与电网的网络拓扑、机组状态和负荷水平等运行状态有关。换言之,在一定时间段内,主要振荡模式不会发生大的变化,即振荡频率与主要参与机组基本一致。

基于在线数据和分析结果,实时发现这些关键振荡模式的状态,可以掌握当前电网发生扰动时的变化特性;而通过对振荡模式中一些特征的分析,就能够达到发现关键振荡模式的目的。具体来讲,可以通过振荡频率和参与机组来对振荡模式进行辨识,两个条件同时满足可认为匹配成功,然后根据阻尼比分析结果来判断该振荡模式是否存在风险。

(1)振荡频率。通过小干扰特征根分析可得到振荡频率结果,比较该频率是否在某已知振荡模式的频率范围之内。

(2)参与机组。根据小干扰模态分群结果,把参与振荡的两个主要机群按区域进行划分,与已知振荡模式的参与机组区域进行匹配。

2.4 危险断面在线搜索算法

2.4.1 危险断面搜索算法

危险断面搜索算法采用有向图论的理论基础,把母线、厂站或区域作为点,把相连接的线路作为边,把线路功率传输方向作为边的方向,输电功率和限值等数值作为路径的参数,以此可构成一个有向图,电力系统的有向图描述模型为一弱连通的有向图。

一般意义上,由于断面各组成线路的输电方向是一致的,因此在断面判定的过程中,也需要排

除功率方向相反的线路。

各区域、相连线路、功率方向如图 1 所示。其中,区域 A 至区域 B 相连线路只有线路 1,可判断为由 1 条线路组成的断面;区域 B 至区域 C 相连线路为线路 2 和线路 3,且功率方向一致,可判断为由线路 2 和线路 3 组成的断面;区域 A 与区域 C 之间相连线路为线路 4 和线路 5,由于功率方向相反,所以不能组成断面。

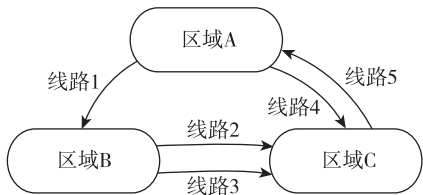


图 1 断面判定

在辨别危险断面中引入负载率的概念,负载率越高的断面相对就越危险。在判别危险断面迭代过程中,需要不断地对断面负载率进行排序。有的区域间传送功率较少或功率限值较大,相应断面的负载率很低,可以优先把这种区域合并为一个区域,原有断面作为一个内部功率传输断面,即可以排除在危险断面之外。经过不断的排序、合并迭代,最终剩下的断面都是负载率较高,也即是相对危险的断面了。危险断面判定流程如图 2 所示。

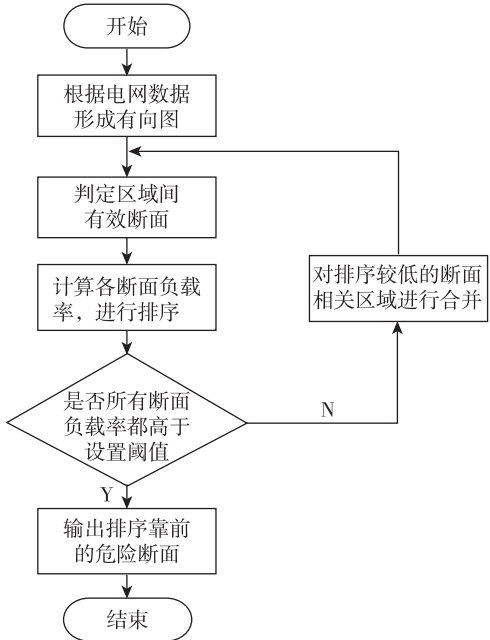


图 2 危险断面判定流程

2.4.2 断面功率调整策略

对于用户关注的关键断面,由于断面组成较为固定,因此这样断面的功率调整方案也是固定的,即送端和受端的区域和机组都可以事先设置。但对于上述自动分析的危险断面,则功率调整方案无法进行事先设置,因此需要开发断面功率调整方案的自动分析手段,即自动辨识出对调整断面功率最有效的机组。

功率调整自动分析算法以灵敏度分析作为基础,即对所有发电和负荷对线路功率变化的灵敏度进行计算;然后对灵敏度进行统计,将灵敏度分正负进行归类,把其中灵敏度为正,及增大发电造成断面功率增长的厂站或区域作为送端,反之作为受端,以此确定送受端,形成断面功率调整方案。

3 应用效果

以国调某日在线计算数据为基础(见表1),验证本报告中各类算法的有效性。当日华北-华中处于联网运行状态,因此在线数据中包含国调直调以及华北、华中所有 220 kV 以上的电网设备。

表 1 国调系统运行摘要统计

项目	统计数量
厂站	2 921 个
母线	27 097 条
线路	6 576 条
变压器	1 779 个
直流线	12 条
发电机	1 488 台
总出力	204 339 MW
总负荷	214 170 MW

3.1 暂态稳定曲线在线分析结果

选择华北、华中典型线路扫描其首端三永故障的暂稳计算,并进行 prony 分析,部分结果如表 2 所示。由表 2 可见暂稳结果为系统稳定,最大功角差为 139.29°,阻尼比大致在 7%~20% 之间。

表 2 暂态稳定分析结果

故障元件	稳定性	阻尼比/%	最大功角差/(°)
湖北 220 kV 母线 1	系统稳定	7.83	139.29
湖北 220 kV 母线 2	系统稳定	7.07	131.47
湖北 220 kV 母线 3	系统稳定	7.54	139.29
湖北 220 kV 母线 4	系统稳定	5.63	124.53
湖北 220 kV 母线 4	系统稳定	19.91	125.68

3.2 静态电压稳定薄弱点分析结果

静态电压稳定分析选择华北、华中区域同时增加发电和负荷。分析结果电压稳定裕度值为 5.55%,最低母线电压标幺值为 0.85。进一步分析主要电压薄弱点如表 3 所示,具体表现为极限点电压偏低,同时极限点灵敏度偏高,说明任何小的功率增长都会造成较大的电压跌落,容易出现电压崩溃的情况。

同时,上述电压薄弱点负荷都同属于湖北地区,说明湖北地区属于电压最薄弱区域,而非电压最低的母线,随负荷的增长容易发生电压稳定问题。

表 3 静态电压稳定分析结果

名称	极限点灵敏度	极限点电压/(p. u.)
湖北 220 kV 母线 1	0.002 853	0.86
湖北 220 kV 母线 2	0.002 868	0.859 836
湖北 220 kV 母线 3	0.002 822	0.861 719
湖北 220 kV 母线 4	0.002 837	0.865 087
湖北 220 kV 母线 5	0.002 840	0.866 700

3.3 小干扰振荡模式辨识结果

扫描 0.1~0.5 Hz 的 30 个系统特征值,并进行小干扰振荡机组分群分析,可发现系统中存在的主要振荡模式,其中华北-华中振荡模式如表 4 所示。

表 4 华北-华中振荡模式分群结果

机群 1 主要机组	参与因子	机群 2 主要机组	参与因子
华中机组 1	0.003 707	华北机组 1	0.002 106
华中机组 2	0.003 704	华北机组 2	0.001 555
华中机组 3	0.004 079	华北机组 3	0.001 557
华中机组 4	0.004 790	华北机组 4	0.001 365
华中机组 5	0.004 924	华北机组 5	0.002 628

(下转第 11 页)