

# 电力系统功角失稳自动切机搜索方法研究

司大军

(云南电网有限责任公司电网规划建设研究中心, 昆明, 650011)

## An Automatic Tripping Generators Method for Angle Instability of Electric Power System

SI Dajun

(Yunnan Electric Power Grid Corporation, Yunnan Kunming 650011)

**摘要:** 本文针对电力系统暂态稳定仿真中, 出现功角失稳后寻找最优切机的难题, 提出了一种针对功角失稳的自动切机搜索方法, 能够得到恢复系统稳定的极小切机组合。该方法基于发电机节点相角越大电气距离越远的规律, 优先切除电气距离远的机组, 更有利于保持电力系统的稳定性, 通过迭代搜索, 找到恢复电力系统稳定运行的极小切机容量。通过大量仿真验证了本文方法的正确性。

**关键词:** 稳定切机; 自动; 功角稳定

**Abstract:** It is difficult to find a optimal tripping generator group to solve angle instability of electric power system. So, a novel automatic tripping generators method for angle instability is presented. This method is based on the principle the phase of a generate is more big the electric distance is more far. The generates that electric distance are far will be tripped first. By several iterators, the minimized tripping generator group can be found. Many simulation show that the method is correct and valid.

**Key words:** Tripping generator, Automatic, Angle stability

## 1 引言

在电力系统机电暂态仿真分析过程中, 会出现因故障而造成电力系统功角暂态失稳(以下简称“功角失稳”)的情况<sup>[1, 2]</sup>。对于功角失稳, 可以在故障后及时切除部分发电机组(以下简称“切机”)恢复电力系统稳定性<sup>[3]</sup>。目前, 寻找恢复电力系统稳定的切机措施往往需要计算分析人员观察发电机功角曲线, 根据故障位置大概判断失稳机组所在区域, 找到失稳机组, 并凭借经验(一般切除“远端”机组有利于提高暂态稳定性, 有利于解决功角失稳问题)在失稳机组中找到解决功角失稳问题需要切除的机组群。在进行这项工作中存在以下问题: 一是失稳机组所在区域是计算分析人员大概判断, 并不精确; 二是在找需要切除的机组群过程中, 切除哪些机组主要依靠经验判断, 主观因素对寻找切除机组群影响很大, 往往离最优切机结果较远; 三是在寻找解决功角问

题的切除机组群过程中需要不断“试错”, 逐个地增加或减小切除机组群, 寻求稳定切机的边界, 计算工作量大, 需要投入大量人力资源。

本文根据电力系统暂态稳定基本原理, 通过识别失稳断面, 准确找到失稳机组, 再根据发电机机端电压的相角大小判断失稳机组电气距离的远近, 优先切除远端机组, 力图最少切除机组使得电力系统恢复稳定。形成了一套电力系统功角稳定自动切机搜索方法。

## 2 功角失稳自动切机搜索原理

功角失稳通常表现为两个机群的功角差不断增大, 可以等值为图1所示的双机系统。其中等值发电机G1表示送端系统, 等值发电机G2与负荷表示受端系统。当系统联络线路(L2)发生故障且保护动作切除后, 发电机G1与G2的功角差将增大。当功角差达到一定数值(如: 180°)后, G1与G2将无法同步运行, 而出现失步振荡, 即

出现发电机功角失稳。失步振荡将产生一个振荡中心，振荡中心将位于送端与受端系统的联络元件（如图1中的L1）上。在电力系统仿真中，可以通过观测系统中最大发电机功角差来判断是否功角稳定，可以通过观测元件两侧电压角度差是否达到 $180^\circ$ 来判断该元件是否处于振荡中心，从而找到振荡中心支路。在故障后，及时切除部分送端机组，减小送端过剩功率来，可恢复电力系统稳定。那么切除哪些送端机组更有利于功角稳定是一个需要研究的问题。

切机的目的是减小送、受端机组的功角差，因此切除在暂态过程中功角差最大的机组将更有利于功角稳定。因此，可以将送端机组按发电机功角进行从大到小排序，并顺序逐一切除，直到系统恢复稳定，就能够得到针对功角失稳切机的极小组合。大规模电力系统仿真中机组众多（多达上万台），不可能输出所有机组的功角。经过分析，发电机端电压的相角与发电机功角有较好的一致性。为简化切机优化顺序的确定，拟采故障前（潮流计算）发电机端电压相角代替功角。

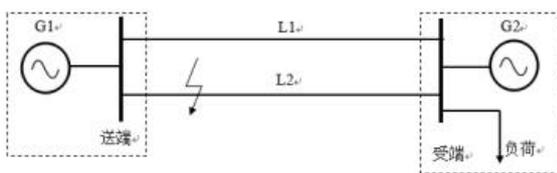


图1 两机等值系统示意图

由以上分析可以得到功角失稳自动切机搜索基本原理为：在电力系统仿真中出现功角失稳后，找出振荡中心所在支路，将所有振荡中心支路视为一个断面，并根据断面潮流方向，将系统分为送端与受端两个子系统。读取送端子系统所有发电节点电压相角、有功出力等信息，并将发电节点按电压相角从大到小排序，相角大的机组（发电节点）将优先切除。此后以一定步长逐渐增加被切除机量，直到系统恢复稳定为止。

### 3 自动切机的实现方法

这里将以中国电科院开发的 PSD-BPA 软件为例说明功角失稳自动切机的实现方法。PSD-BPA 软件主要有潮流计算与稳定计算两大功能。进行电力系统稳定计算时需要准备潮流计算文件与稳定计算文件。其中，潮流计算文件包含发：电机节点、负荷节点、线路、变压器等电力系统网络信息，稳定计算文件包含：发电机转动惯量、发电机暂态与次暂态电抗及相关时间常数、机组励磁系统模型与参数、机组调速系统模型与参数、直流输电控制系统参数，故障设置等暂态计算相关参数与设置。在进行暂态稳定仿真时，需要先进行潮流计算，得到收敛、正确的基础潮流，再基于基础潮流进行故障的暂态稳定仿真。PSD-BPA 暂态稳定仿真能够输出机组最大功角差（用于判断功角稳定），功角失稳后能够输出振荡中心支路。自动切机的实现具体方法如下：

步骤1：在进行完暂态稳定仿真后，从 PSD-BPA 仿真结果读取暂态稳定过程中最大功角差，当最大功角差大于 $360^\circ$ 认为功角失稳。

步骤2：由于出现功角失稳，必然伴随电力系统失步振荡，也必然出现振荡中心支路。从 PSD-BPA 暂态仿真失稳的计算结果中读取振荡中心所在支路，并将振荡中心所在支路视为断面（即断开所有断面支路后系统将分为两个子系统）。

步骤3：断开振荡中心支路，电力系统将会分为两个子系统，一个子系统向另外一个子系统输送功率。可按照振荡中心支路潮流方向，送出功率的系统称为送端系统，接受功率的系统称为受端系统。

步骤4：找到并读取送端系统所有发电节点相角、发电出力等数据。

步骤5：将送端发电节点按相角从大到小进行排序，形成可切发电节点（发电机组）列表，用  $P_i$  表示各发电节点有功出力，下标  $i$  为自然

数  $1 \dots N$ ,  $N$  为发电节点个数。所有可切机组容量  $P_{\text{all}} = \sum_{i=1}^N P_i$ , 令切机步长  $P_{\text{step}} = \min(P_i)$ , 即  $P_{\text{step}}$  为可切机组中出力最小的机组。令切机量  $P_t = P_{\text{step}}$ 。

步骤6: 从可切发电机组列表中从前至后选取  $K$  个发电节点, 使得  $\sum_{i=1}^K P_i \geq P_t$  而  $\sum_{i=1}^{K-1} P_i < P_t$ 。即找到了切机容量  $P_t$  对应的  $K$  个发电节点(发电机组)。

步骤7: 在 PSD-BPA 稳定计算文件中, 加入切除  $K$  个发电节点(发电机组)的故障卡(LS卡), 并再次进行暂态稳定仿真。

步骤8: 读取暂态稳定仿真结果, 判断是否存在功角稳定, 若功角失稳, 则令  $P_t = P_t + P_{\text{step}}$ , 增加切机量, 转入步骤 5; 若功角稳定则进行下一步。

步骤9: 记录  $P_t$  以及对应的  $K$  个发电节点(发电机组)并输出。

步骤10: 结束。

#### 4 自动切机搜索软件

基于以上原理与方法, 开发了基于 PSD-BPA 的功角失稳自动切机搜索软件。并在云南电网分析研究中进行了应用, 现将应用情况介绍如下。

云南某局部电网结构与潮流如图 2 所示, 500kV 太安变与黄坪变存在 220kV 电磁环网。通过 PSD-BPA 软件计算, 当 500kV 太安-黄坪 N-2 后, 大量潮流转移到 220kV 电网, 造成了功角失稳。自动切机搜索软件读取到振荡中心位于 220kV 丽江~羊龙潭双回线路, 并根据 220kV 丽江~羊龙潭双回线路潮流确定了送端系统及其机组, 送端机组共 5667MW, 主要送端机组排序如表 1 所示。

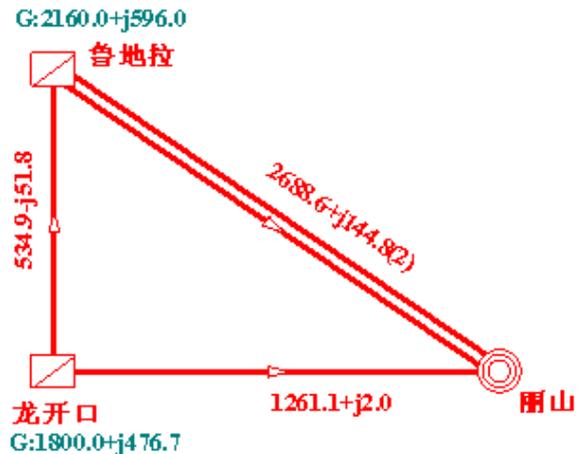


图 2 云南某局部电网结构与潮流图

表 1 部分送端机组

发电节点	所在电压等级(kV)	有功出力(MW)	机端电压相角(度)
龙开口 1G	500	360	28
龙开口 2G	500	360	28
龙开口 3G	500	360	28
龙开口 4G	500	360	28
龙开口 5G	500	360	28
鲁地拉 1G	500	360	25.86
鲁地拉 2G	500	360	25.86
鲁地拉 3G	500	360	25.86
鲁地拉 4G	500	360	25.86
鲁地拉 5G	220	360	25.86
鲁地拉 6G	220	360	25.86

切机步长  $P_{\text{step}}$  选择为送端机组总容量的 12.5%, 即 495MW。第 1 次切机为 495MW, 按超过 495MW 且最接近的原则, 将切除“龙开口 1G”、“龙开口 2G”机组, 切除后功角依然失稳, 通过 3 次切机搜索, 切除龙开口电站 5 台机组与鲁地拉电站 1 台机组后系统功角稳定, 软件运行结果如图 3 所示。

自动切机第1次搜索		自动切机第2次搜索		自动切机第3次搜索		自动切机第4次搜索	
结果浏览							
搜索方向	向上						
搜索次数	3						
优化过程							
运行时间	79.563秒						
运行信息	切机输入:1935.00 MW, 输出:2160.00 MW						
是否稳定	是						
结果	功角稳定, 电压稳定, 动态稳定(1), 频率稳定, 元件过载						
❖ 阻尼							
❖ 过载							
低电压节点	无						
策略结果							
>	策略名	类型	是否过切	理论切机	实际切机	共执行切机	列表
	自动切机_切机_是			2160.00	2160.00	1轮	龙开口5G18, 360.00MW 龙开口4G18, 360.00MW 龙开口3G18, 360.00MW 龙开口2G18, 360.00MW 龙开口1G18, 360.00MW 鲁地拉1G18, 360.00MW

图3 自动切机搜索结果

## 5 结论

1、提出了一种基于机端电压相角的功角失稳自动切机搜索方法。对功角失稳机理进行了分析, 根据发电机节点功角(相角)越大电气距离越远的规律, 提出了利用机端电压相角对送端电网机组进行排序, 优先切除相角最大机组的自动切机搜索方法。

2、开发了基于 PDS-BPA 开发了针对功角失稳的自动切机搜索软件, 通过大量的仿真与测试, 所开发的稳定切机自动搜索软件能够适应复杂的应用场景, 具有广泛的适应性。

## 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义和分类评述. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35
- [3] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T723-2000 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

收稿日期: 2019年 月 日

作者简介:

司大军(1976-), 男, 山西西城人, 博士, 教授级高工, 主要从事电网规划、电网分析研究工作, 现为云南电网有限责任公司电网规划研究中心二级技术专家。地址: 云南省昆明市拓东路 73 号, 邮编: 650011, 邮箱: dajunsi1976@163.com, 联系电话: 0871-63012753。