

# 安全稳定控制系统切负荷量分配算法

陈兴华<sup>1</sup>, 吴烈鑫<sup>1</sup>, 吴国丙<sup>1</sup>, 张荫群<sup>1</sup>, 李雪明<sup>2</sup>

(1. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600; 2. 南京南瑞集团公司稳定技术分公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 目前安全稳定控制系统在电网中已得到了广泛的应用。在电网发生严重故障后, 安全稳定控制系统将根据策略确定须切负荷总量。如何将切除总量合理地分配至各执行站, 需制定一套行之有效、兼顾全面的算法。首先确定了算法所应满足的五项基本原则, 然后相应地介绍了两种算法。其中, 轮次法在满足各项基本原则的前提下, 通过全局逼近的方法, 大幅减少了安全稳定控制系统的过切量, 有效降低了事故情况下系统和用户的损失。轮次法在实际应用中的效果显著。

**关键词:** 安全稳定控制; 控制策略; 切负荷; 轮次; 权重

## Distributing algorithm of load-shedding for security and stability control system

CHEN Xing-hua<sup>1</sup>, WU Lie-xin<sup>1</sup>, WU Guo-bing<sup>1</sup>, ZHANG Yin-qun<sup>1</sup>, LI Xue-ming<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, China;

2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Today security and stability control system has been applied to the power grid widely. After serious fault appears, security and stability control system will decide the quantity of load-shedding according to the decision table. An effective full-scale algorithm is needed to distribute it to each actuating station. Firstly, five basic principles are established. Then, two algorithms are introduced. The algorithm based on priority can cut down the quantity of load-shedding greatly and reduce the loss of system and user effectively. Its application is remarkable.

**Key words:** security and stability control; control strategy; load shedding; sequence; weight

中图分类号: TM712      文献标识码: A      文章编号: 1003-4897(2007)11-0026-04

## 0 引言

自“8.14”美加大停电后, 国外接连发生多起大面积停电事故, 引起了我国电力系统的高度警惕, 系统运行标准相应地提高<sup>[1,2]</sup>。220 kV电压等级以上交流元件的N-2故障、直流输电系统双极闭锁等严重的故障类型均纳入了调度运行考虑的范围之内。另一方面, 不少地区的电网建设滞后于负荷的增长和电源的建设, 造成负荷受限、电源窝电、电网暂态稳定、频率、电压稳定以及热稳定等问题突出<sup>[1]</sup>。典型例子如南方电网, 现有的500 kV电网输电能力不足, 形成“强直弱交”的局面, 使本应相互支援的交直流并联方式变成了强弱同存的现状<sup>[3]</sup>。为了解决系统稳定问题, 提高系统的事故抵御能力, 防止电网事故的发生和扩大, 安全稳定控制系统在我国不少地区已被广泛应用。区域稳定控制是确保现代电力系统安全稳定运行的重要手段<sup>[4]</sup>。安全稳定控制系统成为维持电力系统安全稳定和可靠运行必不可少的第2和第3道防线<sup>[5]</sup>。

## 1 区域安全稳定控制系统简述

由结构上看, 安全稳定控制系统可分为就地安稳控制系统和区域安稳控制系统。就地安稳控制系统结构较简单, 无远方功能, 只负责处理本地任务和策略。区域安稳控制系统结构则相对复杂, 一般由控制主站、下属若干个区域控制子站, 以及控制子站下属若干个执行站级联而成。控制主站与控制子站、控制子站与执行站相互通信, 实时交换信息和命令。在电网发生严重故障时, 区域控制主(子)站经过故障判别和策略搜索后, 确定下属各执行站须采取的措施, 然后自上而下地发送命令, 最终由执行站执行各自的切机或切负荷命令。根据电力系统的特点, 控制策略的分析计算应在事故前进行, 实现方法分为2种: 一种是离线方式, 即由调度和运行方式人员, 对各种运行方式下可能遇到的故障进行稳定分析计算, 形成控制策略; 另一种是在线方式, 由在线决策系统的计算机根据当前电网的实时状态, 对可能发生的各种预想故障进行稳定分析

计算, 形成当前电网的控制策略, 在线刷新控制策略表, 同时给调度员进行预防性控制的提示<sup>[6]</sup>。

文献[7, 8]为搜索最小切负荷量和制定较优切负荷方案的方法提供了借鉴和重要的思路。

对于功率送出型电网, 配置的执行站一般为切机执行站, 设置在区域内的电厂或功率倒送的变电站, 切除对象主要为电厂内的机组, 也包括变电站内功率倒送的线路。

对于功率受入型电网, 配置的执行站一般为切负荷执行站, 设置在区域内重要的、能提供一定可切负荷量的、灵敏度较高的变电站, 切除对象主要为站内的 110 kV 线路、10 kV 馈线或 10 kV 主变变低开关。通常, 由于被安排切除的线路所带负荷量受时间、天气、负荷特性及计划安排等众多因素影响而不断变化, 故每个执行站的可切量大小也随之变化。而区域控制子站的可切总量为区域内各执行站可切量之和, 故其同样实时地变化。在电网发生严重故障, 需安稳控制系统动作时, 控制子站在完成故障判别、策略搜索, 得出须切总量后, 如何根据系统的实时工况, 将切除总量合理地分配至各执行站, 需制定一套行之有效、兼顾全面的算法。

## 2 切负荷量的分配原则

区域控制子站向各执行站分配切负荷量时, 应遵循以下的原则:

1) “不欠切”原则。故障情况下, 若安稳控制系统实际动作切除的负荷量小于策略中安排的切除量, 则有可能导致存在暂态稳定或电压稳定问题的系统失稳。因此欠切是不安全、不允许的。

2) 过切量尽量小原则。某些情况下, 系统如果过切量过大, 则有可能带来恢复电压过高, 或者再次失稳的问题。在保证了不欠切的情况下, 过切的负荷量越少, 系统和用户的损失越少。可将过切率作为评价指标之一, 公式如下:

$$\eta = \frac{P_q - P_{xq}}{P_{xq}} \times 100\%$$

其中:  $P_q$  为实切负荷量,  $P_{xq}$  为须切负荷量。

3) 公平性原则。在考虑切负荷灵敏度的基础上, 切除量应按照一定的公平性原则, 均匀地分配至各执行站。尽量兼顾各站利益, 避免把切除量集中在个别执行站。

4) 实时性原则。分配算法须考虑安稳装置在数据通信、CPU 处理速度等方面的性能, 适当控制通信数据量和 CPU 计算量的规模, 满足系统运行所需的实时性要求。

5) 整定方便原则。应能方便整定人员日常的整定, 尽量减轻整定工作量。

根据上述的五项基本原则, 本文将分别介绍权重法和轮次法两种切负荷分配算法。

## 3 权重法

权重法具体的思路如下:

1) 各执行站预先将所有的可切线路和变低开关的优先级排序, 并向控制子站上送各站的可切负荷总量;

2) 区域控制子站分配至各执行站的需切负荷量, 根据如下公式进行计算:

$$P_{iq} = \frac{P_{xq} P_i K_i}{\sum_{i=1}^n P_i K_i}$$

其中:  $P_{iq}$  为第  $i$  个执行站的须切负荷量,  $P_{xq}$  为区域控制子站须切负荷总量,  $P_i$  为第  $i$  个执行站当前的可切负荷总量,  $K_i$  为第  $i$  个执行站的权重系数,  $n$  为该区域控制子站下属执行站的个数。

权重系数一般由方式人员根据电网的实际情况进行整定。对于各个执行站, 其权重越大, 或实际可切量越大, 则分配到的需切负荷量越大, 反之亦然。

3) 各执行站装置根据区域控制子站分配的切除量, 按 1) 预定的线路或变低开关优先级进行选取, 满足总量大于等于  $P_{iq}$  且尽量少要求。对于各执行站, 一旦切除对象确定后, 装置将动作, 同时切除各轮次需切的线路或变低开关。

根据现场联调的经验, 系统过切量常常过大, 难以控制。过切量的大小往往取决于 2 个因素: 首先是各执行站最后一级须切负荷单元的大小, 该量越大, 系统总的过切量将越大; 其次, 参与分配的执行站个数增多, 也将增加系统的过切几率。

因此, 在保留执行站各可切负荷单元的优先级排序基础上, 为尽量减少系统的过切量, 需对切负荷量分配算法进行改进。

## 4 轮次法

从本质上看, 权重法是通过局部逼近达到减少过切量的目标。而轮次法在权重法基础上进行了改进, 通过全局逼近, 大大降低了系统的过切量, 具体思路如下:

1) 各执行站预先将所有的可切线路和变低开关的优先级排序, 每一个轮次可以有一个或多个切负荷单元, 且规定每个执行站的轮次数不超过限值;

与权重法不同的是,各执行站向控制子站上送各轮的可切负荷量;

2) 控制子站对下属各执行站的优先级进行排序。

完成上述两步工作后,控制子站根据各执行站上送的各轮次负荷实时工况,即能生成该区域的负荷轮次表,具体如表1所示。

表1 轮次法生成的负荷轮次表

Tab.1 Load priority created by priority algorithm

| 轮次 | 执行站 1    | ... | 执行站 j    | ... | 执行站 n    | 轮次总和  |
|----|----------|-----|----------|-----|----------|-------|
| 1  | $P_{11}$ | ... | $P_{1j}$ | ... | $P_{1n}$ | $P_1$ |
| ⋮  | ⋮        |     | ⋮        |     | ⋮        | ⋮     |
| i  | $P_{i1}$ | ... | $P_{ij}$ | ... | $P_{in}$ | $P_i$ |
| ⋮  | ⋮        |     | ⋮        |     | ⋮        | ⋮     |
| Q  | $P_{Q1}$ | ... | $P_{Qj}$ | ... | $P_{Qn}$ | $P_Q$ |

表1中,各执行站根据优先级顺序由左至右进行排列,各执行站的轮次由上至下进行排列。 $P_{ij}$ 表示第j个变电站的第i轮负荷, $P_i$ 表示各执行站第i轮的负荷总量和,即

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij}$$

安稳控制系统运行时,各执行站向所属的控制子站实时上送各轮可切负荷量,控制子站不断地同步刷新负荷轮次表。当安稳控制系统的远切功能启动时,控制子站将根据策略确定须切负荷总量 $P_{xq}$ ,从负荷轮次表中确认各执行站须切除的轮次。

假设现共有n个执行站,需要切除到第m个执行站的第k轮。为了使切除量满足不欠切且过切尽量少的原则,m,k应满足以下条件:

$$\sum_{i=1}^{k-1} P_i + \sum_{j=1}^{m-1} P_{kj} < P_{xq} \leq \sum_{i=1}^k P_i + \sum_{j=1}^m P_{kj}$$

当m,k确定以后,对于第1~m个执行站,需要切除第1~k轮;对于第m+1~n个执行站,需要切除第1~k-1轮。

由此可知,使用轮次法时,只有一个执行站过切其中的一轮负荷,其余执行站均不过切。因此总的负荷切除量既满足了“不欠切”的原则,过切负荷单元也比权重法少得多。

## 5 讨论

权重法与轮次法均满足了“不欠切”原则。使用权重法分配切负荷量,各个执行站均有可能过切,

总的过切量较大;使用轮次法分配切负荷量,只有一个执行站的其中一轮负荷过切,总的过切量与权重法相比较小。

权重法与轮次法均能按照一定的公平性原则,将切除量分配至各个执行站。当切除某一个执行站对系统稳定的灵敏度较高时,权重法只需通过权重的设置倾向,即可达到多切该站的目的,反之亦然。而使用轮次法,若要达到多切或少切某站的负荷,则需对所有执行站的切负荷单元进行统筹排序,整定较为繁复。因此,轮次法与权重法相比,灵活性较差。

从算法处理速度来看,数据通信方面,权重法只需上送各执行站总的可切负荷量,轮次法则须上送各执行站各轮次的可切负荷量。假设执行站总数为m,总轮次为k,使用轮次法比权重法每个执行站至少须多上送k-1个数据,区域控制子站至少须多接收m(k-1)个数据;计算规模方面,两种算法的计算量在同一个数量级,相差不大。目前各主要生产厂已开发的安稳装置硬件处理速度,对于含执行站数目在16个以内的区域控制系统,控制子站使用以上两种算法均能满足系统对处理速度方面的要求。

系统整定方面,无论控制子站还是执行站,两种算法对于整定人员,整定参数量相差不大。

## 6 应用效果对比

下面以广东500 kV博罗站及其下属6个执行站组成的区域安稳控制系统为例,分别使用权重法和轮次法,进行效果对比。

假设6个执行站的权重均为1,各有6轮,权重法和轮次法整定的被切除线路优先级相同,博罗控制子站须切总量 $P_{xq}=300$  MW。博罗控制子站某时刻各轮次的可切量如表2所示。

从表2可知,使用权重法分配切负荷量时,总共过切了46 MW,过切率为15.3%;而使用轮次法分配切负荷量时,总共只过切了8 MW,过切率仅为2.7%,远低于权重法。

## 7 总结

轮次法能有效克服权重法过切量大的缺点,有效降低事故情况下系统和用户的损失。目前广东电网新建的博罗、鹏城和深圳等安稳控制系统均已采用轮次法,粤东、横沥、江门等原采用权重法的系统也已改造为轮次法。所有系统运行状况良好。

表 2 博罗控制子站某一时刻的负荷轮次表

Tab.2 Load priority of Boluo sub-station sometime

|       | 湖滨/MW | 义和/MW | 金源/MW | 仰天/MW | 九潭/MW | 河源/MW | 各轮总和/MW |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 第 1 轮 | 13    | 21    | 22    | 13    | 24    | 10    | 103     |
| 第 2 轮 | 12    | 33    | 21    | 10    | 15    | 8     | 99      |
| 第 3 轮 | 20    | 11    | 11    | 17    | 7     | 12    | 78      |
| 第 4 轮 | 15    | 13    | 7     | 26    | 9     | 9     | 79      |
| 第 5 轮 | 22    | 23    | 23    | 15    | 12    | 11    | 106     |
| 第 6 轮 | 16    | 12    | 18    | 11    | 18    | 7     | 82      |
| 各站总和  | 98    | 113   | 102   | 92    | 85    | 57    | 547     |
| 权重法   | 应切量   | 54    | 62    | 56    | 50    | 47    | 300     |
|       | 实切量   | 60    | 65    | 61    | 66    | 55    | 346     |
|       | 切除轮次  | 4     | 3     | 4     | 4     | 4     | 4       |
| 轮次法   | 实切量   | 60    | 78    | 54    | 40    | 46    | 308     |
|       | 切除轮次  | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3       |

## 参考文献

- [1] 韩英铎, 姜齐荣, 谢小荣, 等. 从美加大停电事故看我  
国电网安全稳定对策的研究[J]. 电力设备, 2004, 5  
(3): 8-12.  
HAN Ying-duo, JIANG Qi-rong, XIE Xiao-rong, et al.  
August 14th Blackout in the US and Propose for Chinese  
Power System to Improving Stability and Security[J].  
Electrical Equipment, 2004, 5 (3): 8-12.
- [2] 鲁宗相, 蒋锦峰, 袁德, 等. 从“8.14”美加大停电思  
考电力可靠性[J]. 中国电力, 2003, 36 (12): 1-6.  
LU Zong-xiang, JIANG Jin-feng, YUAN De, et al.  
Rethinking of August 14th Northeast U.S.-Canada  
Blackout from the Viewpoint of Reliability[J]. Electric  
Power, 2003, 36 (12): 1-6.
- [3] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J].  
电网技术, 2004, 28 (21): 1-5.  
HE Da-yu. Rethinking over '8.14' US-Canada Blackout  
After One Year[J]. Power System Technology, 2004, 28  
(21): 1-5.
- [4] 孙光辉. 区域稳定控制中若干技术问题[J]. 电力系统自  
动化, 1999, 23 (3): 4-7.  
SUN Guang-hui. Techniques in Regional Stability  
Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,  
23 (3): 4-7.
- [5] 宋锦海, 李雪明, 姬长安, 等. 安全稳定控制装置的发  
展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (23):  
91-96.  
SONG Jin-hai, LI Xue-ming, JI Chang-an, et al. Current  
Situation and Development Prospect of Security and  
Stability Control Equipment[J]. Automation of Electric  
Power Systems, 2005, 29 (23): 91-96.
- [6] 孙光辉, 毕兆东, 赵希才, 等. 电力系统在线安全稳定  
评估及决策技术的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29  
(17): 81-84.  
SUN Guang-hui, BI Zhao-dong, ZHAO Xi-cai, et al.  
Technology of On-line Power System Stability and  
Decision-making[J]. Automation of Electric Power  
Systems, 2005, 29 (17): 81-84.
- [7] Van Cutsem T, Moors C, Lefebvre D. Design of Load  
Shedding Schemes Against Voltage Instability Using  
Combinatorial Optimization[A]. In: Power Engineering  
Society Winter Meeting[C]. 2002. 848-853.
- [8] Hsu C T, Chen C S, Chen J K. The Load-shedding  
Scheme Design for an Integrated Steelmaking  
Cogeneration Facility [J]. IEEE Trans on Industry  
Applications, 1997, 33(3): 586-592.
- [9] 吴国丙, 吴烈鑫, 王荣, 等. 广东电网安全稳定控制系统切  
负荷实施方案及其改进[J]. 南方电网技术研  
究, 2005, 1(5): 48-56.  
WU Guo-bing, WU Lie-xin, WANG rong, et al. An  
Implementation Scheme and Its Enhancement of Load  
Shedding for The Security-stability-control System in  
Guangdong Power Grid[J]. China Southern Power Grid  
Technology Research, 2005, 1(5): 48-56.

收稿日期: 2006-11-30; 修回日期: 2007-01-15

作者简介:

陈兴华 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行分析和稳定控制方面工作; E-mail: soulchen@126.com

吴烈鑫 (1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行方式、系统控制、运行管理方面工作;

吴国丙 (1977-), 男, 硕士, 从事电力系统运行方式和系统稳定控制方面的研究和管理。