

# 江苏电网 AGC 安全约束控制的实现与应用

钱玉妹, 朱海兵, 徐 田

(江苏电力调度控制中心, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 本文阐述了利用安全约束调度进行 AGC 安全约束控制的实现技术及应用。当系统处于紧急状态或预警状态时, AGC 根据实时安全约束调度提出的机组调整方案和灵敏度信息, 通过限制机组 AGC 调节上下限或限制机组 AGC 调节方向, 执行稳定断面越限的校正控制和预防控制。实践表明, AGC 安全约束控制有效地消除和缓解了电网稳定断面的越限, 提高了电网的安全稳定水平。

**关键词:** AGC; 安全约束; 校正控制; 预防控制

## 0 引言

近几年, 随着江苏电网的快速发展, 电网结构进一步加强, 主网输送能力、供电可靠性得到提高, 但仍存在一些电网薄弱环节和运行矛盾, 电网超稳定限额运行现象时有发生。将自动发电控制 (AGC) 与实时安全约束调度结合进行 AGC 安全约束控制<sup>[1]</sup>, 实行稳定断面越限的预防与校正控制, 是电网调度运行行之有效的重要技术措施。当稳定断面重载时, 根据该断面有功功率相对于机组有功出力的灵敏度系数, 对机组出力的调节方向加以限制, 防止由于 AGC 的正常调节导致重载程度的进一步加剧 (简称预防控制); 当稳定断面越限时, 由安全约束调度提供校正控制策略, 并在 AGC 控制下执行, 自动解除或缓解稳定断面的越限 (简称校正控制)。通过这样的双重保护措施, 有效地保证了电力系统的安全稳定运行。

## 1 限制机组调节方向的预防控制

当系统处于预警状态, 即系统中没有出现越限, 但存在至少一条重载的稳定断面时, 利用考虑发电机组调频特性的灵敏度计算方法<sup>[2]</sup>, 通过对某些 AGC 机组的出力调节方向加以限制, 以禁止这些机组增加或减少出力, 可以有效地解决预防控制的问题。

常规灵敏度计算方法将功率调节引起的不平衡量完全由虚设的平衡机来承担, 因此其计算与参考节点的选取有关, 而在实际系统中, 当出现一个功率缺额时, 所有机组调速器将会动作增加或减少发

电功率。设支路总数为  $N_l$ , 系统母线数目为  $n$ , 常规灵敏度方法中支路有功灵敏度为  $S \in \mathbf{R}^{N_l \times (n-1)}$ ,

母线功率注入的分担系数矢量为  $\alpha \in \mathbf{R}^n$ 。 $\alpha_i$  为连接在母线  $i$  上的机组频率特效系数之和除以系统中所有机组的频率特效系数之和 (停运机组除外)。若在第  $i$  个母线上增加一个单位的注入功率, 则在该扰动作用下, 电力系统经过一段过渡过程后将达到一个新的平衡状态。在该状态下, 由于系统频率的变化, 真正作用在电力系统上的母线注入功率增量则为:  $[-\alpha_1 \quad \Lambda \quad 1-\alpha_i \quad \Lambda \quad -\alpha_n]^T$ , 在常规方法中增加一列参考节点的灵敏度, 即可得到考虑发电机调频特性时母线  $i$  的有功注入对支路  $l$  的有功功率的灵敏度, 计算公式如下:

$$S_{li}^M = S_{li} - \sum_{j=1}^n \alpha_j S_{lj} \quad (1)$$

式中,  $S_{li}$ 、 $S_{lj}$  是常规灵敏度矩阵  $[S]$  中的元素。灵敏度  $S_{li}^M$  与参考节点的选取无关, 具有明确的物理意义。

对于由  $N_b$  条支路组成的稳定断面  $T$  (可记作:  $T = \{P_1, P_2, \Lambda, P_{N_b}\}$ ), 其潮流等于其所有支路有方

向的潮流之和, 即  $P_T = \sum_{k=1}^{N_b} \text{sign}(b_k^p) P_k$ , 稳定断面

T对系统中任一节点i的有功功率灵敏度为:

$$\frac{\partial P_T}{\partial P_i} \approx \frac{\Delta P_T}{\Delta P_i} = \sum_{l=1}^{N_b} \text{sign}(b_l^p) S_{li}^M \quad (2)$$

式中,  $\text{sign}(b_k^p)$  的取值 1 或 -1, 当支路 k 的方向与稳定断面方向一致时取 1, 当支路 k 的方向与稳定断面方向相反时取 -1。

当系统存在重载的稳定断面时, 实时安全约束调度将受控机组对所有受控重载稳定断面的最大灵敏度与最小灵敏度系数送 AGC。AGC 在分配机组出力时, 根据各个机组灵敏度系数以及设置的灵敏度门槛值对机组的调节方向进行限制。由于灵敏度门槛值取值越小, 预防控制的效果越好, 而对 AGC 正常控制功能的影响越大。为了在预防控制的同时, 尽可能小地影响 AGC 的正常调节, 可以在不同的 AGC 控制区域设置不同的灵敏度门槛值, 四个 AGC 控制区域 (死区、正常调节区, 次紧急调节区、紧急调节区) 的灵敏度门槛值取值可依次增大, 则在区域控制偏差 ACE 较大时, 预防控制对 ACE 调整的影响就越小。

对于某一个 AGC 控制区域, AGC 机组被分为四类:

A 类, 机组不能增加出力: 机组的最大灵敏度系数为正且绝对值大于 AGC 控制区域灵敏度门槛值。

B 类, 机组不能减少出力: 机组的最小灵敏度系数为负且绝对值大于 AGC 控制区域灵敏度门槛值。

C 类, 机组既不能增加出力又不能减小出力: 机组的最大灵敏度系数为正且绝对值大于 AGC 控制区域灵敏度门槛值, 同时机组的最小灵敏度系数为负且绝对值大于 AGC 控制区域灵敏度门槛值。一般出现两个或两个以上“敌对”或矛盾约束的稳定断面重载时才有可能出现这种情况。

D 类, 机组出力不受限制: 机组的最大灵敏度系数和最小灵敏度系数的绝对值均小于 AGC 控制区域灵敏度门槛值。

## 2 调整机组 AGC 调节上下限的校正控制

当系统处于紧急状态, 即系统中存在至少一条

越限的稳定断面时, 启动实时安全约束调度, 控制变量为当前 AGC 可控机组有功出力, 调整结果提交 AGC 执行。为了尽可能减少对 AGC 正常控制功能的影响, 将调整目标作为 AGC 机组调节限值。增加出力的机组, 调整目标作为 AGC 机组调节下限; 减少出力的机组, 调整目标作为 AGC 机组调节上限。这样, AGC 将选择适当的时机 (避免在区域控制偏差较大时进一步加大 ACE), 将实际出力处于调节范围之外的机组拉回到调节范围之内, 从而自动完成解除稳定断面越限的调整。

用于在线控制的安全约束调度对稳定断面越限的校正采用基于灵敏度的反向等量配对法与原一对偶内点算法 (非线性规划) 结合的混合算法<sup>[3, 4]</sup>。首先将机组的灵敏度、上网电价按从小到大的顺序排序, 上调节容量、上调节速度按从大到小的顺序排序。在进行标么化处理后, 得到机组j的综合上调

节排序指标  $I_j$ :  $I_j = \sum_{m=1}^4 (k_m * \alpha_{mM_{jm}}) / \sum_{m=1}^4 k_m$ , 其

中,  $k_m$  ( $m=1, 2, 3, 4$ ) 分别为给定的灵敏度、

上网电价、调节容量、调节速度的权系数,  $M_{jm}$  为机组j在队列m中的排序号。

上调节机组和下调节机组都按照相应的综合排序指标由大到小进行排序, 每次选择两个排序中指标最大的机组进行配对计算, 在上调节中被选择过的机组在下调节中不再被选择, 反之亦然。如此下去, 直到没有可供选择的机组或配对机组的灵敏度之差小于给定的门槛值 (如 0.2), 结束配对过程,

从而得到最大可校正量  $\Delta P_{Ts}$ 。设某一越限断面当前

值为  $P_T$ , 上限为  $P_{Tmax}$ , 则实际越限量为:

$$\Delta P_T = P_T - P_{Tmax} \quad (3)$$

考虑到灵敏度分析的误差  $\varepsilon$  (如 10%), 为了保证灵敏度分析方法的可靠性, 将实际越限量放大到  $\Delta P_T (1 + \varepsilon)$ 。也就是说, 当  $\Delta P_{Ts} > \Delta P_T (1 + \varepsilon)$  时, 方可认为该断面越限是可以消除的, 在优化计算中直接将实际的限值  $P_{Tmax}$  作为断面的上限约束。否则,

将限值放松为:

$$P_{T\max}' = P_T - (1 - \varepsilon)\Delta P_{Ts} \quad (4)$$

对于紧急状态,安全约束调度根据越限的受控稳定断面是否被校正及校正程度给出多种校正结果:

a) 校正越限成功:受控稳定断面能被校正至限额之内。安全约束调度将对某些机组给出调节量以校正受控稳定断面的越限,并提供可控机组对受控越限和重载稳定断面的最大及最小灵敏度系数;

b) 校正部分越限成功:某些受控稳定断面可被校正至限额之内,但还有一些受控稳定断面无法校正;或某些受控稳定断面可被部分校正,可能还有一些受控稳定断面无法校正。安全约束调度将对某些机组给出调节量以部分校正受控稳定断面的越限,并提供可控机组对受控越限和重载稳定断面的最大及最小灵敏度系数

c) 放松全部越限:受控稳定断面的越限量很小或能被校正的越限很小,安全约束调度认为这次校正没有意义,因此不做校正。安全约束调度将提供可控机组对受控越限和重载稳定断面的最大及最小灵敏度系数

d) 越限无法校正:所有越限的受控稳定断面均不能校正,安全约束调度可能无解。安全约束调度也将提供可控机组对受控越限和重载稳定断面的最大及最小灵敏度系数,但这些结果可能不正确,不能用于控制。

AGC 执行安全约束调度机组控制策略的方式有两种:

(1) 对于有调节量的机组,AGC 将结合机组的灵敏度系数和调节量来决定调节量是否起作用,如起作用则修改机组实际调节的上下限。

实时安全约束调度在进行校正控制时,总负荷保持不变是约束条件之一,安全约束调度在计算中为了保持发用电平衡,通过灵敏度配对和优化计算,一些对稳定断面潮流影响较小的机组也可能被赋予了调节量。为了减小对 AGC 正常调节的影响,AGC 对于有调节量的机组,再根据其灵敏度系数判断其对断面潮流控制的作用,对于虽有调节量但对断面潮流控制基本没有作用的机组调节量则不予采用,只有灵敏度系数达到调节量灵敏度门槛值(一个调度员可修改的控制参数)的机组调节量才起作用。

如:机组调节量为正值,且机组的最小灵敏度系数绝对值大于调节量灵敏度门槛值,则将机组实际出力与调节量之和作为机组的调节下限;反之,当调节量为负值,且机组的最大灵敏度系数绝对值大于调节量灵敏度门槛值则将机组实际出力与调节量之和作为机组的调节上限。

(2) 对于没有调节量而只有灵敏度系数的机组,则根据机组最大最小灵敏度系数限制部分机组的调节方向,方法同上一小节对 A、B、C、D 机组的分类。

### 3 运行实例

江苏电网于 2005 年 6 月起实施 AGC 安全约束控制,在调度生产实际运行中发挥重要作用,现以两例加以说明。

(1) 任庄变 T1 主变或任庄变 T2 主变单元件断面重载的预防控制

某日 11:35 时,稳定断面“任庄变 T1 主变或任庄变 T2 主变单元件”因任庄变 T2 主变停,造成任庄变 T1 主变负载率达 92%,超过安全约束调度设定的重载门槛 88%,系统处于预警状态。实时安全约束调度为 AGC 提供如表 1 所示的机组调整策略(节选)。

表 1 任庄变 T1 主变或任庄变 T2 主变单元件断面重载的机组调整策略

机组名称	调节量 /MW	最大灵敏度系数	最小灵敏度系数	机组名称	调节量 /MW	最大灵敏度系数	最小灵敏度系数
徐州二厂#2	0	0.12	0.12	新海#15	0	-0.10	-0.10
垞城#4	0	0.07	0.07	新海#16	0	-0.10	-0.10
垞城#5	0	0.07	0.07	徐塘#4	0	-0.22	-0.22
.....	0	.....	.....	徐厂#7	0	-0.26	-0.26
				徐厂#8	0	-0.26	-0.26

设对应于死区、正常调节区,次紧急调节区和紧急调节区四个 AGC 控制区域的灵敏度门槛值分别为: 0.15、0.15、0.28、0.35,则除了紧急调节区外,徐塘#4 机组、徐厂#7 机组、徐厂#8 机组在 AGC 系统中被设置为禁止下调机组,当时三台机组出力分别为 227MW、157MW、155MW。在 AGC 的调节控制下,三台机组出力调节方向受到限制,使任庄变 T1 主变重载程度下降直至消失。此时正值中午下班高峰,电网负荷在急剧下降阶段。通过调度员潮流软件进行模拟分析计算,如该三台机组出力分别下降到机组 AGC 调节下限: 150MW、130MW、

130MW, 则任庄变 T1 主变负载率将达到 96.5%, 重载程度明显加重。而利用 AGC 进行安全约束控制, 任庄变 T1 主变的负载率得到有效控制。

(2) 斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件断面越限的校正控制

某日 1:55 时, 稳定断面“斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件”负载越稳定限额 30MW, 此时实时安全约束调度报系统处于紧急状态、校正情况为校正越限成功。实时安全约束调度为 AGC 提供如表 2 所示的机组调整策略(节选)。

表 2 斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件断面越限的机组调整策略

机组名称	调节量 /MW	机组对断面 灵敏度	机组名称	调节量 /MW	机组对断面 灵敏度
利港#2	17	-0.38	彭城#2	0	0.03
利港#3	26.28	-0.38	扬二厂#1	-17.07	0.04
利港#4	26.31	-0.38	扬二厂#2	-17.46	0.04
利港二厂 #5	0	-0.023	扬二厂#3	-17.59	0.04
华苏#1	0	-0.023	扬二厂#4	-15.35	0.04
.....	0	.....	镇厂#3	-1.67	0.04
			盐厂#10	-1.94	0.05

由调度运行人员设置的调节量灵敏度门槛值为 0.12。从表 2 可以看出, 扬二厂#1-#4 机组、镇厂#3 机组、盐厂#10 机组对“斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件”断面的灵敏度系数绝对值均小于 0.12, 这表明他们的出力调整对稳定断面“斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件”的影响非常小, 它们的调节量是安全约束调度为了发用电平衡而产生, 在 AGC 控制中它们的调节量不予采用。而利港#2-#4 机组由于对稳定断面“斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件”的灵敏度绝对值较大, 其出力调整将对该断面潮流影响较大, 因此, 将这三台机组的当前出力加上其调节量作为这些机组的 AGC 调节下限进行 AGC 控制。15min 后, 稳定断面“斗山变 T1 主变, 斗山变 T2 主变双元件”的越限被解除。

## 4 结束语

安全约束调度可以为电网的不安全状态提出解决方案。将 AGC 与实时安全约束调度结合进行 AGC 安全约束控制, 当系统处于预警状态时, 根据实时安全约束调度提供的可控机组对重载稳定断面的灵敏度信息, AGC 通过限制某些机组的调节方向, 执行预防控制; 当系统处于紧急状态时, 根据实时安全约束调度提供的机组调整策略以及可控机组对越限稳定断面的灵敏度信息, AGC 通过限制某些机组的 AGC 调节上下限, 执行校正控制。实践证明, AGC 安全约束控制有效地消除和缓解了电网稳定断面的越限, 保证了电力系统的安全稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统(EMS): 第十一章 网络安全分析软件[M]. 科学出版社, 1998. 271-280.
- [2] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12).
- [3] 邓佑满, 黎辉, 张伯明, 等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999.23(18).
- [4] 刘盛松, 钱玉妹, 徐田, 等. 基于最优潮流与反向等量配对法考虑电网安全约束的 AGC 研究[A]. 第二十九届中国电网调度运行会论文集[C]. 2005.

### 作者简介:

钱玉妹(1963—), 女, 高级工程师, 从事电力调度自动化工作;

朱海兵(1978—), 男, 工程师, 从事电力调度自动化工作;

徐田(1974—), 女, 高级工程师, 从事电力调度自动化工作。