

华东电网动态ACE系统作用机理分析

华东电网目前已有两条特高压交流输电工程，同时作为3条±800 kV特高压直流的落点。大功率的缺失势必对电网频率造成重大冲击，因此，对华东电网的频率控制能力提出更高的要求。动态ACE系统作为华东电网防御频率扰动的重要自动化手段，对于系统事故下的频率恢复发挥重要作用。阐述了在各种频率扰动下动态ACE系统作用于省市AGC调出备用的机理，并用频率扰动实例予以说明。最后介绍了动态ACE系统仍存在的不足之处。

徐 昊 周 毅/国家电网华东电力调控分中心

0 引言

华东电网作为世界上负荷最大的区域交直流混联系统，频率控制技术始终是调度运行人员研究的重要课题。华东电网目前已有两条特高压交流输电工程，同时作为3条±800 kV特高压直流的落点，电网发生大功率缺失的概率和影响都不可同日而语，这为华东电网的频率控制带来新的挑战。

华东电网动态区域控制偏差（ACE）系统对于大扰动下频率的快速恢复发挥着不可替代的作用。文献[1]介绍了动态ACE的诞生背景、计算方法和物理意义。本文基于省市自动发电控制（AGC）的CPS控制性能标准^[2-4]，进一步阐述了动态ACE作用于省市AGC调出备用的机理，并介绍了动态ACE仍然存在的不足之处。

1 省市AGC控制策略

华东区域省市AGC采用CPS控制性能标准^[5]，即 $CPS_1 \geq 100\%$ ， $CPS_2 \geq 90\%$ 。CPS₁和ACE的计算式为

$$CPS_1 = \left(2 - \frac{ACE \Delta f}{K \varepsilon^2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$ACE = \Delta P + K \Delta f \quad (2)$$

式中，ACE为区域控制偏差； $\Delta f = f_t - f_0$ ， f_t 为系统实际频率， f_0 为系统额定频率50 Hz； $\Delta P = P_t - P_0$ ， P_t 为省市实际受电口子值，即省际联络线潮流+该省市内上级调度所辖机组出力+该省市内直流落点功率， P_0 为省市计划受电口子值，符号采用受进为负，送出为正；K为静态频率响应系数； ε 为电网频率均方根控制目标值。

当省市 $CPS_1 \geq 200\%$ 时，省市AGC可免于CPS₂考核；当ACE与 Δf 符号相反时， $CPS_1 \geq 200\%$ 。CPS₁的控制性能坐标如图1所示。

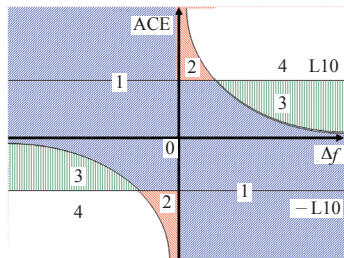


图1 CPS₁控制性能坐标

由图1可知，当省市AGC控制性能落到图中区域1时，可免于CPS₂考核。因而，简单地说，省市AGC的控制策略就是尽量控制ACE与 Δf 符号相反。

2 直流大功率闭锁后动态ACE作用机理分析

2.1 过程分析法

以下分析简称直流落点，所在省市为故障省市。由前文口子概念易知，直



徐 昊/工程师

关键词/Keywords

ACE ·
AGC ·
频率控制 ·
CPS ·

流大功率闭锁瞬间, 由于受电功率的缺失, 故障省市 ΔP 立即向正方向移动, 即少用, ACE朝大于0方向移动。而非故障省市潮流将向故障省市流动, 将全网频率拉成一致, 那么非故障省市 ΔP 也将向正方向移动, 即ACE朝大于0方向移动。由于 $\Delta f < 0$, 所以故障省市、非故障省市ACE的符号均具有不确定性, 需分情况进行分析。

(1) 故障省市、非故障省市 $ACE > 0$

由于故障省市、非故障省市ACE均大于0, 故障省市、非故障省市都将减小出力, 使ACE趋于0调节, 频率将继续跌落, 直到到达某个平衡态, 各省市ACE均接近于0, 且系统频率低于50 Hz。

(2) 故障省市 $ACE > 0$, 非故障省市 $ACE < 0$

故障省市将减出力、非故障省市将调出备用, 使ACE趋于0调节, 最终达到某频率低于50 Hz的平衡态。

(3) 故障省市 $ACE < 0$, 非故障省市 $ACE > 0$

故障省市将调出备用, 非故障省市将减小出力, 使ACE趋于0调节, 最终达到某频率低于50 Hz的平衡态。

(4) 故障省市 $ACE < 0$, 非故障省市 $ACE < 0$

故障省市与非故障省市均会调出备用, 由于有 ΔP 存在, 所以各省市调出的备用不会将缺失的功率全部恢复, 而只是恢复到ACE为0的状态, 即仍然是频率低于50 Hz的状态。

2.2 方程分析法

按照华东电网现有的AGC控制体系, 将所有的区外直流和网调所管辖机组作为省市的受电通道, 若将各个省市作为一个整体, 那么将没有省际联络线的概念, 受电就是区外直流和网调所辖机组。各个省市的ACE公式为

$$\begin{cases} ACE_1 = \Delta P_1 + K_1 \Delta f_1 \\ \vdots \\ ACE_5 = \Delta P_5 + K_5 \Delta f_5 \end{cases} \quad (3)$$

由各省市的ACE公式相加易得全网的ACE公式为

$$ACE_{\text{全网}} = \Delta P_{\text{全网}} + K_{\text{全网}} \Delta f \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} ACE_{\text{全网}} &= \sum_{i=1}^5 ACE_i \\ \Delta P_{\text{全网}} &= \sum_{i=1}^5 \Delta P_i \\ K_{\text{全网}} &= \sum_{i=1}^5 K_i \end{aligned} \quad (5)$$

由于华东电网为一交流同步电网, 所以各个省市频率一致, 因此

$$\Delta f = \Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f_3 = \Delta f_4 = \Delta f_5 \quad (6)$$

由于区外直流大功率缺失, 那么全网的受电必然是减小的, 即 $\Delta P_{\text{全网}} > 0$, 而频率低于50 Hz, $\Delta f < 0$, 因此省市整体的 $ACE_{\text{全网}}$ 的符号和数值具有不确定性, 与全网的静态频率响应系数 $K_{\text{全网}}$ 密切相关。

当 $ACE_{\text{全网}} > 0$, 即 $K_{\text{全网}} < -(\Delta P_{\text{全网}}/\Delta f)$ 时, 全网不会自动调出备用, 反而可能会减小出力, 且 $K_{\text{全网}}$ 越小, 减小的出力会越多, 在不考虑一次调频的作用下, 会使频率进一步跌落。极端情况下, 假设 $K_{\text{全网}} = 0$, 即全网AGC为定联络线功率控制的FTC模式, 对于频率的恢复情况最为不利。

当 $K_{\text{全网}} > -(\Delta P_{\text{全网}}/\Delta f)$ 时, 全网会自动调出备用, 且 $K_{\text{全网}}$ 越大, 调出的备用会越多。事实上, $K_{\text{全网}}$ 越大, 全网AGC控制模式越趋向于定频率控制的FFC模式, 对于频率的恢复最有利。但此种情况下, 即使系统会自动调出备用, 也不会将区外损失的功率 $\Delta P_{\text{全网}}$ 全部补足。因为全网受电减少 $\Delta P_{\text{全网}}$, 只有将 $\Delta P_{\text{全网}}$ 的备用全部调出, 才能使频率完全恢复, 但由于全网AGC只是调节到 $ACE_{\text{全网}}$ 趋近于0为止, 因此只会调出 $|\Delta P_{\text{全网}} + K_{\text{全网}} \Delta f|$ 的备用。而由于 $\Delta P_{\text{全网}}$ 与 Δf 符号相反, 因此 $|\Delta P_{\text{全网}} + K_{\text{全网}} \Delta f| < \Delta P_{\text{全网}}$, 那么全网调出的备用不足以使频率完全恢复。

综上所述, 在直流大功率闭锁后, 各个省市AGC不会自动将备用调出, 也不会将直流闭锁损失功率补足, 从而使系统频率恢复, 由此可见, ACE不是守恒的。华东电网动态ACE系统的作用就是系统发生直流大功率闭锁而达到动态ACE动作的阈值后, 自动向省市下发分摊功率, 并将备用调出, 促使系统频率恢复。

动态ACE的本意是当直流闭锁造成大功率缺失时自动修改省市的受电计划值，从而调出省市备用。但实际上，自动进行计划调整需要跨越实时计划编制和EMS两个系统，很难实现。因此，动态ACE采用自动修改省市的实际受电值，即将下发的分摊功率自动叠加到省市的实际受电口子上，造成受电值增大，即 ΔP 、ACE向小于0的方向移动，从而使各省市调出备用，加速频率恢复。

网调管辖机组跳闸的情况与直流闭锁类似，在此不再赘述。

3 省市内大机组跳闸后ACE动态过程分析

3.1 过程分析法

当某一省市大机组跳闸后，系统频率降低 $\Delta f < 0$ ，故障省市将超用电， $\Delta P < 0$ ， $ACE < 0$ ，故障省市AGC将在ACE作用下调出备用，并使ACE趋于0调节。由于全网频率统一，潮流将向故障省市流动，非故障省市口子将少用，即 ΔP 朝大于0方向移动，因而非故障省市需分3种情况进行分析：ACE值可能大于零；可能小于零；不确定。

(1) 非故障省市ACE > 0

非故障省市将减小出力，增加受电，使 $|\Delta P|$ 减小， $|\Delta f|$ 增大，同时使ACE趋近于0。故障省市 $|\Delta P|$ 增大，则 $|\Delta f|$ 增大，ACE增大，促进故障省市进一步调出备用。随着故障省市备用的调出，频率的逐步恢复， $|\Delta f|$ 逐渐减小，为使ACE趋于0，非故障省市将继续减小出力，直至故障省市将跳闸机组造成的功率缺额部分备用全部调出，频率的恢复过程结束。最终功率缺额全部由故障省市承担。

(2) 非故障省市ACE < 0

非故障省市将增加出力，减少受电，使 ΔP 朝大于0方向移动， $|\Delta f|$ 减小，使ACE趋于0调节。与此同时，故障省市调出备用，使 $|\Delta P|$ 减小， $|\Delta f|$ 减小，且使ACE趋于0。而随着频率的逐步恢复，非故障省市将达到 $\Delta P > 0$ 、 $\Delta f < 0$ 的平衡态，即ACE接近于零，这时非故障省市将不再调出备用。而此时，故障省市仍然是 $\Delta P < 0$ ， $\Delta f < 0$ ，即 $ACE < 0$ ，故障省市将继续调出备用。随着故障省市的备用调

出和频率的继续恢复，非故障省市为控制ACE趋近于0，将减小出力，使 $|\Delta P|$ 减小，直至故障省市将跳闸机组造成的功率缺额部分备用全部调出。

(3) 非故障省市ACE接近于0

非故障省市将维持当前出力不变，随着故障省市备用的调出以及频率的恢复，非故障省市将减小出力以控制ACE趋近于零，直至故障省市将跳闸机组造成的功率缺额部分备用全部调出。

3.2 方程分析法

由式(3)可知，由于省市AGC调节的目的是为了使ACE趋近于0， Δf 也趋近于0，那么在各省市计划受电口子均未发生改变的情况下，也必然使各省市 $|\Delta P|$ 趋近于0，因此机组跳闸造成的功率损失必然由故障省市来承担。

综上所述，如发生省市内大机组跳闸，如果故障省市备用充足，系统会自动调出备用进行恢复频率。但若故障省市备用不足，从上述分析过程易知，系统将恢复至低于50 Hz的某一频率。为避免这种情况发生，动态ACE系统允许故障省市提出备用支援申请，经网调调度员同意，动态ACE动作后将向其他省市下发分摊功率，共同承担机组跳闸后造成的功率损失部分备用调出。

4 实例分析

本实例为某直流在一极停运的情况下发生单极闭锁导致动态ACE动作。损失功率150万kW，频率最低值到49.922 Hz，故障时间为18:06:05，故障前系统负荷为12 967万kW。故障前后系统频率曲线、各省市ACE曲线如图2、图3所示。

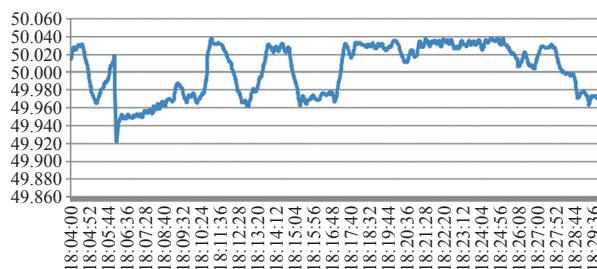


图2 系统频率曲线

从图3可以看出，省市B基本保持ACE超发状态，对系统频率恢复起到很好的推动作用；省市A

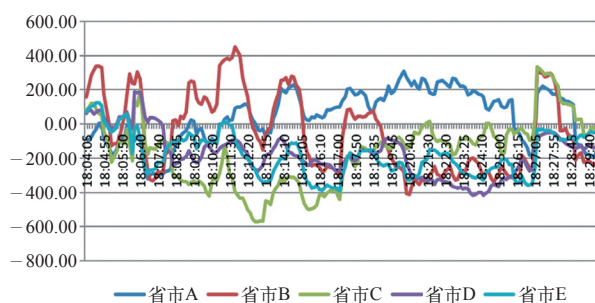


图3 省市ACE曲线

基本处于超用和超发的平衡状态，对频率恢复起到了一定的作用；省市C、省市D、省市E的ACE值基本处于超用状态，没能在系统频率恢复期间按照分摊功率很好地调出备用。

另外省市B的计划口子值在18:15后开始减小，这是因为调度员修改了18:30之后的故障直流计划，并在18:15~18:30系统进行线性差值所致，由于故障直流的计划成分全部分配给省市B，因而只有其计划受电口子值发生了改变。

从图3可以看出，在故障时刻18:06:05，只有省市B的ACE值在向正方向运动，其余省市的ACE值均向负方向运动，这是因为故障直流的功率落地点在省市B，因而在直流故障瞬时，最直接的影响就是省市B的受电口子骤减，ACE上升，其余省市受频率跌落影响，ACE下降。而在故障后的几秒内，省市B的ACE呈衰减趋势，其余省市的ACE呈上升趋势，这是由于为将全网频率拉成一致，受潮流重新分配所致，即省市A、省市C、省市D和省市E的受电减小，省市B的受电增加。

在18:06:55时，动态ACE动作，系统向省市下发分摊功率。此时，各省市的实际受电口子均有所增加，这是因为动态ACE动作后，为了让省市调出备用，而将下发的分摊功率叠加到省市实际的受电口子中，从而使ACE朝超用的趋势变化，各省市为免于CPS考核，将在AGC作用下调出备用。这种将动态ACE下发分摊功率叠加到省市实际受电口子的方法效果等同于减少各省市的计划受电口子。

5 结束语

华东现有动态ACE系统中，一般设置直代管

机组跳闸不起动动态ACE，直流或省市大机组故障导致动态ACE动作时，直代管机组亦不参与功率分摊。在华东AGC控制体系中，直代管皖电机组主要是采用跟计划并调节直流多送功率的模式，以防止系统频率长期偏高。但由于皖电机组容量较少，当直流故障导致大功率缺失时，皖电机组没有能力调平功率缺口，常常导致AGC挂起。由此可见，问题的关键在于华东直代管机组现有的装机容量很难将直流与直代管机组真正融合，因此可以设想，若直代管机组的装机容量足够大，可以调节直流闭锁所缺失的功率，那么动态ACE在一般的频率故障下将不会动作，也无须调度员手动修改计划。

当系统发生多重故障时，可采用缺失功率分摊策略。由于该分摊策略是采用系统现有的备用进行分配，当全网备用不足时，此缺失功率分摊策略将造成“缺失功率-系统备用”的功率缺口，即省市的实际受电值小于计划受电值，这不利于省市备用调出。系统备用不足时的缺失功率分摊策略以及考虑与抽水蓄能紧急支援技术相耦合的动态ACE改进策略有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 周毅，钱学东. 华东电网动态区域控制误差应用分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 106-110.
- [2] 汪德星. 华东电网实行CPS标准的探索[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 41-44.
- [3] 电力系统调频与自动发电控制编委会. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] Jaleel N, Vanslyc L S. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.
- [5] Sasaki T, Enomoto K. Dynamic analysis of generation control performance standards[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 806-811.

(收稿日期: 2017-01-10) **EA**