

# Study on Dynamic Characteristics of HVDC Primary Frequency Regulation

LU Chang, ZHI Yong-jun, LI Shao-hua

(Pingdingshan Power Supply Company, Henan, 467001, China)

LCZZCN@163.com

**Abstract:** Primary frequency regulation is the important means to maintain the frequency stability of power systems. Such as large power network, in case of insufficient reserve capacity of frequency regulation, steady state value of frequency deviation can not satisfy the frequency quality. What's more, sometimes delay of turbo-generator is bigger, the speed of load changing can not be satisfied by primary frequency regulation. So that bigger frequency deviation is produced. In this paper, a case of two areas via a parallel AC-DC links is discussed. Dynamic characteristics are studied on auxiliary primary frequency regulation (APFR) of HVDC. The results show that the speed of primary frequency regulation is increased and dynamic frequency deviation is decreased by APFR.

**Keywords:** power system frequency; HVDC; auxiliary primary frequency regulation; dynamic characteristics

## 关于HVDC辅助一次调频动态特性的研究

陆畅, 智勇军, 李少华

(河南省电力公司平顶山供电公司, 河南, 467001)

LCZZCN@163.com

**摘要:** 一次调频功能对维持电网频率的运行质量和运行安全至关重要。对主要靠火电机组进行一次调频的大负荷中心电网, 在年度负荷高峰时可能出现调频备用容量不足的情况, 导致频率偏差的稳态值超过允许范围; 也可能因火电机组调频固有延迟较大, 较难满足对负荷响应的快速要求, 导致在过渡过程中频率偏差超过允许范围。本文以受端系统调频备用容量可能不足的两区域交直流并联系统为研究对象, 对 HVDC 辅助一次调频的动态特性进行分析; 结果显示, HVDC 辅助一次调频能够有效地提高一次调频的速度、减小动态过程中的频率偏差。

**关键词:** 电力系统频率; 高压直流; 辅助一次调频; 动态特性

### 1 引言

电力系统频率不仅是电力系统运行的重要质量指标, 也是影响电力系统安全稳定运行的重要因素。在我国, 电力系统要求严格按额定频率值 50Hz 运行, 正常时一般允许的最大频率偏差为  $\pm 0.2\text{Hz}$ 。频率调整是电力系统运行的一项重要任务。一次调频能够自动平衡电力系统的第一种负荷分量, 即那些快速的、幅值较小的负荷随机波动<sup>[1]</sup>。

对大负荷中心电网来说, 在年度负荷高峰时, 为了保障供电, 发电机组通常都高负荷运行, 这样调频备用容量就可能出现紧张的情况。上海电网就是这种情况的典型代表。另外, 上海电网负荷变化快而缺乏规律, 冲击负荷大。考虑到上海电网有通过高压直流 (HVDC) 联络线大量受电的背景, 而且 HVDC 输电又具有高度可控、调节迅速和运行灵活等特点, 文献

[2]提出了 HVDC 辅助一次调频——APFR 的概念, 设计了 HVDC 辅助一次调频控制器, 并通过仿真证实了 HVDC 辅助一次调频 APFR 能够有效地减少动态过程中的频率偏差。

在考察汽轮发电机组对周波变化的一次调频响应时, 不仅要看周波变化的幅度, 还要看周波变化的速度, 而这一点用静特性概念不能描述, 所以必须重新从动态角度来考虑问题。目前, 对一次调频动态特性也有一些研究。文献[3, 4]提出了一次调频动态特性的概念和分析几种汽轮机调节系统的一次调频动态特性, 证明了一次调频动态特性概念可以本质、全面地反映汽轮机调节系统的一次调频特性, 而且提出了设计调节系统一次调频动态特性的几点原则。文献[5]定义了电网的一次调频能力 (PFCA), 并由定义结合方差分析得到了电网一次调频能力在静态及动态情况下的数学表达式, 给出了可实际应用的计算方法, 并

讨论了计算过程中的参数误差对结果的影响。

与目前研究汽轮发电机组的一次调频动态特性，以及汽轮机功率对不同变化速度的电网周波偏差信号的响应特性不同，本文主要研究 HVDC 辅助一次调频 APFR 的动态特性。

本文以受端系统调频备用容量可能不足的两区域交直流并联系统为研究对象，首先分析 HVDC 辅助一次调频的动态特性，然后对 HVDC 辅助一次调频的调节效果进行仿真验证。

## 2 HVDC 辅助一次调频的动态特性

研究对象为一个两区域交直流并联系统。研究系统结构简图如图 1 所示，区域 2 通过一回交流以及一回直联联络线向区域 1 送电，受端系统区域 1 的调频备用容量可能不足。引入 APFR 后一次调频系统的模型如图 2 所示。

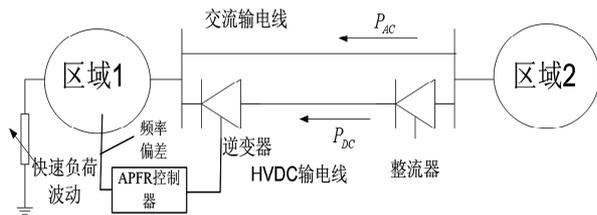
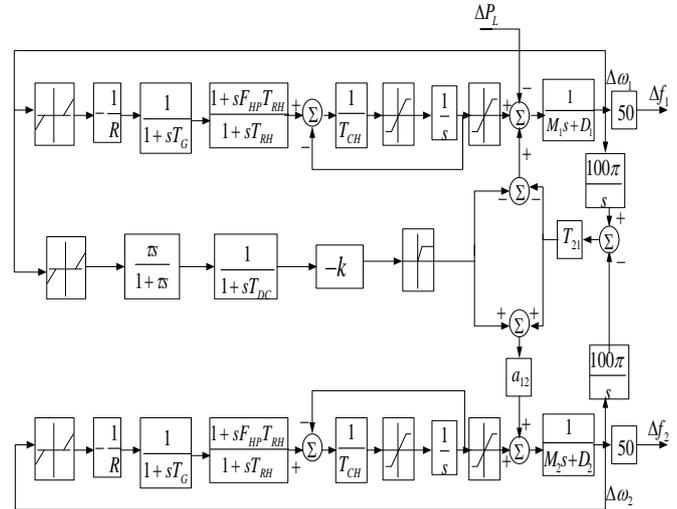


图 1 两区域交直流并联系统  
Figure 1 two areas of AC-DC system

图 2 给出的模型还考虑了调速器和 HVDC 控制回路的非线性特性。其中：(1) 死区 1、死区 2 和死区 3，均取为  $\pm 0.0333$  Hz (或  $\pm 2$  r/min)；(2) 功率限幅 1 和功率限幅 2，均取为  $\pm 0.00333$  p.u；功率限幅 3 上限取为 0.05p.u，下限取为 0。另外还考虑了汽轮机功率变化率的限制，设为  $-\frac{0.1}{60} \leq \frac{d(\Delta P_t)}{dt} \leq \frac{0.1}{60}$  p.u./s。

在考查汽轮发电机组对周波变化的一次调频响应时，不仅要看周波变化的幅度，还要看周波变化的速度（或周波变化的频率）。因此，必须从动态角度来研究一次调频特性。下面对不同运行方式下，受端系统



$R$ —发电机组的调差系数，取为 0.04； $T_G$ —调速器时间常数，取为 0.2s； $T_{CH}$ —主进汽容积和汽室的时间常数，取为 0.3s； $T_{RH}$ —再热器时间常数，取为 0.3s； $F_{HP}$ —高压缸(HP)功率在总功率中所占的份额，取为； $M_1$ 、 $M_2$ —分别为两个区域的等值惯性系数，均为 10.0s； $D_1$ 、 $D_2$ —分别为两个区域的负荷—阻尼常数，均取为 8.0； $a_{12}$ —两个系统的容量比，取为 0.2； $T_{21}$ —同步力矩系数，取为 0.01； $K$ —APFR 控制器的比例系数，取为 12； $T_{DC}$ —惯性时间常数，取为 0.05s； $\tau$ —滤波器的时间常数，取为 79.575s。

图 2 引入 APFR 后一次调频系统的模型

Figure 2 primary frequency regulation system model with APFR and governor

的一次调频动态特性进行分析。

### 2.1 送端系统的调速器不参与一次调频的情况

当送端系统（区域 2）的调速器不参与一次调频时，受端系统（区域 1）的一次调频动态特性曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出，由于 HVDC 辅助一次调频使带宽增大，系统的时域响应速度加快，较高工作频率时增大了系统的增益，提高了一次调频的效果；调速器和 APFR 调节不同频率段的周波变化量，在一次调频时可以优势互补、互相配合使用。

### 2.2 送端系统的调速器参与一次调频的情况

当送端系统（区域 2）的调速器都参与一次调频时，受端系统（区域 1）的一次调频动态特性曲线如图 4 所示。

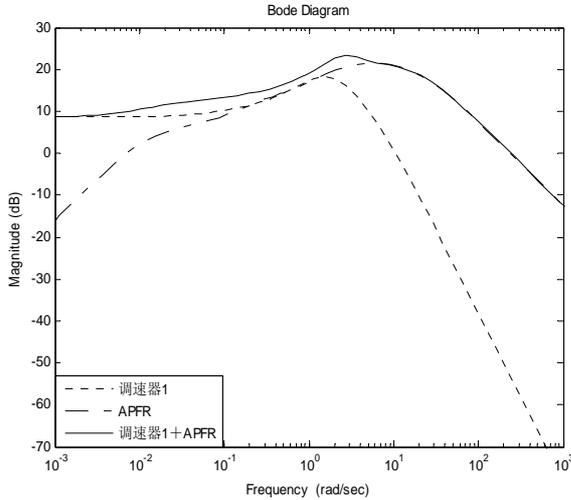


图 3 对区域 1 的一次调频动态特性 (调速器 2 不参与一次调频)  
Figure 3 dynamic characteristics of primary frequency regulation on area 1 (without regulation of governor 2)

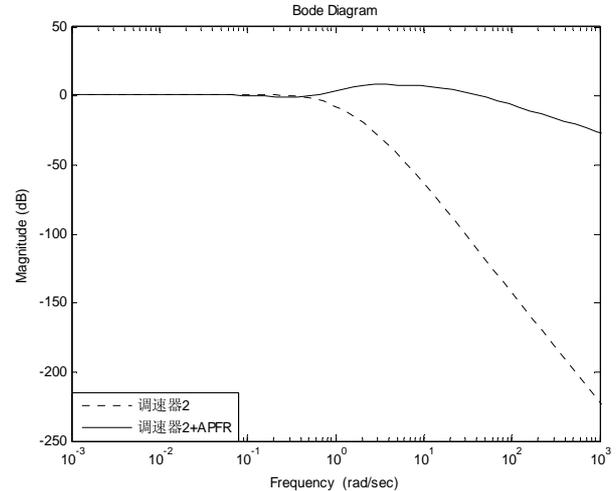


图 5 对区域 1 的一次调频动态特性 (调速器 1 不参与一次调频)  
Figure 5 dynamic characteristics of primary frequency regulation on area 1 (without regulation of governor 1)

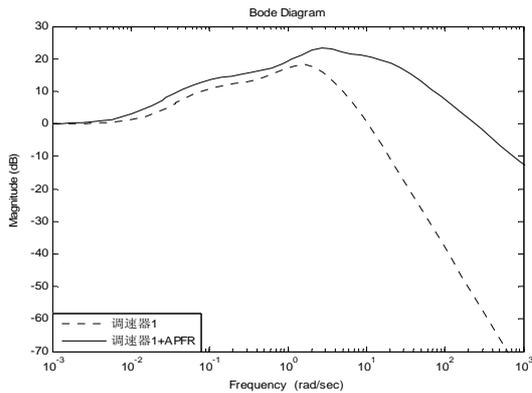


图 4 对区域 1 的一次调频动态特性 (调速器 2 参与一次调频)  
Figure 4 dynamic characteristics of primary frequency regulation on area 1 (with regulation of governor 2)

由图 4 可见,区域 1 的调速器和 HVDC 辅助一次调频 APFR 共同作用对区域 1 的一次调频动态特性曲线的带宽增大,提高了系统时域响应的反应速度,同时增大了较高工作频率段时系统的增益,提高了系统一次调频的效果。

### 2.3 受端系统的调速器不参与一次调频的情况

当受端系统 (区域 1) 的调速器不参与一次调频时,送端系统 (区域 2) 的调速器和 HVDC 辅助一次调频 APFR 对区域 1 的一次调频动态特性曲线如图 5 所示。

由图 5 可见,区域 1 的调速器不参与一次调频时,区域 2 的调速器和 HVDC 辅助一次调频 APFR 对区域 1 的共同作用使一次调频动态特性的曲线增大了带宽,提高了系统时域响应的速度,同时增大了较高工作频率时系统的增益,提高了系统一次调频的效果。

对图 3、图 4 和图 5 进行比较,可知受端系统的调速器不参与一次调频时, HVDC 的辅助一次调频作用能够更明显地提高一次调频的速度,减小频率的偏差。

### 3 几种运行情况下受端系统频率偏差的仿真检验

设区域 1 发生的负荷波动为从 1s 时刻开始发生、幅值 0.08 p. u. 的阶跃形式的快速负荷波动,持续 2s 后再发生一个幅值相同、方向相反的阶跃形式的负荷波动的情况。送端系统的调速器不参与一次调频、送端系统的调速器参与一次调频、受端系统的调速器不参与一次调频三种运行情况下, APFR 引入前后区域 1 频率偏差的仿真结果分别如图 6、图 7 和图 8 所示。

图 6、图 7 和图 8 中的虚线和实线分别表示几种运行情况下, APFR 引入前后区域 1 频率偏差的仿真结果。当区域 1 负荷突然增加时,区域 1 的频率迅速降低,调速器的一次调频作用使频率波动后逐渐趋于稳

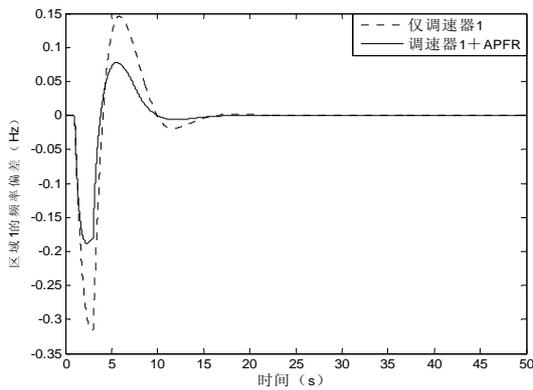


图6 区域1的频率偏差 (调速器2不参与一次调频)

Figure 6 frequency deviation of area 1 (without primary frequency regulation of governor 2)

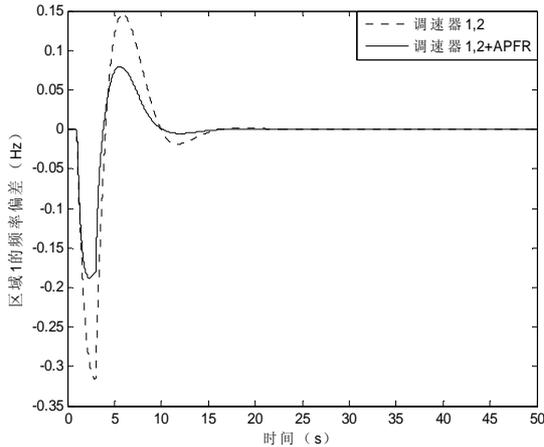


图7 区域1的频率偏差 (调速器2参与一次调频)

Figure 7 frequency deviation of area 1 (with primary frequency regulation of governor 2)

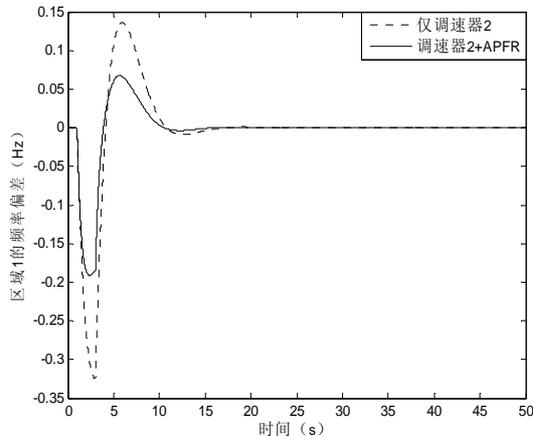


图8 区域1的频率偏差 (调速器1不参与一次调频)

Figure 8 frequency deviation of area 1 (without primary frequency regulation of governor 1)

定。由图可见，当只有调速器进行一次调频时，频率的波动幅度比较大，最大值波动值达到 0.32Hz，超过频率允许的范围。引入 APFR 后，频率达到稳定时的速度更快，动态过程中的频率偏差明显减小，对频率偏差的控制效果得到了改善，频率偏差小于 0.2Hz，满足系统频率的质量要求。

图 6、图 7 和图 8 的仿真结果验证了 HVDC 辅助一次调频提高了系统一次调频动态特性，能够有效地减少动态过程中的频率偏差、提高一次调频的速度的结论。

#### 4 结论

本文针对有 HVDC 辅助一次调频的大负荷中心电网，对几种运行情况下受端系统频率的一次调节动态特性进行分析，结果表明：(1) HVDC 辅助一次调频使系统的一次调频的速度加快；(2) HVDC 辅助一次调频使系统的较高频率段时的增益加大，提高了系统一次调频的调节效果；(3) 受端系统的调速器不参与一次调频时，HVDC 的辅助一次调频作用能够更明显地提高一次调频的速度、减小动态过程中频率的偏差。而且，时域下的仿真验证了上述结论的正确性。所以说，HVDC 辅助一次调频能够有效地解决受端系统调频备用容量短缺问题、提高一次调频的性能。

#### 致谢

在论文完成之际，我要特别感谢我的指导老师智勇军老师的热情关怀和悉心指导。在我撰写论文的过程中，智勇军老师倾注了大量的心血和汗水，无论是在论文的选题、构思和资料的收集方面，还是在论文的研究方法以及成文定稿方面，我都得到了智勇军老师悉心细致的教诲和无私的帮助。智勇军老师严谨求实的治学态度、高度的敬业精神、兢兢业业、孜孜以求的工作作风和大胆创新的进取精神使我终生受益。

#### References (参考文献)

[1] LIU Wei-lie Chief editor. Frequency regulation of power system and automatic generation control. Beijing: Electric Power Press,2006  
刘维烈主编. 电力系统调频与自动发电控制. 北京: 中国电力出版社, 2006 年

[2] LU Chang. Research on auxiliary primary frequency

regulation of HVDC links and its dynamic characteristics. Dissertation for the master's degree of Shanghai Jiao Tong University, Jan, 2007

陆畅. HVDC 辅助一次调频及其动态特性的研究. 上海交通大学硕士学位论文, 2007 年 1 月

- [3] GUO Yu-feng. Dynamic characteristic analyses of frequency regulation process in electric power systems. Dissertation for the doctoral degree in engineering of Harbin Institute of Technology, Jan, 2005

郭钰锋. 电网调频过程的动态特性分析. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2005 年 1 月

- [4] YU Da-ren, MAO Zhi-wei, XU Ji-yu. Dynamic characteristic of primary frequency regulation of turbo-generator. Proceedings of the CSEE. 1996, 16 (4): 221-225

于达仁, 毛志伟, 徐基豫. 汽轮发电机的一次调频动态特性. 中国电机工程学报, 1996, 16 (4): 221-225

- [5] YU Da-ren, GUO Yu-feng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system. Proceedings of the CSEE. 2004, 24(3): 72-76

于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76