

# 功率波动对发电机组影响分析

顾 文，徐 钢，王成亮

(江苏方天电力技术有限公司，江苏 南京 211102)

**摘 要：**接入220kV、500kV等高压等级的发电机组功率易受电网故障或大容量冲击性负荷的影响产生波动。结合机组功率波动实例，阐述如何应用机组DCS系统和电厂PMU装置记录的机组运行参数，综合分析确定引起机组功率波动原因，并探讨了评估功率波动对机组影响的4方面指标。

**关键词：**发电机；负荷波动；分析；影响

## 0 引言

电力系统是由电源、电网和用电负荷组成的动态平衡系统，其中一个环节发生功率波动，就将引发系统的再平衡过程，其中发电机组在电力系统中承担了功率平衡的主要作用。

随着国家“上大压小”政策的实施，接入电网运行的发电机组单机容量越来越大，机组运行状况的任何波动都会引起发电企业的高度关注，当机组功率出现非正常调整下的功率波动后，需要确定引起波动的原因和来源并评估波动对机组的影响。

本文从如何确定引起机组功率波动的来源和负荷波动对机组影响两个方面进行分析，着重分析由电厂外部原因引起的负荷波动及其对机组的影响。

## 1 引起机组功率波动的因素

引起机组功率波动的因素可能来自发电厂内部，也可能来自外部电网。由电厂内部因素引发的功率波动常见的是电厂内部重要设备故障而引起的出力降低，比较少见的为机组控制系统振荡引起的功率波动，大型机组配备完善的监测系统，比较容易判断并找到原因；而来自外部电网的功率波动，需要综合分析才能确定来源和原因。

由电厂外部因素引起的功率波动，可分为两类：由于电网故障暂态过程引起的功率波动和大型冲击性负荷如电弧炉引起的功率波动，前者发生频度较少，后者功率冲击的频度很高且与冲击性负荷的运行高度相关。

### 1.1 由电网故障引起的机组功率波动

目前江苏电网发电机组大多以220kV或500kV电压等级接入电网，高压互联电网的故障暂态过程影响范围大，使得接入高压电网的发电机组也比较频繁地受到影响，如苏北某电厂两台660MW国产超超临界燃煤发电机组通过2回500kV线路接入电网，2012年4月28日至5月20日间出现10多次发电机功率波动，其中2次引起DCS系统将机组由CCS（机组协调控制系统）协调方式切至TF（汽机跟踪）方式，AGC功能退出。

### 1.2 由大型冲击性负荷引起的机组功率波动

江苏电网中存在较多电弧炉、轧钢等大型冲击性负荷，其特征是生产（或运行）过程中周期性或非周期性地从供电网中取用变动功率<sup>[1]</sup>。对发电机影响较大的地区包括南京江北和张家港，地区内钢厂冲击负荷容量大，机组与钢厂的电气距离近。

对波动负荷附近某电厂机组进行的测试和仿真表明<sup>[2]</sup>，在不合理的网络结构和运行方式下，机组一天内承受的3%以上机组额定容量的有功冲击可达数十次至上百次；通过改善电网结构，增大机组与波动负荷的电气距离，可大幅减小机组承受负荷波动的幅值和数量。

### 1.3 由机组外部因素引起的机组功率波动动态过程

当机组感受到功率波动时，将由原来的平衡状态过渡到新的平衡状态，这一动态过程大致分为三个阶段：

（1）在波动的瞬间，电网内各机组按其功角特性曲线初始运行点的斜率（整步功率）的大小分担波动负荷。

（2）当各机组受到负荷的波动后，由于此时原动机出力不变，各机组转子将作加速或减速运动，在整步功率作用下，各机组转子趋向一个共同的平

均加速度,各自按其转子动能大小供出惯性功率。

(3)如频率越过调速系统失灵区后,机组调速器开始动作,企图把转速恢复到原来的数值,在全体原动机调速器的共同作用下最终达到新的平衡。

## 2 机组功率波动来源分析

机组功率波动来源分析需要综合分析来自机组DCS(集散控制系统)和电厂PMU(同步相量测量装置)的记录数据,其中DCS系统主要记录汽机、锅炉、热工相关参数以及部分发电机参数,PMU主要记录发电机和电厂上网侧的参数。电网调度部门如能提供对应的故障信息可以迅速帮助判别功率波动原因。

以1.1所述苏北某电厂发电机功率波动事件为例,分析如何确定机组功率波动来源,这些功率波动事件未能从电网调度部门找到对应的故障信息。

### 2.1 通过DCS检查机侧、炉侧相关参数

通过DCS检查功率波动前后机侧、炉侧相关参数,AGC有无发调负荷指令,高中压等各调门是否发生波动,如果机侧、炉侧参数没有发生变化,可认为机组的机械功率没有发生变化,只是机组电磁功率波动,功率波动可能由外部引起。

### 2.2 检查功率波动过程中机组功率与转速变化情况

转速的变化反映了机组运行过程中机械功率和电磁功率不平衡的情况。当功率波动来自电网时,发电机电磁功率首先变化,机组转速变化滞后于功率变化,调速器动作需要满足转速偏差条件(2~3r)并且存在2~3s的时间延迟,因此通常发电机电磁功率会逐渐震荡衰减,而机组机械功率不变或滞后变化;如果功率波动来自机组本身,转速会超前功率或与功率同步变化。图1中,负荷波动发生瞬间,转速基本不变。

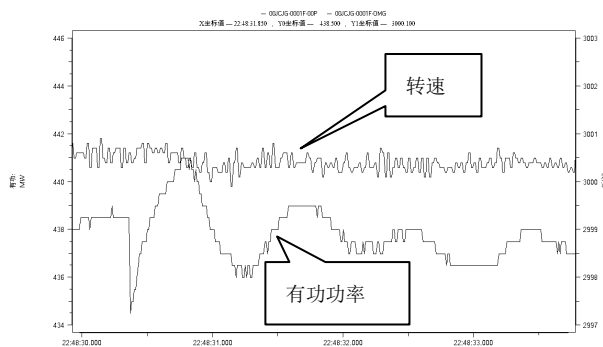


图1 功率波动时发电机功率和转速

### 2.3 检查功率波动时发电机励磁电压和励磁电流的变化情况

图2与图1来自同一机组同一波动事件。来自电网的功率波动通常伴随电压的大幅变化,由于机组励磁系统的快速响应特性,发电机励磁电压和励磁电流将会大幅变化,机端电压、发电机电磁功率会相应波动。

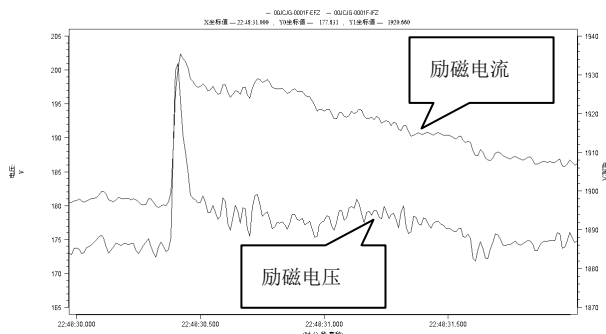


图2 功率波动时发电机励磁电压和励磁电流

### 2.4 功率波动过程中发电机是否出现负序电流

由机组内部汽机、锅炉、热工系统等引起的功率波动应是三相平衡变化的,当功率波动来自电网时,由于电网故障70%以上是不平衡故障,大多数冲击性负荷也是不平衡负荷,多数情况下发电机会出现短时负序电流,可检查功率波动过程中DCS系统和PMU中是否记录到负序电流。

### 2.5 综合分析确定功率波动来源

机组功率波动来源需要综合以上4个方面分析确定,特别是功率波动较大时,机、炉、热、电各个系统的调节和响应会很复杂,这时候需要结合DCS系统和PMU中各个监测参数的动作时序进行分析,由于两个系统相互独立,系统采样频率也存在差异,DCS系统和PMU中各种参数设置是否完整以及时间是否同步对于分析非常重要。

## 3 功率波动对机组影响的评估

对于机组功率波动,电厂管理者关心的另一方面是功率波动对机组的影响。发电机承受有功冲击的限值目前尚没有统一的标准和规定,文献[3]提出发电机组承受有功冲击的电磁功率限值为每秒钟最大变化不超过额定容量的6%;机械功率限值为每分钟最大变化不超过额定容量的4%;文献[4]提出参考国内外有关发电机组对承受冲击负荷能力的有关规定,发电机有功电磁功率每秒钟最大变化小于额定容量的5%,机械功率每分钟最大变化小于额定容量的3%,2篇文献提出的功率限值存在差异,且均未

提到数据来源。

功率波动对发电机的影响可以参考相关标准,从以下几个方面考虑<sup>[5]</sup>:有功和无功功率波动引起的发电机端电压、频率的变化是否会影响发电机的性能;功率波动是否会引起发电机机械功率大幅度变化,影响汽轮机的运行和寿命;有功和无功功率波动引起的机组运行点变化是否会超出机组的出力极限;功率波动造成发电机电磁功率和机械功率的不平衡,在轴上产生扭转应力是否会引起机组的轴系疲劳寿命损耗。

### 3.1 发电机端电压、频率运行限制

根据 GB/T 7064-2008 “隐极同步发电机技术要求”<sup>[6]</sup>,发电机电压和频率的综合变化关系分为 A 和 B 两区(图 3),要求发电机在 A、B 区内能够稳定运行。可见,发电机承受由于功率波动引起的电压和频率变动的能力较大,一般的功率波动不会引起发电机运行点超出区域 B。

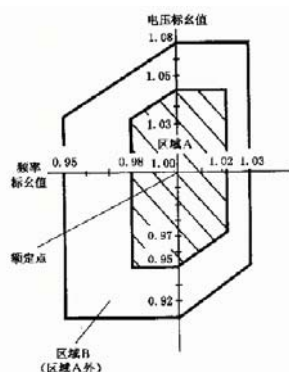


图3 发电机电压和频率的综合变化关系

### 3.2 机组运行点的限制

发电机出力图<sup>[6]</sup>表示由温度或温升或由静态稳定限制的发电机运行极限(X轴有功功率,Y轴无功功率)。

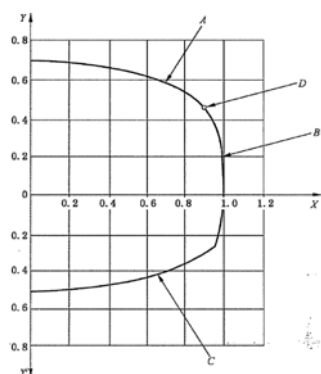


图4 典型出力图

图4是发电机的典型出力图,它的边界由下列因素所限制:曲线A表示在额定励磁电流下运行,

励磁绕组温升接近恒定;曲线B表示在额定定子电流下运行时,定子绕组温升接近恒定;曲线C表示由定子端部局部发热或由静态稳定或两者共同决定的极限;D为额定出力点。

发电机应运行在与所选电压、频率、氢压相应的出力图边界以内,超出边界运行将缩短电机寿命。文献[7]提出应用P-Q图分析冲击负荷对发电机稳态运行的影响,其P-Q图与发电机出力图很相似,是对出力图的细化。

通过对功率波动前后发电机运行点变化的分析,可直观地了解功率波动发生时机组的安全性和安全裕度,因此应用出力图或P-Q图是目前评估功率波动对机组影响比较简单直接的方法。

### 3.3 汽轮机变负荷运行能力限制

在频繁变负荷的过程中,汽轮机转子承受高温蒸汽温度和压力变化引起的交变应力,此应力对转子造成蠕变和低周疲劳损伤。蠕变损伤主要是由离心力载荷和压力载荷产生的稳态应力在高温下长期作用的结果,低周疲劳损伤是由于汽轮机在启停和负荷变化过程中的交变热应力造成。对于金属寿命损耗中影响疲劳损伤指数的主要因素是金属的温度变化率和温度变化幅度,对于同样的金属,温度变化率和温度变化幅度越大,则寿命损耗越大。有功功率变化速率和幅度如超出汽轮机的限制,将引起轴系寿命损失。目前大容量机组变负荷运行能力尚无相关标准,可参考DL/T 609-1996 “300MW级汽轮机运行导则”<sup>[8]</sup>中变负荷运行要求:300MW级汽轮机定压运行方式正常情况下的负荷变化速度应限定为额定负荷的1-2%/min,变压运行时的负荷变化速度应以锅炉适应能力而定,一般为额定负荷的2-3%/min。

可见,如功率波动引起机组功率调节系统调整机组出力,汽轮机变负荷运行能力对机组功率调整的限制较严格。

### 3.4 功率波动对机组的轴系疲劳寿命影响

气隙转矩将发电机的轴系和电网紧密的联系在一起,因此,电网中的操作、故障或负荷波动所形成的突变力矩均将作用于发电机的轴系,形成程度不同的冲击,引起轴系扭转振荡,产生疲劳寿命损耗,由于疲劳寿命损耗是累计的,因此频率很高的轻微扰动和概率虽低但较严重的扰动均将引起轴系的寿命损失。

大容量发电机轴系本身就很复杂,再加上材

料、加工工艺、承担负荷类型和过程等差别很大,对波动负荷引起的轴系疲劳寿命损耗的评估国内外尚未形成比较准确的定量分析方法,文献[9]建议在难以得到准确可靠的轴系扭振疲劳数据情况下,采用电磁功率偏差不超过0.1 p.u.作为简化的实用判据。

#### 4 结束语

引起发电机组功率波动的因素可来自电厂内部或外部,通过对机组DCS系统和电厂PMU装置所记录参数的综合分析,结合电网调度部门的故障信息反馈,可判定引起机组功率波动的来源和原因。

功率波动对机组的影响可考虑功率波动是否引起机组运行点超过发电机端电压和频率运行限制、汽轮机变负荷运行能力限制和机组出力运行点限制;对机组的轴系疲劳寿命影响可采用电磁功率偏差不超过0.1 p.u.作为简化的实用判据。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 12326-2008,电能质量 电压波动和闪变[S].
- [2] 顾文,王红星,袁晓冬. 冲击性负荷对发电机影响的实测和仿真分析[A]. 第四届电能质量(国际)研讨会论文集[C].全国电压电流等级和频率标准化技术委员会,2008.
- [3] 武中.特大型冲击负荷对电力系统影响分析[A].第二届电

能质量及柔性输电技术研讨会论文集[C].

- [4] 刘树勇.电弧炉引起的有功冲击对电网的影响分析[A].天津市电力学会 2006 年学术年会[C]. 2006.
- [5] 江苏省电力试验研究院有限公司.大型冲击性负载对江苏电网影响的研究技术报告[R]. 江苏省电力试验研究院有限公司,2006.
- [6] GB/T 7064-2008,隐极同步发电机技术要求[S].
- [7] 顾丹珍,艾芊,陈陈,等.应用 P-Q 图分析冲击负荷对发电机稳态运行的影响[A]. 2006 年中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会[C].
- [8] DL/T 609-1996,300MW 级汽轮机运行导则[S].
- [9] 岑海凤,王西田,刘丽霞,等.大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的评估[J].中国电力,2010,43 (1): 10-14.

#### 作者简介:

顾 文(1969-)男,江苏南京人,高级工程师,从事电厂电能质量技术监督工作;

徐 钢(1967-)男,江苏扬州人,高级工程师,从事电厂继电保护技术监督工作;

王成亮(1981-)男,山西人,高级工程师,从事电厂发电机技术监督工作。