

# 电气制动系统在水电机组上应用的改进

姜方红 金林正

(乌溪江水电厂, 浙江 衢州 32005)

**摘要:** 介绍了电气制动系统的工作原理和实现方式, 为保证电气制动系统的可靠性, 从控制器控制软件以及控制回路上采取了多种措施, 实现了可靠的电气制动, 满足了无人值班运行及系统调峰的要求。

**关键词:** 电气制动 应用 可靠性

乌溪江水电厂扩建的 1 台 100 MW 水轮发电机组按无人值班 (少人值守) 的原则设计, 是目前华东电网单机容量最大的常规水电机组, 承担着电网的调峰调频任务, 机组启停十分频繁, 平均每天开机十余次。电气制动系统由哈尔滨电力自动化技术研究所生产, 与机组同步于 1995 年 11 月投入运行, 在实际运行中通过不断完善控制特性, 在提高可靠性上采取了不少措施, 使电气制动系统完全能适应无人值班运行要求。

## 1 电气制动的工作原理和实现方式

### 1.1 发电机主要参数

额定功率: 100 MW	额定电压: 13.8 kV
额定电流: 432 A	额定功率因数: 0.85
额定转速: 147.5 / min	额定励磁电流: 125 A
额定励磁电压: 230 V	短路比: 1.15
转子电阻: 0.0034 Ω	

### 1.2 电气制动的工作原理

为了克服水轮发电机在停机过程中使用传统的机械制动所引起的制动块的磨损而造成的严重污染, 影响电机的绝缘和散热, 增加运行维护工作量, 在发电机停机过程中, 在转子回路中接入直流电流, 进行电气制动是较理想的停机方法。

电气制动的工作原理是基于同步发电机能耗制动的原理。当机组停机, 水轮机导叶关闭, 发电机转子经一定时间的灭磁后, 机端仅存由发电机剩磁决定的残压。此时, 机组转子上存在 4 种转矩, 由机组转动惯量决定的惯性转矩与原有速度的方向相同, 而发电机的机械摩擦阻力矩、发电机的空气摩擦阻力矩、水轮机转轮的水阻力矩的方向与原速度方向相反。此时电气制动装置自动捕捉电气制动允许通过的条件, 条件一旦满足, 由短路开关将发电机出口三相短路, 然后重新施加励磁。根据同步发电机的电枢反应原理, 此时将发生电枢反应, 电枢反应的直轴分量仅体现为加磁场或者去磁, 不反应有功转矩, 而电枢反应的交轴分量则体现为有功转矩, 其方向与原速度方向相反, 量值为:

$$T_{ei} = I_f^2 [X_d^2 RS / (R^2 + S^2 X_d^2)]$$

式中  $T_{ei}$ —电气制动转矩;

$I_f$ —发电机电气制动短路电流;

$X_d$ —发电机同步电抗;

$R$ —发电机定子绕组电阻 (每相值);

$S$ —转速比。

上述电气制动转矩就能达到机组克服惯性转矩而停机的目的, 扩建的 100 MW 水电机组停机制动系统就是采用发电机出口直接三相短路的方式。

### 1.3 电气制动的实现方式

停机制动系统采用三相桥式不可控整流接线，电气制动电源由厂用电 330V 经制动变压器 ZDB 供给，具体接线方式见图 1。

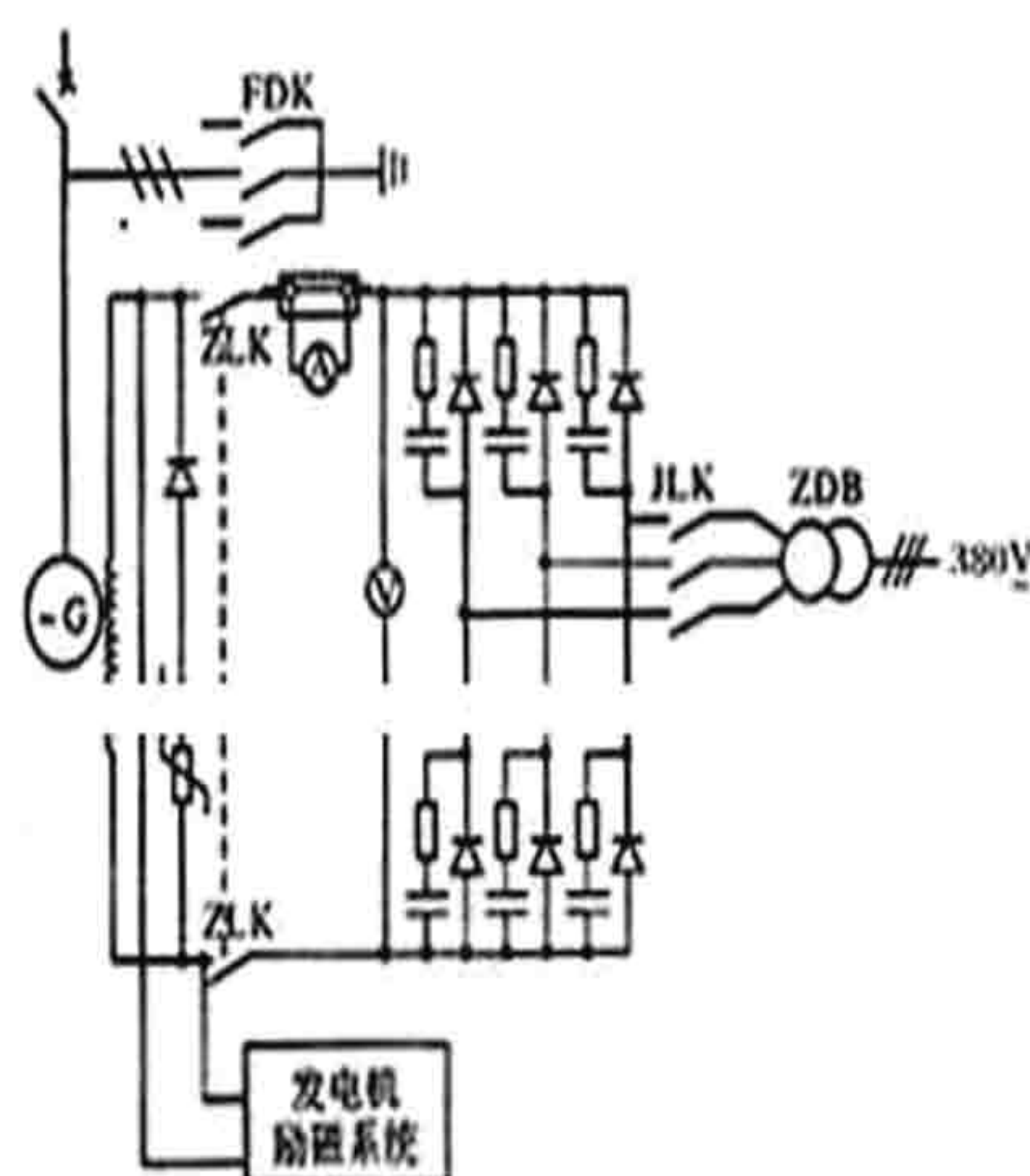


图 1 停机制动的电气一次系统  
FDK—发电机出口短路开关；JLK—交流开关；  
ZDB—制动变压器；ZLK—直流开关

当用于控制的可编程控制器（三菱的 **PLC**）捕捉到投入电气制动的条件：机组与系统解列，停机指令发出，机组无电气事故，机端电压低于 **10%** 额定电压，导叶全关且机组转速到 **30%** 额定转速后，电制动短路开关 **FDK** 合闸，合闸到位后延时合直流开关 **ZLK**。两者都到位后，延时合交流开关 **JLK**。为了改善低转速下推力轴瓦的运行工况，在 **10%** 额定转速时，投入机械制动，待机组转速至零后，按照从 **JLK**、**ZLK** 到 **FDK** 合闸的顺序，将机组回复到下一次的开机准备状态。

## 2 电气制动对机组保护的影响

### (1) 对差动保护的影响

电气制动短路点的设置，正处在发电机差电流全区保护范围之内，所以在电制动投入时，在差动保护回路内形成差电流，导致差动保护误动作、误发信号。消除办法是设置短接差电流的接触器，即在电气制动投入的条件满足后，自动启动接触器，将差电流二次回路短接。

### (2) 对发电机定子接地保护的影响

由于电气制动过程中三次谐波串联谐振的影响，将导致定子接地保护误动作、误发信号。解决的办法是将串联谐振回路中的消弧线圈的电感或发电机对地分布电容两个参数消除一个，使在电气制动停机过程中不存在消弧线圈感抗与发电机对地电容在绝对值上相等的机会，即采用电气制动停机时将发电机短路接地，此方法简单、可靠、易行。

## 3 提高电气制动可靠性的方法

扩建机组的基础自动化水平较高，通过计算机实时监控能实现远方控制和监视，投产正常运行 1 年后，就实行了无人值班运行，由设在 **1300m** 外的老厂控制室的上位机对其所有的主设备进行监视和控制，所以回路的可靠和各执行元件的正确动作就显得格外重要，尤其是停机时一旦投入电气制动，能产生 **400A** 左右的短路电流，因此如何保证机组正确地投入电气制动，并在电制动失败时，能确保在 **25%** 额定转速下自动投入机械制动是回路设计的关键。为此，设计中利用可编程易扩展的特点，在梯形回路中增加了闭锁，具体方法如下：

(1) 可编程控制器 **PLC** 平时不处在运行状态，只有在停机令收到后，才启动 **PLC** 按照编好的程序运行。

(2) 为防止发电机短路开关 **FDK** 误动，平时 **FDK** 电动机的操作电源断开，只有在正常停机过程中，转速降至 **80%** 额定转速时，才自动投入 **FDK** 的电机电源，电源正常后，待转速降到 **60%** 时，才由程序控制合 **FDK**。电气制动复归时自动断开电机电源。

(3) 对开关 **FDK**、**JLK** 和 **ZLK** 的操作控制，均加入了自身和相关开关位置接点的判断和闭锁，且准时断

开分合闸回路，以免烧坏接触器和空气开关的电机，如在合开关 **ZK** 时，必须判断 **FK** 已合上，且延时 **2 s** 后即复归合闸回路。

(4) 转速信号是电气制动很关键的判断依据。除了采取措施加强转速装置的可靠性以外，还在回路设计中增加了防误闭锁，如为了防转速 **60%** 信号误发用 **80%** 信号来闭锁，即只有在 **60%** 和 **80%** 2 个信号同时满足时，才允许投入电气制动。

(5) 当电气制动失效时，机械制动必需可靠地投入制动停机。为此，回路设计中增加了制动失效的判断。即当机组转速至 **25%** 时，可编程控制器已运行了 **10 s** (据试验所得) 以上还未复归；或者机组还有残压 (**10 V** 以上)；或者机组有电气事故；则判断为电气制动失败，信号送到机组就地控制单元 (**LCU**)，在 **25%** 额定转速时投入机械制动，否则，**LCU** 在 **10%** 额定转速时才自动投入机械制动。

除了在软件上保证回路动作的可靠性外，还在硬件上采取了措施，如 **FK** 上除了装有位置辅助接点，还设置了机械限位接点，为保证 **FK** 可靠动作，辅助接点要比机械限位接点提前 **10** 动作。原 **ZK JK** 采用的是蜗杆式电动机构，动作过程中蜗杆弹簧经常卡涩，导致电气制动失效，影响了电制动的正常运行，换成江苏宏泰电器有限责任公司生产的 **CD** 型电动机构后，运行情况一直良好。另外，虽然在电制动屏上设了 **ZK JK** 和 **FK** 的电动操作按钮，但为了防止误操作，在控制程序中取消了按钮的作用，只有在试验时，启用试验程序才能对它们实现分合的电动操作。

#### 4 结束语

电气制动在低转速下具有良好的制动效果，有利于发电机组快速通过低转速区，停机特性优越，大大缩短了停机时间，尤其对调峰机组来说，显示出了独特的优势。通过对电气制动控制回路的不断完善，装置动作可靠，已基本满足了无人值班机组运行的需要，不足的是未能实现与监控系统的通讯，可供远方监视的信号量较少，这也是下一步着重解决的问题。

