

# 水轮发电机组电气制动的仿真 及在刘家峡电厂的应用

田波, 刘伟, 杨蔚, 刘发展

国网甘肃刘家峡水电厂, 甘肃省永靖县, 邮编 731600

## Application Study and simulation on Electrical Braking System of Hydrogenerator in Liujiaxia Hydropower Station

TianBo ,LiuWei,YangWei ,LiuFazhan

Liujiaxia Hydropower Station,Yongjing County,Gansu Province

**ABSTRACT:** The electric braking technology of water turbine generator set is a kind of stopping measure of water turbine generator set at present. It can overcome the disadvantages of traditional mechanical braking. By means of MATLAB simulation software, this thesis analyzes and studies the electric braking mode of three phase direct short circuit of hydrogenerator stator. The results of downtime and deceleration of hydro generating units under different braking parameters are obtained by simulation program. By using the actual test results of the hydraulic braking system of Liujiaxia hydropower station, the simulation results are obtained and corresponding conclusions are drawn.

**KEY WORD:** Hydro generator, Electric braking, Simulation analysis

**摘要:** 水轮发电机组电气制动技术是目前应用较多的一种水轮发电机组停机制动措施,它可以克服传统机械制动方式存在的种种弊端。本文通过借助 MATLAB 仿真对水轮发电机组定子三相直接短路电气制动方式进行了分析和研究,利用仿真程序得出水轮发电机组在不同制动参数下的停机减速结果,同时利用刘家峡电厂水轮发电机组电气制动停机的实际测试试验结果进行仿真验证,得出了相应的结论。

**关键词:** 水轮发电机组; 电气制动装置; 仿真分析

## 1 引言

水轮发电机组电气制动方式具有制动转矩大、制动时间短,与传统机械制动方式相比较具有无粉尘、无污染等优点,从 80 年代开始在国内外大、中型水轮发电机组中得到了一些应用。同时,大、中型水电机组通常还承担着电

网调峰、调频及事故备用的任务,开、停机操作频繁。因此,电气制动这种高效、可靠的制动方式自然成为了机组停机制动所首先采用的一项技术。尤其是对一些大型、巨型水轮发电机组来说,能够降低机组低转速运行时间,避免低转速造成的推力轴承受损,对水轮发电机组的安全运行显得尤为重要。

## 2 水轮发电机组电气制动技术简介

电气制动是以电机学为基础理论,利用电磁感应原理实现的一种制动技术,与机械制动相比它是一种非接触式的制动形式。通过发电机定子、转子间所产生的电磁转矩与惯性转矩相反的原理实现制动,将水轮发电机组转动惯性动能转变成热能或电能实现制动停机。

发电机定子三相直接短路电气制动方式是目前应用最为广泛的电气制动形式,它具有接线简单、适用性强的特点,其原理是基于同步发电机的电枢反应以及能耗制动原理。其工作原理及过程是:发电机组与系统解列,机组停机指令发出,机组导水机构关闭,在适当的制动投入转速下,将发电机定子三相短路,并向发电机组转子绕组重新加入励磁电流,此时由于转子磁场的作用将在发电机定子绕组中产生短路电流。依据同步发电机电枢反应原理,发电机定子短路电流感应磁场与转子磁场相互作用产生电磁转矩,其方向与机组惯性转矩相反,从而使机组减速制动直至停机<sup>[1][2]</sup>。

### 3 刘家峡水电厂水轮发电机组电气制动系统简介

刘家峡水电厂于 1990 年开始应用电气制动系统，电气制动采用发电机定子三相直接短路制动方式，采用独立设置的电气制动控制设备、整流设备及其它附属设备为机组电气制动时提供制动电流，控制系统核心元件采用可编程程序控制器。

图 1 为刘家峡水电厂电气制动系统的原理简图。

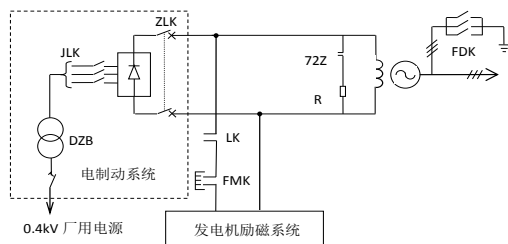


图 1 刘家峡水电厂电气制动系统结构原理简图

刘家峡水电厂发电机组电气制动系统由制动变压器、交流侧制动开关、直流侧制动开关、整流设备及自动控制设备组成。电气制动开关 LK 的主要作用是在电气制动过程中，用于断开励磁主回路；电制动整流设备采用了三相二极不可控整流桥，其作用是将交流电转换为直流提供给发电机制动励磁电流；电制动交流开关 JLK 和直流开关 ZLK 用于电气制动的投入和退出。制动变压器将厂用动力电源转变为适应电气制动的交流电压，电站共设 2 台制动变压器为，其中 1 号、2 号机组共用一台，3 号~5 号机组共用一台。

### 4 水轮发电机组电气制动仿真分析

#### 4.1 水轮发电机组三相直接短路电气制动特性分析

##### 4.1.1 电气制动定子短路电流分析

在电气制动过程中，由于励磁电流保持恒定，根据同步电机理论，此时发电机转子上的基波每极磁通量为恒定值，因此定子绕组感应的内电势  $E$  和纵轴同步电抗  $X_d$  可分别计算如下<sup>[2]</sup>：

$$E = 4.44fW\phi K_f = \frac{4.44}{60}PW\phi K_f n = K_E n \quad (1)$$

$$X_d = \omega L = 2\pi fL = \frac{2\pi Pn}{60}L = K_d n \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中：

$E$ —定子绕组感应的内电势； $K_f$ —波形系数； $n$ —机组转速； $P$ —发电机磁极对数； $K_E$ —

电压系数 ( $K_E = \frac{4.44}{60}PW\phi K_f$ )； $X_d$ —纵轴同步电抗； $K_d$ —电枢反应系数 ( $K_d = \frac{2\pi PL}{60}$ )。

电气制动时定子三相短路电流为：

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{X_d^2 + R^2}} = \frac{K_E n}{\sqrt{(K_d n)^2 + R}} \quad (3)$$

式 (3) 中，当忽略定子绕组电阻  $R$  时，

$$I_k = \frac{K_E n}{K_d n} = \frac{K_E}{K_d} = \text{常数}$$

可得出：。由此可见，理论上在电气制动过程中定子短路电流  $I_k$  为恒定值，不随机组转速  $n$  而变化。

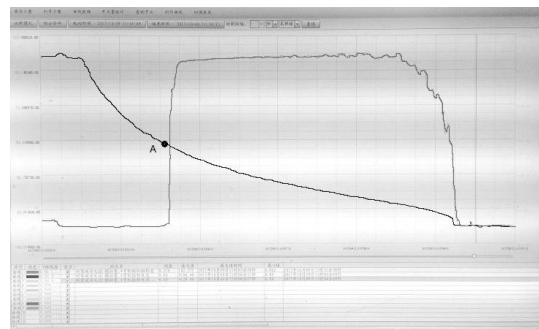


图 2 2 号机组电气制动停机定子电流及转速变化曲线

图 2 为刘家峡 2 号机组电气制动停机过程中定子短路电流和机组转速的变化曲线。图中的 A 点为电气制动投入点，投入转速约为  $50\%n_N$ ，从该曲线可以看出在整个制动过程中，定子短路电流基本保持不变，只在转速接近于零转速时，定子电流才降低，与理论分析的结论一致。

##### 4.1.2 电气制动转矩特性分析

在电气制动过程中，由于发电机定子、转子磁通均达不到饱和，同时制动时间也较长，远大于发电机组的暂态时间常数，其运行特性近似于双绕组变压器，主要损耗是铜损，而不

是激磁电抗的铁损，与发电机组的短路试验特性类似。

根据同步电机理论，电气制动时的电磁力矩（ $T_E$ ）可以由近似的电磁功率（ $P_E$ ）与转速（ $\Omega$ ）的比值确定，其表达式如下：

$$T_E = \frac{P_E}{\Omega} = \frac{3I_k^2 R}{2\pi f} = K_m \frac{n}{K_d^2 n^2 + R^2} \quad (4)$$

$$\text{式(4)中: } K_m = \frac{90RK_E}{\pi P}$$

由式(4)可以得出，由于短路电流  $I_k$ 、定子绕组电阻  $R$  为常数，因此电制动电磁力矩是随着机组转速的降低而增大的。

为计算最大电制动转矩所对应的转速，可由式(4)对转速  $n$  进行微分计算，并令导数为

0，可得出： $n = \frac{R}{K_d}$ 。当机组转速  $n = \frac{R}{K_d}$  时，电制动转矩最大，而在转速为零时，电制动转矩也为零。

由以上分析，可以得出定子三相直接短路电气制动具有如下特性：

(1) 电制动转矩随机组转速下降而增大，因此对于机组制动停机是非常有利的，从实际的停机过程也可以证明在电气制动时，发电机组低转速时的转速下降率更大。

(2) 电制动电磁力矩与定子短路电流的平方成正比，与机组转速成反比。因此定子短路电流越大，制动效果越好，停机时间也越短。

在电制动过程中，定子短路电流的大小是由转子绕组励磁电流决定的，通过调节励磁电流，可以改变定子短路电流，从而起到控制电制动电磁力矩大小的作用，调节电气制动能力。因此，电气制动时的定子短路电流和电气制动的投入转速成为决定电气制动停机能力的两项重要技术参数。

#### 4.2 水轮发电机组停机制动特性分析

水轮发电机组的停机制动过程实际上是一个能量转换过程，即将机组转动部分的惯性动能通过各类损耗转换为热能或电能。在制动停机的整个过程中，发电机转动部分是在各种阻力矩的综合作用下减速的，它们包括：水轮机转轮的水阻力矩（也称搅水力矩）、机组转动过

程的风摩擦阻力矩、机组推力轴承引起的摩擦阻力矩以及电气制动阻力矩。

##### 4.2.1 水轮机转轮的水阻力矩

水轮机转轮的水阻力矩与机组的转轮形式有关，混流式水轮机、水泵式水轮机、轴流式水轮机的水阻力矩要明显高于冲击式水轮机及作调相作用的混流、轴流水轮机（因其在调相过程中转轮在空气中旋转）<sup>[3]</sup>。

水轮机转轮的水阻力矩计算如下<sup>[4]</sup>：（为便于计算，均以水轮机角速度  $\Omega^*$  为变量表示）

$$T_w(\Omega) = 4.8 \frac{P_k}{g} = k_v n^2 D^5 = 4.8 \frac{P_k}{g} k_v n_N^2 \Omega^{*2} D^5 \quad (5)$$

式(5)中： $P_k$ —空气密度，取  $1.29\text{kg/m}^3$ ； $g$ —重力加速度，取  $9.8\text{m/s}^2$ ； $n_N$ —转轮额定转速； $D$ —转轮直径； $k_v$ —转轮类型系数，对于混流式水轮发电机组，取值如下：

$$k_v = \frac{1}{n_N^{0.2} D^{0.4}} \left[ 0.2 + 0.03 \left( \frac{n_s - 140}{100} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式(6)中， $n_s$  为比转速，其值为：

$$n_s = \frac{n_N \left( \frac{P_{N,t}}{0.75} \right)^{0.5}}{H_d^{1.25}} \quad (7)$$

式(7)中， $P_{N,t}$ —水轮机最高效率时的功率，单位 kW； $H_d$ —水轮机的设计水头。

将水轮机转轮的水阻损耗功率用额定转速下的水阻损耗功率  $P_{w,N}$  和角速度  $\Omega^*$  表示如下：

$$P_w(\Omega) = 4.8 \times 2\pi \frac{P_k}{60g} k_v n_N^3 \Omega^{*3} D^5 \quad (8)$$

##### 4.2.2 风摩擦阻力矩

发电机组在角速度为  $\Omega^*$  时的风摩擦损耗功率，可以根据机组在额定转速下的通风损耗功率经验公式得出<sup>[4]</sup>：

$$P_v(\Omega) = P_{v,N} \Omega^{*2.8} \quad (9)$$

式(9)中， $P_{v,N}$  为机组在额定转速下的通风损耗功率。

##### 4.2.3 轴承摩擦阻力矩

机组轴承摩擦阻力矩引起的摩擦损耗功率，也可用角速度  $\Omega^*$  和额定摩擦损耗功率值  $P_{B,N}$  表示<sup>[4]</sup>：

$$P_B(\Omega) = P_{B,N} \Omega^{*1.5} \quad (10)$$

式(10)中,  $P_{B,N}$  为机组在额定转速下的轴承摩擦损耗。

#### 4.2.4 电制动转矩

根据电机学理论, 发电机组的电磁功率有输出功率  $P_{out}$  和电枢铜损耗  $P_{cu}$  等, 在电气制动状态下输出功率为零。因此电磁功率即为电枢铜损耗, 其值表示如下:

$$P_E = P_{cu} = 3I^2 r_a \quad (11)$$

式(11)中,  $I$ -定子电流;  $r_a$ -定子绕组电阻。

由于在电制动过程中, 定子电流在整个制动过程中基本不变, 因此在不计制动过程中杂散损耗的情况下, 制动功率也基本不变。在实际中, 由于杂散损耗所产生的转矩对于制动过程分析也有一定影响, 发电机在定子短路状态下的杂散损耗成分较多, 一般包括转子或磁极表面的损耗、定子铁芯附加损耗等<sup>[5]</sup>。将杂散损耗转矩用功率表示, 一般按下式计算:

$$P_{st}(\Omega) = P_{st,N} i_k^{*2} \Omega^* \quad (12)$$

式(12)中,  $P_{st,N}$ -发电机组额定杂散损耗;  $i_k^*$ -定子电流标么值;  $P_{st}$ -发电机在角速度为  $\Omega^*$  时的杂散损耗功率。

在计及发电机杂散损耗情况, 总的电磁功率  $P_E$  表示为:

$$P_E(\Omega) = P_{st,N} i_k^{*2} \Omega^* + 3I^2 r_a \quad (13)$$

由功率、转速和转矩之间的关系, 可得到电磁力矩  $T_E$  为:

$$T_E(\Omega) = \frac{P_E(\Omega)}{\Omega} = \frac{P_{st,N} i_k^{*2} \Omega^* + 3I^2 r_a}{\Omega} \quad (14)$$

将式(14)中的铜损耗用额定值表示为:

$$T_E(\Omega) = \frac{P_{st,N} i_k^{*2} \Omega^* + 3I^2 r_a}{\Omega} = \frac{P_{st,N} i_k^{*2} \Omega^* + P_{cu,N} i_k^{*2}}{\Omega_N \Omega^*} \quad (15)$$

#### 4.2.5 制动时间计算

在电气制动过程中, 作用在发电机转子上的总阻力矩为水阻力矩、风摩擦阻力矩、机械摩擦阻力矩、电磁力矩之和, 表示如下:

$$\sum T_i(\Omega) = T_W(\Omega) + T_V(\Omega) + T_B(\Omega) + T_E(\Omega)$$

$$= \frac{1}{\Omega_N} \left( P_{V,N} \Omega^{*1.8} + P_{B,N} \Omega^{*0.5} + P_{W,N} \Omega^{*2} + P_{st,N} i_k^{*2} + \frac{P_{cu,N} i_k^{*2}}{\Omega^2} \right) \quad (16)$$

根据转矩计算公式:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -\sum T_i(\Omega) \quad (17)$$

由式(17)得出停机减速时间为:

$$t = -J \Omega_N \int \frac{1}{\sum T_i(\Omega)} d\Omega^* \quad (18)$$

式(18)中:  $J$ -发电机组的转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

在制动过程中, 如果在角速度为  $\Omega^*$  时投入电气制动, 可得出制动时间  $t$  为:

$$t = -J \Omega_N \int_{\Omega^*}^{\Omega} \frac{1}{T_i(\Omega)} d\Omega^* - J \Omega_N \int_{\Omega^*}^{\Omega} \frac{1}{T_i(\Omega) + T_E(\Omega)} d\Omega^* \quad (19)$$

通过式(19)就可以计算出发电机在不同角速度下投入电气制动时机组停机制动时间, 借此帮助分析停机制动过程<sup>[5]</sup>。

### 4.3 电气制动仿真程序设计

为了分析发电机组定子三相直接短路电气制动过程中电制动投入转速和制动电流对制动效果的影响, 利用 MATLAB 软件进行电气制动的仿真计算。通过式(19)可以计算出在电气制动过程中转速-时间曲线和制动时间。

#### 4.3.1 计算公式

为了便于 MATLAB 编程, 将公式(19)转换, 利用差分方程代替微分  $d\Omega/dt$ , 可得到:

$$J \frac{\Omega_{i+1} - \Omega_i}{t_{i+1} - t_i} = \sum T_i \left( \frac{\Omega_{i+1} + \Omega_i}{2} \right) \quad (20)$$

因  $\Omega = \Omega_N \Omega^*$ , 式(20)可以转换为:

$$J \Omega_N \frac{\Omega_{i+1}^* - \Omega_i^*}{t_{i+1} - t_i} = \sum T_i \left( \Omega_N \frac{\Omega_{i+1}^* + \Omega_i^*}{2} \right) \quad (21)$$

即:

$$t_{j+1} = t_j + J \Omega_N \frac{\Omega_{j+1}^* + \Omega_j^*}{\sum T_i \left( \Omega_N \frac{\Omega_{j+1}^* + \Omega_j^*}{2} \right)} \quad (22)$$

根据式(22), 设定  $\Omega^*$  的初值和步长

$\Delta = \Omega_{i+1}^* - \Omega_i^*$  可以编制出计算程序。

#### 4.3.2 仿真软件设计及验证

采用 MATLAB 软件的图形界面编程功能,

设计电气制动仿真程序界面，通过在界面输入相关的机组技术参数和所需要计算的制动电流、制动投入转速可以计算出机组制动时间，同时绘制出停机过程曲线。

软件的图形界面如下：

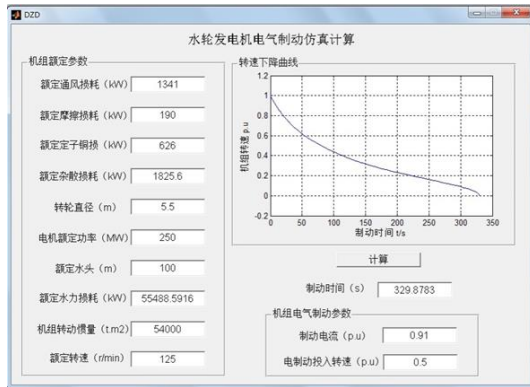


图 3 电气制动仿真软件图形界面

需要注意的是计算程序中，额定水力损耗的计算是按照混流式机组计算公式即式(6)计算的，对于轴流式水轮发电机组，还应做相应的改动。

为验证仿真软件的正确性，选取刘家峡电厂 2 号机组作为实际参考机组。2 号机组有关技术参数如下<sup>[6][7]</sup>：

表 1 刘家峡电厂 2 号机组技术参数

参数名称	数据	参数名称	数据
额定通风损耗 /kW	1341	电机功率 /MW	250
额定摩擦损耗 /kW	190	额定水头/m	100
额定定子铜损 /kW	626	机组转动惯量 / kg.m <sup>2</sup>	54000
额定杂散损耗 /kW	1825.6	额定转速 (r/min)	125
转轮直径/m	5.5	制动电流 (%)	91
制动投入转速 (%)	50		

图 3 为刘家峡 2 号机组电气制动的仿真计算结果，显示电气制动停机时间为 329.9s，刘家峡电厂 2 号机组电气制动实际停机时间为 334s，仿真计算结果与实际数据相差不大。

#### 4.4 电气制动仿真分析

电气制动时制动转矩与定子短路电流  $I_k$  的平方成正比，与制动效果有直接的关系，是影响制动效果的一个因素，另一个因素是电气制动的投入转速，在不同的转速投入电气制动，也会影响电气制动的效果。

下面利用仿真程序对这两项因素进行分别分析：

##### 4.4.1 不同制动电流对制动效果的影响

为了分析不同制动电流所造成的影响，选取 3 组不同的制动电流进行仿真分析，分别是制动电流  $I_k$  为  $80\%I_N$ 、 $100\%I_N$ 、 $120\%I_N$  ( $I_N$  为额定定子电流)。

仿真结果如下：

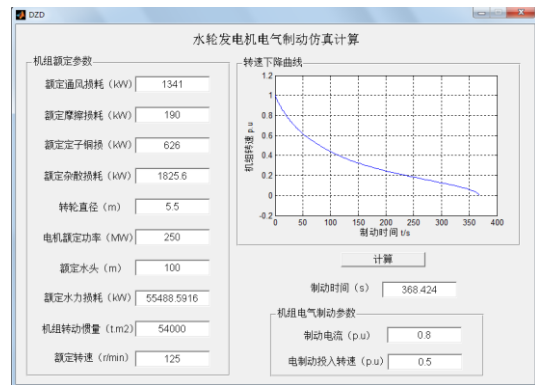


图 4 制动电流  $80\%I_N$ 、投入转速  $50\%n_N$  的仿真计算结果

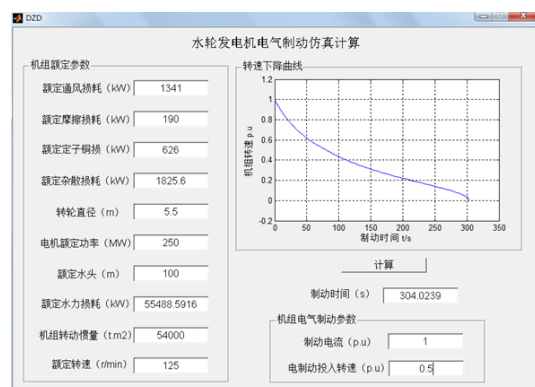
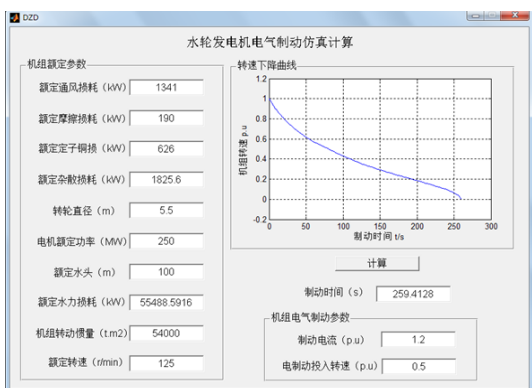
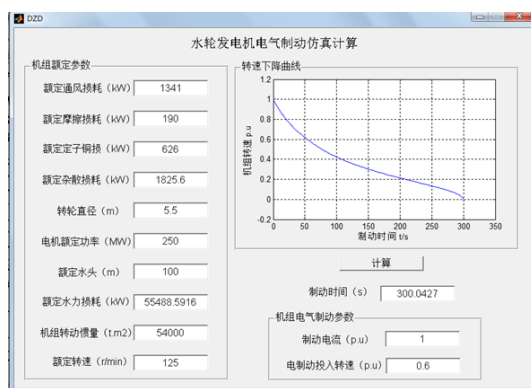


图 5 制动电流  $100\%I_N$ 、投入转速  $50\%n_N$  的仿真计算结果


 图 6 制动电流 120% $I_N$ 、投入转速 50% $n_N$  的仿真计算结果

 图 7 制动电流 100% $I_N$ 、投入转速 60% $n_N$  的仿真计算结果

仿真计算结果汇总如下：

表 2 不同制动电流的制动仿真计算结果

制动电流	80% $I_N$	100% $I_N$	120% $I_N$
制动时间	368 s	304 s	259 s

从仿真结果我们可以看出，改变制动电流可以有效的调整电气制动的效果，制动电流对制动效果的影响非常显著。将制动电流由 80% $I_N$  提高到 100% $I_N$ ，制动时间缩短了 64s，由 100% $I_N$  提高到 120% $I_N$ ，制动时间缩短了 45s。

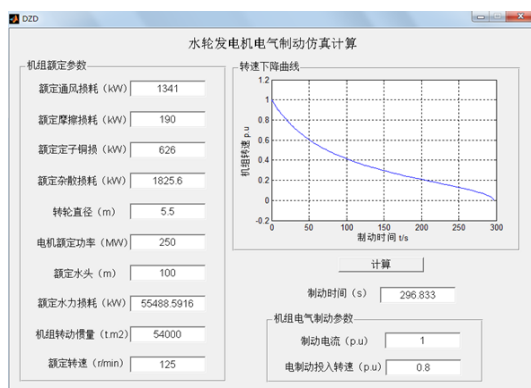
以刘家峡电厂 2 号机组为例，目前制动电流为 91%  $I_N$ ，仿真计算得出的制动时间为 330s，如果将制动电流提高到 120%  $I_N$ ，制动时间将缩短 71s，制动性能将会有明显的提升。

在仿真计算中，增大制动短路电流可以有效提高制动效果。但在实际应用中，应注意制动短路电流受发电机组定子绕组通流能力、温升等多种因素的限制，其取值还应以现场实际试验确定，应在保证发电机组安全稳定的前提下选取合适的制动短路电流。

#### 4.4.2 不同投入转速对制动效果的影响

在同一制动电流下，选取 3 组不同的投入转速进行仿真计算，制动转速分别选取为 50% $n_N$ 、60%  $n_N$ 、80%  $n_N$ 。（50%  $n_N$  的仿真曲线见图 3）

仿真结果如下：


 图 8 制动电流 100% $I_N$ 、投入转速 80% $n_N$  的仿真计算结果

仿真计算结果汇总如下：

表 3 不同制动投入转速的制动仿真计算结果

投入转速	50% $n_N$	60% $n_N$	80% $n_N$
制动时间	304 s	300 s	296 s

从上述数据可以看出，同一制动电流，不同的制动投入转速对整个电制动时间的影响并不是很大。将 3 组仿真结果曲线绘制于同一坐标系中，如图 9 所示：

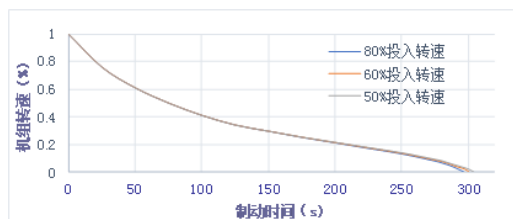


图 9 不同投入转速的制动过程曲线

3 种不同制动投入转速的仿真计算曲线基本重合。为了进一步分析制动投入转速对制动效果的影响,将发电机组无制动的自由减速过程仿真如下:

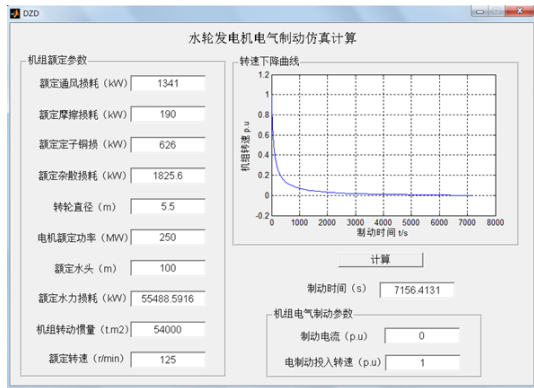


图 10 机组无制动自由停机的仿真计算结果

将制动电流为  $100\%I_N$ 、制动投入转速  $50\%n_N$  的仿真曲线与机组无制动的自由减速曲线绘制于同一坐标系,如下图所示:

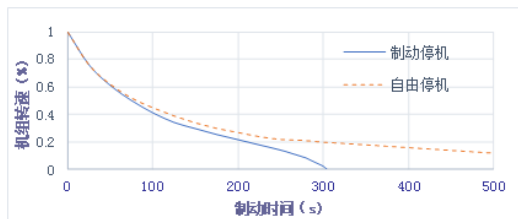


图 11 电气制动与机组自由停机的减速曲线

由图 11 可以看出,制动投入转速为  $50\%n_N$  与不投入制动的机组自由停机减速曲线在转速  $50\%n_N$  以上的区间基本重合,转速下降率基本一致。说明在转速  $50\%n_N$  以上,投入电气制动并没有起到加速制动的作用,可以推断出在  $50\%n_N$  转速以上电气制动阻力矩只占总阻力矩的小部分。因此,过早的投入电气制动并不会带来很大的制动效果提升,没有实际意义,电气制动投入转速应该设置在  $50\%n_N$  附近较为合适。

## 5 刘家峡水电厂发电机组电气制动试验与分析

根据上述理论分析和仿真计算结论,进一步通过实际的电气制动试验测试发电机组在不同的制动短路电流和投入转速下机组电气制动的性能。

### 5.1 机械制动试验

为了比较电气制动性能,对发电机组进行了机组机械制动试验,试验时按照机组正常停机流程执行,在转速降低至  $25\%n_N$  时投入机械制动器,制动时间为 334s。

机组机械制动转速下降曲线如下:

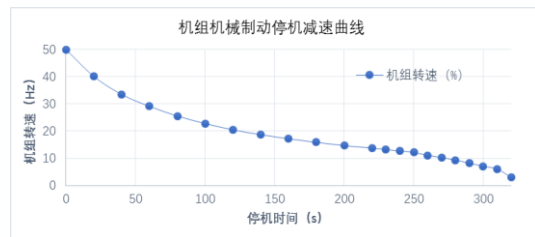


图 12 机组机械制动停机减速曲线

### 5.2 机组电气制动停机试验

机组电气制动停机试验时,为了对比不同制动电流、投入转速对机组停机减速过程的实际影响,进行了多项试验。

#### (1) 原制动电流电气制动停机试验

按照刘家峡电厂原电气制动短路电流设计值进行电气制动停机性能测试,定子短路电流为  $91\%I_N$  (制动变压器副边档位为第三档),制动投入转速为  $50\%n_N$ 。试验中,为了测试定子短路电流对机组温升的影响,对发电机组定子绕组及定子铁芯温度进行了监视,并且试验在机组热态情况下进行,试验数据如下:

原制动参数下机组电气制动停机时间为 334s,与机组机械制动停机时间相同,试验前后机组定子绕组及铁芯温度变化不超过  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

#### (2) $101\%I_N$ 制动电流停机试验

为了验证提高制动电流对电气制动实际的影响,测试在提高制动电流时机组的电气制动停机特性。基于试验安全性的考虑和发电机定子测温监控手段的限制,试验中选取了提高一档制动变压器副边档位(第四档),制动短路电流约为  $101\%I_N$  额定电流,制动投入转速仍为  $50\%n_N$ ,其试验结果也能够对分析起到作用。

$101\%I_N$  制动电流停机时间为 308s,试验前后机组定子绕组及铁芯温度变化不超过  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

### (3) 60% $n_e$ 投入转速停机试验

试验中, 采用制动变压器第二档, 制动短路电流约为 88% $I_N$  额定电流, 制动投入转速提高为 60% $n_e$ , 88% $I_N$  制动电流、60% $n_e$  制动投入转速情况下电气制动停机时间为 334s, 试验前后机组定子绕组及铁芯温度变化不超过  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

## 5.3 试验分析

(1) 101% $I_N$  制动电流的理论计算结果与实际测试结果对比

图 13 为制动电流 101% $I_N$ 、投入转速 50% $n_N$  的仿真计算结果

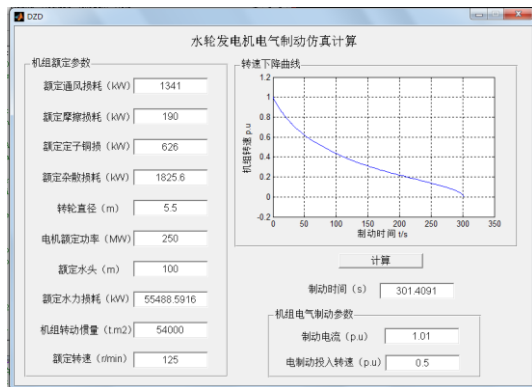


图 13 制动电流 101% $I_N$ 、投入转速 50% $n_e$  的仿真计算曲线

图 14 为制动电流 101% $I_N$ 、投入转速 50% $n_e$  的实际测试曲线

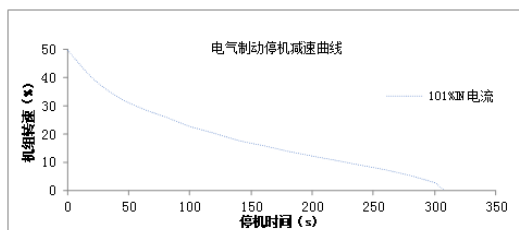


图 14 制动电流 101% $I_N$ 、投入转速 50% $n_e$  的停机曲线

仿真计算停机时间为 301.4s, 而机组实际测试停机时间为 308s, 数据误差相差不大。通过测试可见, 将制动短路电流由 91% $I_N$  提高至 101% $I_N$ , 实际制动时间缩短了 26s, 增大制动短路电流对提高电气制动性能有明显的作。

(2) 60% $n_e$  投入转速的理论计算结果与实际测试结果对比

图 15 为制动电流 88% $I_N$ 、投入转速 60% $n_e$  的仿真计算结果

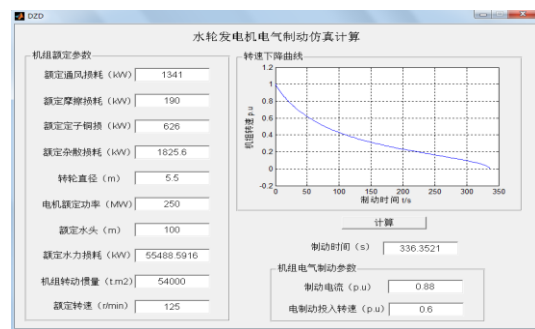


图 16 为制动电流 88% $I_N$ 、投入转速 60% $n_N$  的实际测试曲线

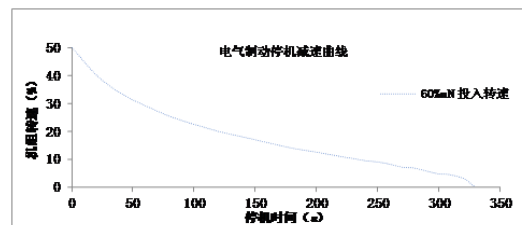


图 16 制动电流 88% $I_N$ 、投入转速 60% $n_N$  的停机测试曲线

仿真计算停机时间为 336.3s, 而机组实际测试停机时间为 334s, 数据误差相差不大。通过测试可见, 虽然制动投入转速由 50% $n_N$  提高至 60% $n_N$ , 但同时将制动短路电流由 91% $I_N$  降低至 88% $I_N$ , 所得到的实际制动时间未发生较大变化, 降低制动电流与提高投入转速的作用基本抵消。试验中, 投入转速提高 10% 与制动电流降低 3% 的作用相当, 可见影响制动特性的两项参数中, 制动电流的作用要明显大于投入转速的影响。

### (3) 综合分析

将以上不同制动方式试验的实际停机减速曲线绘制于同一坐标系如下:

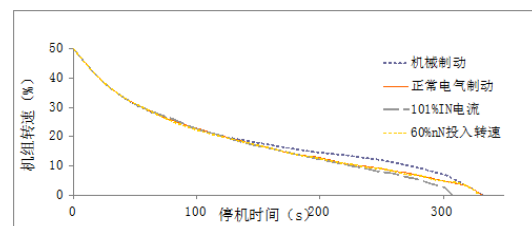


图 17 不同制动方式的停机减速曲线



从机组在不同制动方式的试验结果可以得出以下结论:

(1)刘家峡电厂原机组电气制动的制动性能是按照与机组机械制动的能力基本相当而设定的,采用机械制动停机与在原有参数下的电气制动停机时间均为 334s。

(2)在提高制动电流到 1.01 倍额定电流时,制动时间缩短为 308s,制动效果有明显的提升,且提高制动电流对发电机组定子绕组和铁芯的温升影响不大。

(3)将制动投入转速提高到  $60\%n_c$ ,制动电流降低到  $88\%I_N$  所得到的停机效果与投入转速  $50\%n_c$ 、制动电流  $91\%I_N$  时一致,进一步验证了制动电流对制动效果的影响较大,而投入转速在转速 50% 以上时影响较小。

## 6 结论

本文通过对水轮发电机组定子三相短路电气制动特性的研究,设计了电气制动仿真程序。通过仿真和在刘家峡电厂发电机组上的实际测试得出了三相短路电气制动系统重要的两项技术参数(制动电流和投入转速)及其对制动特性的影响。制动电流对制动特性的影响较大,应该根据发电机组的允许尽可能选取接近或略高于额定电流的参数以提高制动效果,而制动投入转速应设计在 50% 左右,过高的投入转速没有实际意义。

刘家峡电厂作为一座水电老厂,原有的独立式电气制动系统所固有的制动电流调整不便、设备数量多而复杂、工作可靠性不高等缺

点已不能满足机组运行工况的需要。同时,加之电站位于黄河上游,泥沙含量较大,机组过流部件的磨损远远大于正常值,仅仅依靠现有独立式电气制动系统和传统机械制动,不能有效地发挥电气制动的能力,影响机组的开、停机响应速度,具有很大的改造需求,其电气制动系统的改造及完善仍是一个主要的研究技术方向。

## 参 考 文 献

- [1] 国网甘肃刘家峡水电厂. 刘家峡水电厂二号机组改造增容技术资料汇编[C]. 甘肃永靖: 刘家峡水电厂. 1994:1405-1431.
- [2] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社. 2009:408-414.
- [3] 何振强. 水轮发电机停机减速过程的研究[J]. 大电机技术. 1983 年第 5 期: 9-15.
- [4] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 机械工业出版社. 1981.
- [5] 付云清. 1000MW 水轮发电机定子三相短路制动方式研究[D]. 哈尔滨理工大学硕士学位论文. 2010(3).
- [6] 黄振春. 刘家峡水电厂发电设备增容改造[J]. 甘肃电力. 1991(2): 7-11.
- [7] 刘家峡水电厂. 刘家峡水电厂专业技术论文集(1991-1995)[C]. 刘家峡水电厂 1995 年.

### 作者简介:

田波(1980 年 10 月),男,陕西省商县,工程硕士学位,工程师,从事水电站自动装置维护及检修工作。

刘伟(1968 年 4 月),男,江苏沛县,大学本科,高级工程师,从事水电站电气设备管理工作。

杨蔚(1979 年 11 月),男,甘肃省永靖县,大学本科,助理工程师,从事水电站自动装置维护及检修工作。

刘发展(1972 年 2 月),男,江苏沛县,研究生,高级工程师,从事水电站电气设备管理工作。