

# 电气制动技术及其在大型抽水蓄能机组的应用

郭海峰

(广州蓄能水电厂, 广东 从化 510950)

**摘要:** 详细介绍了水轮发电机的电气制动原理。作为工程实例, 介绍了电气制动在广州抽水蓄能电厂中的应用情况。文中还对电气制动系统的实际应用提出了参考建议。

**关键词:** 抽水蓄能; 水轮发电机; 电气制动

**中图分类号:** TM312

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1672-5387(2007)01-0016-03

## 0 引言

制动停机是起动、停机频繁的水轮发电机组所共同面对的关键问题之一。当机组与电网解列后, 由于水力机组转动部件具有较大的转动惯量, 机组在短时间内不能自主停下, 如果机组在长时间处于低速运转状态, 对机组的推力轴承极为不利。传统的机械制动存在着许多缺陷, 而且制动所产生的金属粉尘对发电机绕组的污染构成了机组安全运行的一大隐患。作为一种安全、环保、简便、高效的制动方式, 电气制动已经越来越为众多的水电厂所接受。不少使用传统制动模式的水电厂已经或正在进行电气制动的改造。而对于新建的各类型水电厂, 也均把电气制动作为机组制动的首选模式。电气制动与机械制动相配合, 可以满足现代大型水电厂的制动要求。

## 1 电气制动的原理

### 1.1 基本工作原理

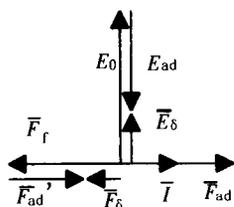


图1 电气制动时发电机的矢量图

电气制动的工作原理是基于同步电机的电枢反应理论。当机组与电网解列, 发电机转子灭磁后, 使定子三相短路, 同时给转子重新施加励磁。由于此时定子线圈是一纯感性负载, 因此电枢反应的结果是产生的电磁力矩方向与机组惯性力矩的方向相

反, 电气制动力矩与机组的其他阻力矩共同作用使机组快速减速, 达到制动的目的。电气制动时的向量图如图1所示。其中:  $F_a$ : 电枢磁动势;  $F_{ad}'$ : 直轴磁动势;  $F_{\delta}$ : 合成磁动势;  $F_f$ : 励磁磁动势;  $E_0$ : 空载励磁电势;  $E_{ad}$ : 直轴励磁电势;  $E_{\delta}$ : 合成电势。

### 1.2 电流与转速的关系式

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{x_d^2 + R^2}}$$

其中:  $E = 4.44 f \Phi N \times K_1 =$

$$(4.44/60) P N \Phi K_1 \times n = K_E \times n \quad (1)$$

$$X_d = \omega L = (2\pi L/60) P N \quad (2)$$

$I_d$ : 短路电流;  $E$ : 定子电势;  $X_d$ : 直轴同步电抗;  $R$ : 定子直流电阻;  $K_1$ : 绕组系数

从(1)中可看出, 当励磁电流恒定不变时, 电势  $E$  仅与转速  $n$  相关。考虑到定子直流电阻  $R$  此时可以忽略, 由(1)及(2)可得:

$$I_d = \frac{K_E \cdot n}{\sqrt{(K_d \cdot n)^2 + R^2}} \quad (3)$$

从(3)可看出, 定子绕组中的短路电流是一恒定值, 不随机组转速的降低而变化, 这一特性为电气制动提供了有利条件。

### 1.3 电气制动力矩与转速的关系

$$M_E = \frac{P_E}{\omega} = \frac{3I_d^2 \cdot R}{2\pi \cdot P n / 60} = K \cdot \frac{I_d^2 \cdot R}{n} \quad (4)$$

其中,  $M_E$ : 电气制动力矩;  $P_E$ : 铜耗功率

从(4)式可看出, 在励磁电流恒定不变的情况下, 电气制动力矩与转速之间成反比关系, 这表明在

收稿日期: 2006-12-22

作者简介: 郭海峰(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事电气设备的维护管理工作。

电气制动时,过早地进行电气制动对缩短停机时间帮助不大。

#### 1.4 各种制动力矩与转速的关系

表 1 制动力矩(或功率)与转速的关系

损耗产生的原因	制动功率	制动力矩
水轮机转轮水阻损耗	$\propto n^3$	$\propto n^2$
发电机风摩擦损耗	$\propto n^2$	$\propto n^2$
轴承摩擦损耗	$\propto n^{2.5}$	$\propto n^{0.5}$
定子绕组铜损耗	常数	$\propto n^{-1}$

各种制动力矩与转速之间的关系如表 1 所示。通过计算及实际运行可以看出,在较高速区内,水轮机转轮的水阻力矩起主要制动作用。而在转速相对较低的区内,定子绕组的短路铜耗形成的电气制动力矩起主要作用。其他的制动力矩随着转速的下降而急剧下降。只有电气制动功率与转速无关。

电气制动过程的持续时间可按下列运动微分方程计算:

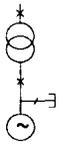
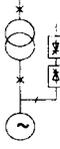
$$t = \left( \frac{\pi n_r}{60} \right)^2 GD^2 \int_0^{\frac{n}{n_r}} \frac{n}{P(n)} dn \quad (5)$$

其中,  $n_r$ : 额定转速;  $n$ : 相对转速;  $GD^2$ : 转动部分转动惯量;  $P(n)$ : 各损耗之和。

#### 1.5 几种常用电气制动实现方式的比较

目前几种常用电气制动的实现方式及其优缺点见表 2 所示:

表 2 几种常用电气制动方式的比较

实现方式	定子三相短路制动	高压侧短路制动	逆变制动
接线示意图			
优点	转动能量消耗在短路的发电机定子绕组里,实现方便	变压器可提供附加制动损耗,制动效果甚佳	能量可以回馈到电网
缺点		高压短路开关操作寿命要求高	容量受电力电子器件功率所限,不能太大
应用情况	世界范围内目前应用最广泛	国内:无;国外:应用较少,主要在前苏联地区	我国的潘家口抽水蓄能电站等

## 2 电气制动在广州抽水蓄能电厂的应用

广州抽水蓄能电厂是目前世界最大的抽水蓄能电厂,装有 8 台 300 MW 的电动发电机组。由于抽水蓄能机组运行工况复杂,要求机组启动、工况转换速度快,因此电气制动就当然地成为了机组减速停机的首选手段。在电气制动与机械制动相配合构成的联合制动系统的作用下,满足了抽水蓄能机组所特有的快速制动的需要。

### 2.1 机组参数

额定功率:300 MW,定子额定电压:18 kV,定子额定电流:10.692 kA,额定励磁电压:330 V,额定励磁电流:1 818 A,转动惯量:3 300  $\text{tm}^2$ ,D 轴同步电抗  $X_d$ :1.21 pu,制动励磁电流:1 090 A,电气制动计算时间:153 s。

### 2.2 电气制动的构成及其相关参数

广蓄电气制动采用了目前广泛应用的发电机端定子三相短路的制动方式。制动电流为定子的额定电流值。电气接线图如图 2 所示。各种情况下的制动时间数据如表 3 所示。

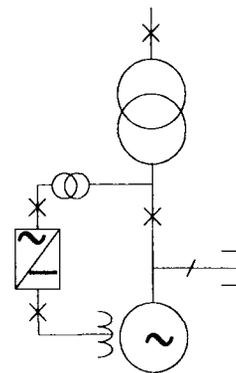


图 2 电气制动接线图

表 3 在各种情况下制动过程时间统计

制动情况(投入速度)	自然减速时间(s)	电气制动减速时间(s)	机械制动减速时间(s)	总时间(s)
正常(电:50% $V_n$ ;机:5% $V_n$ )	180	100	5	285
仅机械制动(20% $V_n$ )	186	/	56	242
故障情况(25% $V_n$ )	143	/	71	214

广蓄电气制动刀的参数如下:型号:SB250,最大电压:24 kV,额定电压:18 kV,额定电流:12 000 A,关合容量:8 000 A(在 6%额定电压下),短时耐受电流:60 kA 3 s。电气制动运行控制流程图如图

3所示。

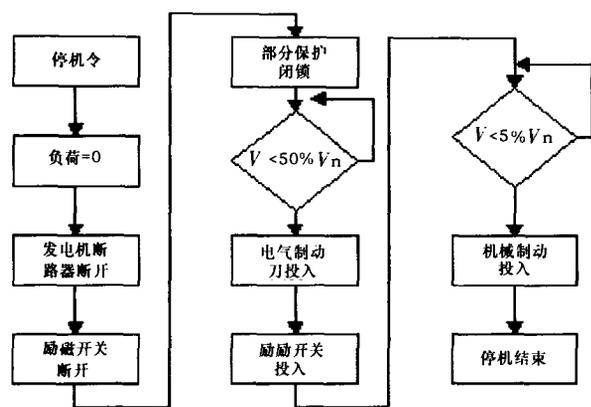


图3 电气制动运行流程图

### 2.3 电气制动期间相关保护的投退情况

由于制动过程是一种非正常的运行方式,故有部分保护在此过程中需要进行闭锁,以免导致误动。根据抽水蓄能电站的实际情况,在电气制动期间需要进行闭锁的保护有:次同步过流保护;相间短路保护;电流不平衡保护(泵工况时需要闭锁发电工况的电流不平衡保护;反之,在发电工况时,需闭锁泵工况下的电流不平衡保护);差动保护;低频保护。

### 2.4 广蓄电气制动的评介

广蓄电气制动系统的设计应该说是比较成功的。运行近10年来相对较可靠、稳定。在制动过程中机组温升小于 $5^{\circ}\text{C}$ ,满足设计要求。运行初期,出现问题多发的主要部位是位置接点,间接传动机构及快速刀闸缓冲块等,经过改良后已解决了类似问题。

## 3 电气制动在实际应用中应注意的几个问题

### 3.1 短路制动刀的选型

进行电气制动时,短路制动刀是关键设备,必须选型合适,否则将影响机组的正常运行,甚至危害机组的安全。在停机开始,发电机仍然按额定转速或略低于额定转速旋转,发电机定子有一定的残压,当短路开关合上时会产生跨越电弧冲击,残余短路电流会出现,如果使用常规的隔离开关,就可能造成触头损坏,因此用作短路的隔离开关应该配备抗电弧触头和备用触头,否则应该采用快速开关或断路器。短路开关的额定电流可以选择得比制动电流略低一些,因为在任何情况下电气制动持续的过程都相对较短。三相联动式驱动是一种比较理想的方式,但在驱动环节上应力求简洁,位置接点的布置也应

尽可能直接,这些都将是提高电气制动刀的可靠性。

### 3.2 控制回路的设计

电气制动控制回路的设计关系到电气制动过程是否安全可靠,因此必须考虑到足够的约束条件和闭锁措施。对于电气制动的投入约束条件可考虑:停机命令给出,断路器在跳闸位置,机组无电气故障,机端电压 $\leq 10\%U_n$ ,转速 $\leq 50\%V_n$ ,导叶在全关位置,励磁开关在断开位置等条件。另外还可在相关条件满足的情况下,对机组是否解列、机组停机命令等条件进行独立判断,以进一步提高其安全性。在制动刀的投入及退出方面,则必须与励磁开关的投退有严格的逻辑闭锁关系,否则将导致定子三相瞬间短路或者带负荷拉刀闸等严重事故的发生。

### 3.3 制动电流的选择

从前面的分析可知,通过调整励磁电流可使定子制动电流增大从而获得更好的电气制动效果。虽然制动过程相对较短,但如果一味追求缩短时间,运行风险将会增加,这对目前正在进行水电厂传统制动方式改造的电厂来说是要慎重考虑的问题,对于改造设计时计算的偏差问题,则需要到现场调试过程中进行必要的修正调整。一般说来,电气制动的制动电流以额定定子电流为标准,在适当追求时间的情况下,1.1至1.3倍额定定子电流的制动电流也是可行的。

## 4 结论

理论及运行经验表明,电气制动是一种可靠、成熟的技术,其具有如下优点:

- (1)简单、可靠,具有良好的制动效果,满足了现代化大型水电厂的制动要求;
- (2)无噪音、污染,大大改善了机组的运行环境,是一种理想的环保技术;
- (3)易于实现自动化控制,适合现代控制技术的要求;
- (4)电气制动与励磁统一规划设计,可减少设备,节省投资。

### 参考文献:

- [1] 许实章,电机学[M].第3版.华中理工大学出版社,1995年.