

# 水轮发电机电制动停机对继电保护影响的分析与对策

周二保 安徽陈村水电站(242500)

**摘要** 针对电制动停机时低频电流对发变组继电保护的影响,采用低频模拟试验的方法,计算分析了负序电流和差动继电器的低频动作特性,结合现场运行经验,提出对误动的保护采取可靠的闭锁措施,对不会误动的保护不必盲目设置闭锁以免降低保护动作的可靠性。文中指出采用电制动停机要考虑减小对继电保护的影响,以提高水电机组安全运行水平。

**关键词** 电制动停机 负序电流继电器 差动继电器 低频动作特性

## 引言

在调峰水电厂水轮发电机正常停机中采用电制动停机技术,较大地改善了水轮发电机运行性能,提高了机组自动化水平,为水电机组的频繁启停调峰运行带来了很大的经济效益。国内在 80 年代推广使用该技术。

但采用电制动停机也导致了一些新的问题出现,其中对继电保护影响比较突出,如不合理安排,将会影响电制动系统及机组的正常运行。

本文就电制动停机对发变组继电保护所导致的问题进行分析并探讨对策。

以我站三台 50MW 水轮发电机组电制动投运 7 年多来的设计和运行经验及对有关继电器的低频模拟试验为前提,根据分析结果提出了继电保护应采取的对策,这样可避免盲目地对继电保护设置闭锁降低保护动作的可靠性,同时对发生误动的保护要采取切实可行的闭锁措施,以提高继电保护的运行可靠性。本文定量地分析了有关继电器在低频情况下的动作特性,研究结果将提高电制动停机系统和机组的安全运行水平。

## 1 电制动停机的特点

(1)电制动投入条件是正常停机,导叶全关、断路器分闸、灭磁、并满足残压、转速条件等。电制动投入的最佳转速值为  $60\sim 50\%N_e$  即  $30\sim 25\text{Hz}$ ,至零转速机组停稳时间约 2min。

(2)电制动停机即发电机定子出口三相短路,转子绕组中加入经三相全波整流的恒定制动励磁电流,以获得停机阻尼转矩。因此,在发电机内部发生故障时,继电保护动作并闭锁电制动,改用机械制动,防止误投扩大事故。

(3)由电制动停机过程录波图可见,电制动投入瞬间发电机定子电流没有任何冲击现象,在定子绕组中始终存在制动电流(取发电机额定电流  $I_e$ ),其电流幅值基本恒定,频率随转速下降而下降,零转速时机组制动停稳,电流由  $I_e$  衰减为 0。

(4)电制动短路线由 FDK 短路电动刀闸在现场的安装位置确定,在变压器或发电机纵差保护区内。由于电制动投入条件设计严密,杜绝 FDK 在机组正常运行时误合。我站 FDK 在主变纵差保护区内,如图 1 所示。

因此,受电制动影响的保护是: a. 发电机负序电流保护 b. 主变或发电机纵差保护

## 2 电制动对继电保护影响的研究现状及闭锁措施的不足

《继电器》1995 年第 1 期 49

有关资料如文<sup>[1]</sup>只是定性地分析电制动对继电保护的影响,目前对继电保护采取的对策是采用电制动投入继电器 ZJ 启动闭锁回路,电制动退出后予以解除。

方法一:采用接触器短接流变二次侧流入继电器的三相电流,不让电流流过继电器以防止触点抖动造成误动。

方法二:对保护直流回路设置闭锁,短时断开误动继电器触点的直流正电源以防止误动造成电制动控制紊乱并可能引起事故。

上述闭锁措施缺乏针对性,现场运行经验表明,闭锁保护不可靠。

如 1990 年 11 月 4 日,我站 1 号机在电制动停机过程中因闭锁失效导致发电机负序过流保护误动跳开运行中的 1 号主变高、中压侧开关。原因是接触器失电,DL-2 负序电流继电器在发电机转速下降至 18~17Hz 时发生误动。对 DL-2 闭锁采用方法一可以防止触点抖动磨损,但闭锁保护是不可靠的。

### 3 电制动对继电保护影响的分析方法

3.1 概述 负序电流、差动继电器一般都是按常规 50Hz 情况设计的,没有低频补偿措施,在电制动过程的低频区,对于继电器中含有电磁元件的电流转换装置,由于铁芯饱和的影响以及 L、C 元件参数的变化,破坏参数平衡,将使不平衡输出增大,在某一频率下,可能大于整定值,启动执行元件引起误动。

另外,低频对有的继电器影响是使动作量的平均值减小,小于制动量,不会发生误动。

为了深入地研究负序电流及差动继电器的低频动作特性,首先对电流及电压继电器进行低频动作特性研究。方法是采用精密变频电源(50~10Hz,  $I_{max}: 2A$ )对 LJ、YJ 进行低频试验,录取同一整定位置下的动作值(有效值)与频率 f 的关系。

#### 3.2 LJ 低频动作特性

表 1 实测低频下 LJ 动作值

型号	50Hz	40	30	20	10	备注
DL-21C	0.5A	0.48	0.47	0.45	0.44	软铁芯,25Hz 后抖动
DL-11	0.505A	0.505	0.495	0.487	0.48	硅钢片,10Hz 后抖动

试验表明,采用硅钢片铁芯的电磁型 LJ、YJ 受低频的影响即动作值变化、触点抖动最小,其次是采用软铁芯的电磁型 LJ、YJ,而晶体管、整流型、线圈串电容的 YJ 受低频的影响最大。

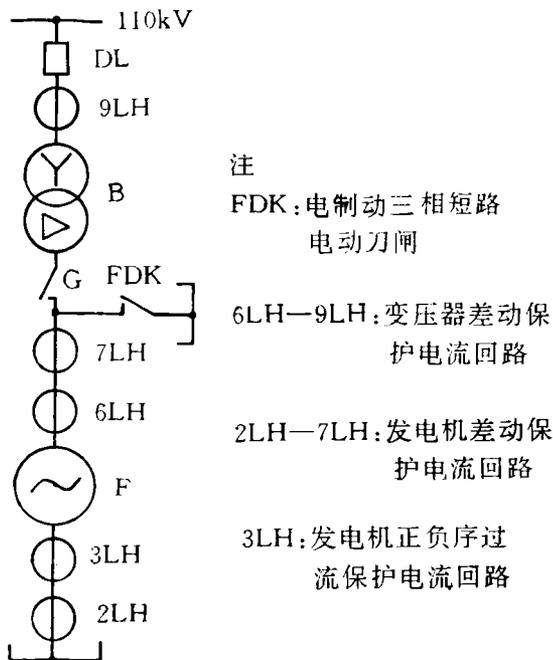


图 1 电制动短路点在主接线中位置

因此在低频时采用 DL-11 型 LJ 做过流保护是可行的,比用 DL-21C 型特性好。

在低频 10Hz 以下,电磁型 LJ 反映的将不是电流有效值,而是其幅值,电流接近动作值时,LJ 随电流波形而抖动。

#### 4 DL-2 负序电流继电器在低频时误动分析

DL-2 采用电抗变 DKB 移相,与电阻 R 构成负序电流滤过器,执行元件是 DL-11 型 LJ,结构原理及元件参数见文<sup>[2]</sup>。为了准确地计算,对 DKB 的参数  $X_k$  和 DL-2 动作电流采用低频模拟试验的实测值。

##### 4.1 DKB 参数 $X_k$ 和 DL-2 动作电流实测值

- a. DL-2 ①-②加电流 2A,⑥-⑩测  $E_2$ ,整理后得  $X_k(\Omega)$ 。
- b. 整定负序动作电流  $I_{dz2}=1.2A$ ,单相法加电流实测动作电流  $I_{dz2}(A)$

表 2 实测低频下 DL-2 的  $X_k$  和  $I_{dz2}$

Hz	50	40	30	25	20	18	17	16	10
$X_k$	0.33	0.26	0.194	0.162	0.13	0.117	0.109	0.103	0.059
$I_{dz2}$	1.2	1.09	0.97	0.92	0.87	0.849	0.837	0.83	0.78

实测 DKB 的  $X_k$  值随  $f \downarrow$  基本呈线性关系。因为 DKB 的  $E_2$  与一次电流频率成正比,即放大高频分量,抑制低频分量。

##### 4.2 DL-2 低频动作特性计算分析

发电机  $I_s=3235A$ ,流变 4000/5A,电制动时流过 DL-2 正序电流  $I_{s1}=4.04A$ ,DL-2 整定  $I_{dz2}=2A$ 。

由表 2:当  $f \downarrow$  到 40% 时, $I_{dz2}$  下降到 72.5%,即  $I_{dz2}$  与  $f$  的关系是非线性的,因此要计及 DL-2 整定值(50Hz、2A)在低频时的折算值(如 20Hz 时为 72.5% $\times$ 2A)。

由负序电流滤过器空载输出电压计算公式:

$$\text{正序(动作量): } U_{mn1} = I_{s1}(R - \sqrt{3}X_k) \quad (1)$$

$$\text{负序(制动量): } U_{mn2} = 2RI_{s2} \quad 50\text{Hz 时, } R = \sqrt{3}X_k = 0.6\Omega, U_{mn1} = 0。$$

1 式中  $f \downarrow \rightarrow X_k \downarrow \rightarrow U_{mn1} \uparrow$ ,若  $U_{mn1} \geq U_{mn2}$ ,DL-2 动作,否则不动作。

表 3 低频下  $U_{mn}$  计算结果

f (Hz)	$U_{mn1}$ (V)	$U_{mn2}$ (V)
18	1.605	1.698
17	1.66	1.674
16	1.703	1.66

$U_{mn2}$  计算结果与实测滤过器空载输出电压

值相吻合(误差偏大 0.1V),若忽略继电器调试误差,在 18~17Hz 及以下 DL-2 将发生误动。

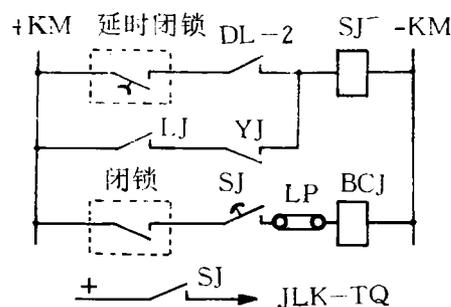


图 2 正负序过流保护  
设置电制动闭锁

与实际情况相符。故对 DL - 2 闭锁措施必须可靠。

现场曾用中间继电器触点短接 DL - 2 电流回路,在低频时因有分流产生导致负序过负荷继电器动作。而采用接触器比用中间继电器所产生的分流要小得多。

#### 4.3 DL-2 可靠的闭锁措施

(1)DL-2 在低频区 30 ~ 25Hz 内即电制动在 60%Ne 投入后的 10 多秒内,不会发生误动,因此,作为判断 FDK 刀闸断相及退出该保护的时间是足够的,可采用延时退出保护的方法。

FDK 断相时相当于两相短路制动方式,负序电流引起转矩大波动,对机组主轴安全极为不利,而目前国内机组对此没有采用有效措施。本文提出的利用 DL - 2 在 30 ~ 25Hz 范围内进行判断 FDK 合闸状态是可行的,若发生断相,DL - 2 能立即动作跳开整流电源交流侧 JLK 开关,以切断制动励磁电流,确保机组安全。

(2) 机组在电制动时,可能因其它故障引起发电机电流大于额定值,若达到正序过流保护的的动作值,LJ 将会动作切断制动励磁电流。

综合上述考虑,对 DL - 2 闭锁采取的措施是:

a. 电制动投入时不闭锁 DL - 2,当 f 下降至 25Hz 时启动接触器短接流入 DL - 2 的三相电流,或短接负序滤波器输出  $U_{mn}$ ,不让电流流过执行元件,以防止误动。采用后者比较安全。

b. 对正、负序过流保护直流控制回路闭锁改进如图 2

用时间继电器 SJ 瞬动触点跳开 JLK 开关。

另外,考虑到电制动过程中,若控制电源消失,将会使闭锁回路失效而引起保护误动,为此采用电制动整流电源交流侧流变回路的电流继电器启动保护直流回路的闭锁继电器,对 SJ 延时输出触点进行闭锁,以避免我站 1 号机发生的事故。

这样,对 DL - 2 闭锁在交、直流回路上实现了双重化,可靠性大大提高。

电制动控制采用可编程控制器和微机测速,实现上述保护闭锁的自动投切是方便可行的。

#### 4.4 电容移相式负序电流继电器低频动作特性简述

晶体管负序电流继电器采用变流器 LB、移相电容 C、R 构成负序电流滤波器,因 LB 对不同 f 的电流变换几乎是相同的,故忽略低频对其影响。

将 1 式中  $X_k$  换成  $X_c$  则  $f \downarrow \rightarrow X_c \uparrow \rightarrow U_{mn} \downarrow$ ,  $U_{mn}$  不平衡输出经整流后,在某一频率下大于整定值,启动执行元件造成误动。由于参数  $X_c$  (与 f 成反比) 比  $X_k$  受  $f \downarrow$  的变化影响大,因此电容移相式负序滤波器不平衡输出受  $f \downarrow$  的变化影响也较大,低频下执行元件的接点抖动较严重。要根据现场情况采取相应的闭锁措施。

#### 5 差动继电器低频动作特性分析

由于 FDK 在纵差保护范围内,电制动时在纵差保护差回路中将形成低频不平衡电流,必须分析对差动继电器的影响。

##### 5.1 BCH - 1 型差动继电器

BCH - 1(2 或 4) 基本结构采用速饱和变流器,执行元件是 DL - 11 型 LJ。

取  $W_{Pl} + W_c = 39$ , ③ - ④ 加电流 I(A), ⑨ - ⑩ 测电压 U(V), 见表 4。

可见 BCH 型差动继电器的速饱和变流器在低频电流作用下,使铁芯饱和导致差动线圈和

二次线圈间的传变作用变坏,增大了继电器的动作电流。实测电制动25Hz时,BCH-1⑨-⑩电压为0.5V,随 $f \downarrow$ 电压逐渐衰减到0。

现场2、3号主变差动BCH-1整定 $W_c = 10$ ,即BCH-1动作值为 $I_{daj} = 6A$ 。而电制动时差电流 $I_d = 4.04A < I_{daj}$ 。

因此,主变差动在电制动过程中不会误动,不必对保护直流回路设置闭锁,以免降低差动保护的运行可靠性。

表4 实测低频下BCH-1执行元件状态

Hz	50	40	30	20	15	10
U	1.29	1.07	0.82	0.547	0.41	0.257
I	1.54	1.76	2	2	2	1.6
状态	BCH-1动作		BCH-1不动作			

我站1号主变系220kV自耦变压器,差动保护采用BCH-4继电器,1号机电制动时将主变差动退出,即对保护直流回路设置闭锁。实际观察电制动时BCH-4接点未抖动。

设置闭锁是考虑到电制动低频短路电流与主变高、中压侧负荷电流大小、相位关系不是固定的,可能因系统故障的扰动而误动。

由BCH继电器低频动作特性和BCH-4的整定值计算分析表明:对于区外穿越性故障,继电器具有制动特性,使制动磁势远大于动作磁势,BCH-4不会误动。

对于区内故障,尽管有低压侧电制动低频电流使铁芯饱和(差动保护在低频时灵敏度要降低,参见BCH-4直流助磁特性),但动作磁势仍大于制动磁势,BCH-4能可靠动作,起到确保主变安全运行的作用。

因此笔者认为,我站BCH型主变差动保护在电制动过程中不会发生误动,而人为设置的闭锁措施只能降低主变差动保护的运行可靠性,所以有必要解除对主变差动保护的闭锁。

在主变采用微机变压器保护时,考虑在低频电流作用下,微机保护由于采样频率及算法中涉及频率因素等原因不能完全正常工作,另外保护动作电流较小,易引起误动。因此采用电制动ZJ空触点引出至微机保护,使软件对主变低压侧采样数据剔除,高、中压侧采样数据有效,此时微机保护仍能起保护作用而不必退出。

国外有采用在FDK上装三相流变,接入差动保护电流回路中,这样在电制动时因电流平衡,保护不会误动,因此不需将差动保护退出。

## 5.2 LCD-5型差动继电器

整流型差动保护的整定值小于发电机或变压器的额定电流,因此电制动低频电流对其影响不同于对BCH型差动继电器的影响。

实测低频下LCD-5测试孔输出电压及执行元件状态,经分析得出LCD-5低频动作特性。在 $f \downarrow$ 到34Hz时,LCD-5的动作电流为50Hz时的2倍,因此在整定2A时,LCD-5在50~34Hz内会动作,而在34~30Hz内为临界状态,在30Hz以下不会动作。实际上电制动在60%Ne时才投入,故在电制动投入后,LCD-5不会发生误动,不必采取闭锁措施。

若在70% $n_e$ 时投入电制动,因LCD-5会误动,则要采取闭锁措施。LCD-5的上述低频动作特性是由DKB的低频特性决定的。

在现场安装FDK位置有选择的情况下,应合理选择以减小对发电机或主变差动保护的影响。对三绕组变压器,因机组电制动时主变仍运行,为了不影响主变差动保护运行,应尽量选择FDK安装在主变纵差保护区外。

## 6 电制动对发电机其它保护影响简述

### a. 对发电机定子接地保护的影响

电制动工况时发电机定子绕组中产生三次谐波电势,对于发电机采用消弧线圈接地保护方式,在电制动停机转速降至 $1/3n_e$ 产生三次谐波电压谐振时,使消弧线圈二次电压值升高,将导致零序过电压型定子接地保护误动。

解决的办法是:将FDK短路接地,以消除三次谐波电压谐振回路中的容抗变量,从而防止了三次谐波电压谐振的发生。

### b. 对发电机差动断线监视信号CJJ的影响

FDK在发电机纵差保护区外,但在机组电制动快停稳时,CJJ动作发信号。由录波图可见,停稳瞬间发电机定子电流衰减含有较大的非周期分量,因在极低 $f$ 下流变饱和的影响。由此在差回路产生短暂的不平衡电流,使CJJ动作发信号。对此用电制动ZJ接点将CJJ的电流线圈短接。

### c. 发电机横差保护反映中性点电流,受低频电流影响很小,没有发生误动。

## 7 结束语

综上所述,本文通过实例分析了负序电流和差动继电器在电制动低频电流作用下的低频动作特性。可见,电制动工况下继电器的研究必须进行定量分析,继电器结构不同,动作行为也将有所不同,要由试验结果定论,采取针对性的措施,才是有效的。对误动的保护要采取可靠的闭锁措施,为提高保护的可靠性。对不会误动的保护不必盲目设置闭锁。

现场继电器种类较多,原理构成有差别,可采用本文的分析方法,以便采取有效的措施。

电制动对继电保护的影响分析还需不断积累经验,以便提高电制动工况下继电保护的运行可靠性,使电制动技术在水电机组上发挥更好的作用。

## 参考文献

- 1 李永生. 水轮发电机组电气制动停机问题的综合分析处理. 大电机技术,1989年1期
- 2 水利电力部电力生产司编. 保护继电器校验. 电力工业出版社,1980
- 3 陈增田著. 电力变压器保护. 北京:水利电力出版社,1989
- 4 周二保. 可编程控制器在电制动控制中的可靠性设计. 华东电力,1994.3
- 5 陈村水电站电制动停机系统鉴定会资料,1990年12月