

抽水蓄能电站机组的起动方式 及其低频特性对保护的影响

姚晴林 祖伟 赵玉乃 温建中 宋聚忠 魏剑啸 金全仁

合肥工业大学(230009) 华北电业管理局(100053) 许昌继电器研究所(461000)

【摘要】 抽水蓄能电站机组在作为同步电动机带动水泵工况下的起动过程中可能有相当时间的低频区,本文论述各种不同的起动方法及其低频特性对机组保护的影响,得出了有价值的结论。

【关键词】 抽水蓄能电站 电动机起动 低频特性 机组保护

我国正运行中的抽水蓄能机组的保护装置全部是进口的,此类国产化的保护设备正研制中。抽水蓄能机组(以下简称主机,图中以 G/M 表示)作为同步电动机带动水泵运行的工况时,必然有同步电动机的起动过程,而同步电动机有许多不同的起动方式,起动方式不同则起动过程中的电压电流的低频特性也不同,对保护的影响也各异。因此,深入分析抽水蓄能机组各种不同的电动机起动方式及其低频特性是研制抽水蓄能机组保护装置的首要问题之一,以下按同步电动机起动方式的不同分项研讨之。

以下论述的每种电动机起动方式都必须在起动之前先向水轮机的转轮室打入压缩空气,将转轮室中的水压入尾水管,使转轮在空气中起动,以减小阻力,降低起动功率,有效地减小电动机的起动电流。转轮在水中的起动功率(对导叶关闭时的零流量而言的起动功率)可能达到额定功率的 40%~50%,而在空气中的起动功率最多不超过额定功率的 6%~8%,一般仅为 3%~5%。起动成功后,同步电动机并网,然后把水轮机转轮室中的空气排出,尾水管水面随空气排出而逐渐上升,待转轮室中的水流连成一体形成水压后,再把主阀及导叶打开使水泵正常运转抽水。

1 绕线转子式感应电动机起动

用一台专用的小容量绕线转子式感应电动机装在主电机的顶上,与主机同轴来起动主机。该起动用的感应电动机容量一般为主机的 6%~8%,它比主机少一对或几对磁极,它相应的同步转速比主机高一些,它的转子回路中要接入用于调节转速的液体可变电阻及其循环冷却系统,它的电源引自主机机端电压母线(通常经电抗器)、或引自主变的第三绕组、或引自厂用电系统,分别见图 1a、b、c 所示。

感应电动机(M)加上电源,主机(G/M)由感应电动机带动升速,它们共轴,主机一开始升速就加励磁,所以当主机未达额定转速前的升速过程中,其电压具有低频特性。当转速达到同步速,符合准确同期条件时,准确同期装置自动将主机同步并列到电力系统中,然后再跳开感应电动机的电源。

收稿日期:1996-03-02

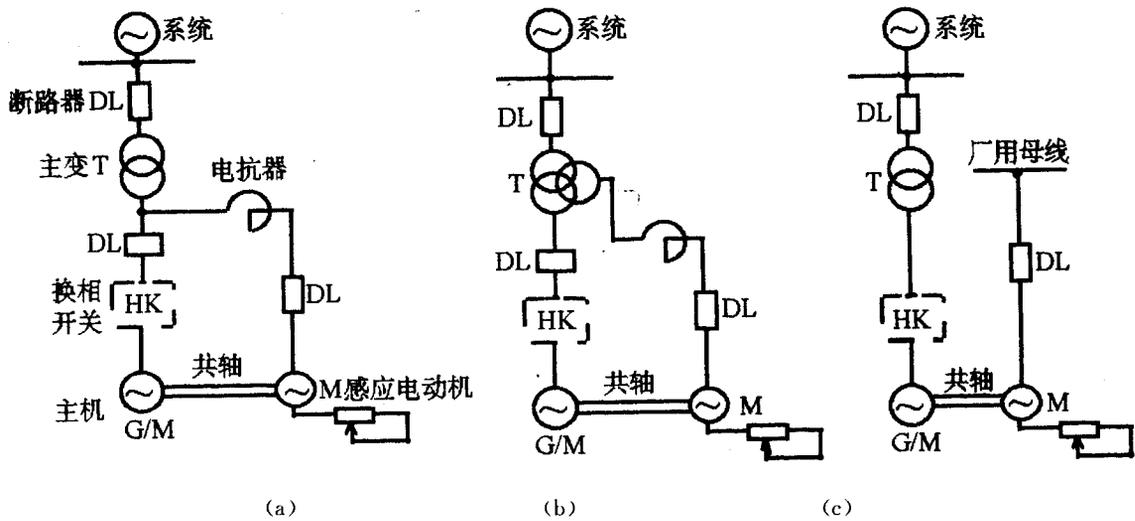


图1 用小感应电动机起动主机的电气接线

这种起动方法的优点是适应性最强,感应电动机还可以用作主机停机时的电气制动设备,又可以随时将主机带动起来以便检查各部分的状况。该起动方法的缺点是起动时间长,在压水情况下起动时间为5~8分钟,比同步起动、半同步起动、异步起动方法的起动时间要长;感应电动机的设备会增加主厂房的高度,加大了旋转轴系的长度,从而降低轴系的临界转速。这种起动方法适用于单机容量大、机组台数少的场合。对机组台数多的电站,感应电动机的起动方法通常与下述的同步起动方法联合使用,感应电动机负责起动最后起动的那台主机,而其他主机都用同步起动方法起动。

2 同步起动

同步起动又叫背靠背起动,用本电站(或相邻电站)的一台水轮发电机组作同步发电机运行,被起动的机组作为同步电动机。先进行倒闸操作,使同步发电机与同步电动机在电气上连接起来,二者分别加上励磁(通常发电机加空载额定励磁,电动机加80%空载额定励磁)。先使发电机转起来产生低频电能,直接加在电动机的定子上,电动机在同步转矩作用下跟随发电机逐渐升速。水轮发电机的导叶缓慢开启,发电机转速上升,电动机亦随之同步升速。转速达到额定转速的80%时,投入各自的励磁调节器;达到额定转速的95%时,发电机置于调速器的控制下。待电动机符合准确同期条件时,准确同期装置自动将电动机并入电力系统,然后跳开作为起动用的发电机的断路器,切断发电机与电动机之间的电气联接,作为起动用的发电机停机,为起动另一台同步电动机作准备。如果该台原作为起动其他电动机的发电机组最后也要作为电动机—水泵运行,它必须采用其他的起动方法(例如采用上述的小容量感应电动机起动方法)。

同步起动方法的起动时间较短,为2~4分钟;同步起动的调整及操作比较复杂。

显然这种起动方法,在同步电动机未并入电力系统之前的起动过程中,转速低时,发电机及电动机的电压电流具有低频特性,因起动一开始二者的励磁就加上了。

3 半同步起动

半同步起动又称为异步—同步起动或低频起动或降频起动。抽水蓄能电站中,一台机组作为同步发电机,被起动的机组作为同步电动机。发电机、电动机、电力系统三者的电气接线见图2所示,首先“起动断路器 DL”及“工作断路器 DL”都处于断开状态,发电机及电动机都未加励磁。

半同步起动过程中,机组转速 n 与时间 t 的关系曲线见图3所示,图中的 $t = 0$ 为发电机由零转速开始转动,水轮机的导叶在一定的开度下发电机逐渐升速。在 $0 \sim t_1$ 的阶段内,发电机不加励磁。待 $t = t_1$,发电机的转速 n 大约达到额定转速 n_e 的 80% 时(图3中的 a 点),合闸“起动 DL”,并同时合闸发电机的励磁开关,发电机加上励磁,产生电压并施加到电动机上;此时由于电动机尚未加励磁,所以产生异步转矩,电动机开始进入异步起动阶段并逐渐加速,此阶段内发电机因消耗了能量而水轮机导叶开度并未增大,致使发电机的转速下降。 $t = t_2$,电动机转速接近发电机转速时(图3中的 b 点),电动机加上励磁,产生同步转矩,电动机开始进入同步起步阶段,电动机和发电机同步加速。水轮机以预定的速度开大导叶,发电机置于调速器的控制下,两台同步运行的机组一起升速到额定转速 n_e 时(图3中的 c 点),以准确同期方式合闸“工作 DL”,使电动机并入电力系统,然后再断开发电机与电动机之间的“起动 DL”。

半同步起动方法的起动时间为 3 ~ 5 分钟。多台电动机连续起动时,用作发电机的机组不需要停机,整个电站的操作是迅速的。其缺点像同步起动方法一样,需预先通过试验来确定加速过程及投入励磁的时间。

在图3的 $0 \sim t_1$ 阶段,“起动 DL”及“工作 DL”都断开,发电机升速但无励磁,定子无电压,因此发电机定子短路时无短路电流,不存在电压电流的低频区。 $t_1 \sim t_2$ 阶段,“起动 DL”合闸,而“工作 DL”仍断开,发电机有励磁,电动机无励磁,无论是发电机定子短路或电动机定子短路,短路电流都仅来源于发电机电势,因为这阶段发电机的转速 n 不低,所以短路电流的频率也不低,无低频区。 $t_2 \sim t_3$ 阶段,发电机及电动机都加励磁,而它们的转速 n 较高,所以不管是发电机定子短路或电动机定子短路,短路电流的频率都较高,也无低频区。可见,半同步起动方法的起动过程中并无低频区,不存在低频短路电流对继电保护的影响。

4 静止变频器起动

变频起动是利用可控硅变频器产生频率可变的交流电源对同步电动机进行起动,这种方法与用另一台发电机实现的同步起动方法相似(见前述第二项)。变频器是一个“交流变直流再

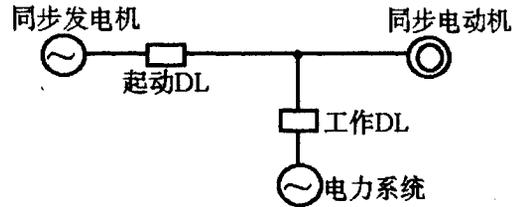


图2 半同步起动的电气接线

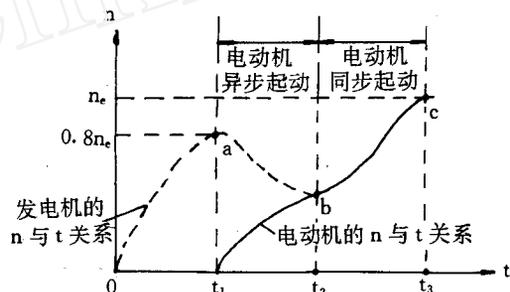


图3 半同步起动过程中 n 与 t 的关系

- a 点 —— 合闸“起动 DL”, 发电机加励磁;
- b 点 —— 电动机加励磁;
- c 点 —— 合闸“工作 DL”, 电动机并网。

变交流”的逆变装置,从厂用交流电源取得电能,见图4,两组可控硅之间有滤波电抗器,变频器以可变频率的交流电供给待起动的同步电动机。同步电动机起动前就加上空载额定励磁电流。合闸“起动DL”,电动机开始起动,电动机低速时,逆变器的频率由反映大轴转角位置的装置控制;转速稍高时,逆变器的频率跟踪电动机的转速,在电流控制下电动机加速到同步转速,以准确同期方式合闸“工作DL”,将同步电动机并入电力系统,然后再切断“起动DL”,以便变频器去起动下一台同步电动机。

变频起动的起动时间约为5~10分钟,是所有起动方法中起动时间最长者。这种起动方式的基本设备价格高,占地面积大,它主要用于单机容量大、机组台数多的抽水蓄能电站。

采用变频器起动同步电动机,在起动的初始阶段转速较低时,若发生电动机定子短路,变频器供给的短路电流及同步电动机的反馈短路电流都频率低,所以在起动过程中有低频区。

5 异步起动

异步起动是同步电动机的励磁绕组在被短接的情况下(既无励磁),直接将电动机并入电网;利用转子磁极内的阻尼绕组所产生的异步力矩使机组起动并加速,在接近同步转速时再加上励磁拉入同步。显然,在这种起动方式的起动过程中,在电动机转速较低时假若发生定子短路故障,由于电动机无励磁,所以短路电流完全来自电力系统,短路电流的频率为正常值,不存在低频区。

按异步起动时施加电压方式的不同,可分为全电压异步起动、降压异步起动和部分绕组异步起动三种。

(1) 全电压异步起动

又称为直接起动。合闸主断路器(即正常运转时的工作断路器),电网电压经主变压器全部加于无励磁的同步电动机,机组以感应电动机方式升速到接近额定转速时,给上励磁,机组被拉入同步运行。全电压起动的优点是起动力矩很大,其起动时间在所有起动方法中最短,仅约30s,电气接线最简单,缺点是起动电流很大,为额定电流的2.5~4倍,在起动瞬间使电网受到较大冲击,电网电压明显下降,同时起动过程中阻尼绕组会产生热应力和严重发热,定子绕组也受到很大的机械应力。全电压异步起动方式只能应用于中小型的抽水蓄能机组。

(2) 降压异步起动

机组在无励磁的情况下投入起动断路器,电网电压通过主变压器抽头或在起动回路中加入串联电抗器而实现降压起动。当机组作为感应电动机运行接近额定转速时投入励磁,使机组进入同步电动机运行工况,就断开起动断路器,合闸工作断路器(即主断路器)使机组加上全电压运行抽水。降压起动相对于全电压起动来说,对电网的冲击减小了,但起动力矩也降低,起动时间也长些。

(3) 部分定子绕组异步起动

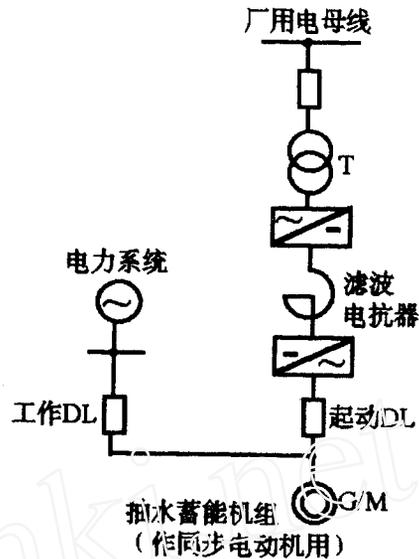


图4 静止变频器起动方法的电气接线

如果抽水蓄能机组的定子绕组是分段多支的,起动时可只作用其中部分绕组,以减小起动电流,起动完成后再接入全部定子绕组。

综上所述,抽水蓄能机组在电动机—水泵工况下的起动过程中,当采用半同步起动方法以及各种异步起动方法时,均无低频区,而当采用同步起动方法、变频器起动方法以及连轴的专用小容量感应电动机起动方法时有低频区。尤其是当采用同步起动方法时,被起动的同步电动机与另一台作起动电源用的同步水轮发电机之间有电的联系,如果在起动过程中转速较低时,电动机定子或发电机定子或二者之间的连线任一处短路故障时,短路电流来自双方,而双方的容量都很大,则短路点的总短路电流很大,危害大,且短路电流的频率低,这种低频特性的短路电流对常规继电保护装置的影响必须认真对待。当采用小容量的专用感应电动机起动方法时,虽然也有低频区,但该感应电动机容量很小,仅为被起动的抽水蓄能主机组容量的 8%~10%,而且起动较快,它与主机组之间连轴,并无电的联系;若在起动过程中主机组定子回路发生短路故障,短路电流只是该主机(同步电动机)供给的电流,低频特性的短路电流不大,危害较轻。当采用变频器起动方法时,在起动过程中变频器虽与被起动的主机组(同步电动机)有电的联系,但变频器的容量很小,仅为主机组容量的 5%~8%,在起动过程中若发生主机组定子回路短路,同理低频特性的短路电流也不大,危害较轻,而且变频器自身有保护装置,可作为被起动的主机组的间接保护。

本文上述理论分析得出的结论,刚巧可由 1975 年美国 IEEE 继电保护分会撰写的有关抽水蓄能电站继电保护装置实际应用的统计数字所验证,该文^[1]总共统计了当时美国大古力等 18 个已运行的抽水蓄能电站总计 80 台机组的继电保护装置,这些保护装置几乎全部是电磁型或感应型或整流型的模拟式保护(当时美国的晶体管分立元件式保护装置处于开始应用阶段,集成电路式及计算机保护尚未投入商业运行)。在这 18 个电站共 80 台机组中,仅有路丁顿电站(6×314MW)及沃拉斯电站(4×54MW)2 个电站共 10 台机组采用同步起动方式,它们的继电保护装置除常规保护外,还装设了针对抽水工况下同步起动过程中低频区的保护,称为次同步过电流继电器(即低频过流继电器),它是一个动铁式过流继电器,在我国习惯上称为“Z”字形舌片式电磁型过流继电器,其动作力矩 M 正比于 I^2/δ (I 为继电器线圈中的电流, δ 为磁极与 Z 字形动舌片之间的气隙长度,由于 M 正比于 I^2 ,所以该继电器能应用于交流或直流,其灵敏度基本上不受电流 I 的频率影响,当频率降低到 15Hz 以下时,其动作值接近于直流动作值;采用这种过流继电器作为机组起动过程中转速低时差动保护的补充保护,当机组同期并入系统后,该过流继电器的跳闸回路被闭锁,退出运行了。IEEE 这篇论文中其余的 16 个电站共 70 台机组都不采用同步起动方法(其中采用异步全电压起动的有 5 个电站 31 台机组,采用异步降压起动的有 4 个电站 14 台机组,采用半同步起动的有 1 个电站 4 台机组,采用变频器起动的有 2 个电站 7 台机组,采用小容量专用感应电动机起动的有 4 个电站 14 台机组),这 70 台机组的继电保护装置都未装设针对抽水工况下起动过程中的低频区的保护(未装设 M 正比于 I^2 的过流继电器),完全是常规的保护。我们认为其根本原因是在各种起动方法中,唯独同步起动方法的低频区危害最大,而其他起动方法或者无低频区(如半同步起动及各种异步起动)或者虽有低频区但低频区的危害较小(如变频器起动及小容量专用感应电动机起动)。

国外一些 70 年代文献记载抽水蓄能机组在作为同步电动机带动水泵的工况下的起动过程中所出现的低频特性对电磁型、感应型及整流型某些保护装置的影响较明显,尤其是对感应型保护,因为这些装置有较大的电容电感元件,其容抗 $1/\omega c$ 及感抗 $L\omega$ 受频率影响较大,从而明显影响保护的動作特性。七十年代旧式电磁型纵差动保护的速饱和变流器(如(下转 34 页))

格。

不均匀步长表格可以用多种方式获得,比如用 2.1 节介绍的确定 $[x_i, x_{i+1}]$ 的方法。这里介绍一种简便方法。

设开方结果的变化范围为 $[0, X_N]$, 在 $[0, X_N]$ 的第一个区间 $[0, x_1]$ 取步长 $\Delta x = x_1$ 为基准, 第 i 个区间步长为:

$$\Delta x_i = K^i \cdot \Delta x \quad (38)$$

K 可在 1.6 ~ 2.0 内取值。区间上界 x_{i+1} :

$$x_{i+1} = x_i + K^i \cdot \Delta x \quad (39)$$

查表得到 $x_i^2 < x^2 < x_{i+1}^2$, 取迭代初值 $x_0 = \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1})$, 按下式:

$$x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_n + c/x_n) \quad (40)$$

进行迭代。为加快收敛性, 对上式可作点小改进, 取:

$$x_{n+1} = \frac{m}{2}(x_n + c/x_n) \quad (n = 0, 1, \dots) \quad (41)$$

m 为加速因子, 严格推导 m 表达式也无必要。根据图 1, 牛顿法每次迭代结果 $x_n \geq \sqrt{c}$, 因此 $m \leq 1$, 计入 m 的简单办法是将迭代结果的低字节在第一、二次迭代后去掉几个误差限。比如第一次迭代后去掉 6 个误差限, 第二次迭代后去掉 1 ~ 2 个误差限。

将不等步长表格与牛顿迭代相结合, 在精度要求相同条件下, 基本上满足各区间迭代次数大致相同。

3 结论

本文在分析牛顿迭代开方算法和快速查表算法的基础上, 介绍了两种改进算法, 减少了存储容量, 降低开方所需时间, 具有实用价值。

参考文献

- 1 李仁俊等. 电力系统动态电量的实时测量及快速电量变送器. 电力系统自动化. 1991. 6
- 2 胡德功等. WDB-1 型微机电量变送器. 电力系统自动化. 1990. 5

(上接 14 页)我国的 BCH 型差动继电器)的材料及设计制造工艺水平较低, 当频率低时其传变能力及差动保护的灵敏度下降。但是, 即使在七十年代, 国外文献报导电子型继电保护产品的低频特性相当好, 例如日本的水殿抽水蓄能电站的机组保护为晶体管分立元件型的常规保护, 七十年代末通过试验证明其低频特性符合安全运行的要求。我国潘家口水电站及十三陵水电站等抽水蓄能机组的继电保护是进口的集成电路型及晶体管分立元件型产品, 都是常规的保护, 未设置针对起动过程中低频区的特殊保护及特殊措施。

现代计算机型机组保护都具有频率自动跟踪措施, 在低频时保护的算法及动作特性不受影响。此外, 我国不少制造保护装置用的电流电压互感器的厂家已引进八十年代日本及西方的 R 型铁芯的先进技术, R 型铁芯材料采用铁损极小的高磁通密度的冷轧硅钢带, 铁芯横截面为圆形, 铁芯柱不再切割分开, 漏磁很小, 互感器的传变能力及精度显著提高。因此, 当采用了频率自动跟踪技术、合理的算法以及高性能的电流电压互感器, 可以认为现代研制的抽水蓄能机组微型保护装置能满足起动过程中低频区的要求。

参考文献

- 1 该文刊登于 IEEE Transactions on Power Apparatus and System No. 3. 1975

RELAY

CN41—1121/TM

ISSN 1003—4897

Relay Editorial Board

Xuchang Relay Research Institute

Address:183 Jianshe Road Xuchang China, Postcode:461000

No. 3(Sum 95)

August 25 1996

A Quarterly

CONTENTS AND ABSTRACTS (Partial)

THEORETICAL STUDY AND CALCULATION

Split-phase Current Differential Protection Using Fault Components Wu Yekai, et al(4)

A new scheme of utilizing phase current fault component to realize split-phase current fault component differential protection and utilizing zero-sequence currents of both ends to realize zero-sequence current differential protection is presented basing on split-phase full current differential protection. On the precondition of assuring enough preventability against fault beyond reach, the protection has very high sensitivity in high resistive fault within reach on heavy load.

Key words: fault component current differential, zero-sequence current differential, microprocessor-based line protection

The Influence of Start Methods And LF Characteristic of Pump Storage Group on Protection Yao Qinglin, et al(10)

There may be a LF zone of long term during start process of pump storage group which, as a synchronous motor, drives pump. The influence of different start methods and their LF characteristic on pump storage group protection is discussed and a valuable conclusion is yielded.

Key words: pump storage group, motor start, LF characteristic, group protection

A Digital Narrow-Band Filter for Microprocessor-Based Protection Xiong Xiaofu, et al(15)

A method of using frequency sampling to design a narrow-band digital filter for microprocessor-based protection is introduced and the method is used to design a digital filter to filter fundamental component. Comparing with Fourier full-cycle filtering method, it has more advantageous in restricting nonperiodic component. The application prospect of the method in the microprocessor-based protection is indicated.

Key words: digital filter, narrow-band, frequency sampling, microprocessor-based protection

A daptive Impedance Relay for Short Line Fan Chunju, et al(18)

According to the small setting value and the characteristics of the short line and its fault, an adaptive impedance relay for short line has been put forward in this paper on the basis of the detailed analysis of circular directional impedance relay, reactance relay and quadrilateral impedance relay. The relay posed takes full advantages of the calculating and judging capability, with the reactance relay measuring short circuit impedance, the directional impedance relay directing correctly. This relay is able to protect big transition resistance and avoid the load impedance. When used as single phase ground relay, it is easy to be made to protect transition resistance adaptively.

Key words: short line, impedance relay, protection, adaptive

Research on Microprocessor-Based Comprehensive Induction Motor Protection Device Luo Wenguang, et al(21)

For reasons of higher damage rate of domestic motor in service, a power plant desired to instal a new protective device on its large asynchronous motor. The author took part in the development of the device. The device is a microprocessor-based protection device using 8031 as CPU. The design principle and method of its software and hardware are introduced. Simulation experiment has shown that the device is better than conventional protection device (e. g. electro-magnetic, rectifier and transistor types).

Key words: microprocessor-based comprehensive protection device, thermal simulation equation, operating characteristics

Computer Setting Calculation for Bus Differential Protection Wang Xiang, et al(26)