

抽水蓄能电站 SFC 的应用与参数优化

单 华¹, 彭宇菲², 徐 钢¹

(1.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2.南京师范大学, 江苏 南京 210023)

摘要:静态变频启动装置(SFC)作为抽水(水泵)工况启动的变频启动电源,是以转速调节器为基础的设备,主要用于向机组施加以转矩,将其拖动至电动机方向期望的转速,从而使机组并网。本文阐述了 SFC 的基本工作原理、主要设备、作用和启动流程,并分析和总结了在启动过程中遇到的问题及处理方法。

关键词:静态变频启动装置(SFC);抽水调相;转子位置;参数优化

中图分类号:TV743

文献标志码:B

文章编号:2096-3203(2017)01-0109-04

静态变频启动装置(SFC)是抽水蓄能电站的关键设备,其作用是在机组水泵工况运行时,向电机定子注入变频电流,拖动机组转子平稳加速直至并网。我国 SFC 系统主要依靠进口,虽然已初步工程应用,但尚未实现批量生产,随着国内 SFC 技术应用日渐成熟,相信在不远的将来能够国内抽水蓄能电站广泛应用国产 SFC。以下以溧阳抽水蓄能电站为主,对其进行介绍。

溧阳抽水蓄能电站地处江苏省西南部。地下厂房安装了6台单机容量为250 MW的混流可逆式水泵水轮电动发电机组,总装机容量1500 MW,担负电网的调峰、填谷、调频、调相、事故备用等任务。此性能对以后的机组检修或轴系平衡检测有极大的作用。

1 SFC 主要设备及保护配置

溧阳抽水蓄能电站未设置背靠背启动方式,其机组电动工况启动方式为 SFC 启动,共设有 2 套 SFC,既可同时运行,也互为备用。如图 1 所示,第一套 SFC 电源取自 2、5 号主变压器低压侧离相封闭母线,两路电源互为备用;第二套 SFC 电源取自 3、6 号主变压器低压侧离相封闭母线,两路电源互为备用。

该站 SFC 采用 GE 公司所提供的 SD7000 设备。其配套的容量为 18 MW SFC,具备 240 s 内完成机组从 0~300 r/min 的启动的能力,该容量的 SFC 拖动 1 台发电-电动机在同步转速下运转可以不受时间限制。

1.1 SFC 主要设备及辅机

SFC 主要由 2 个并联连接的 12 相脉波的整流-逆变装置、输入电抗器、输入变压器、输入侧暂态过

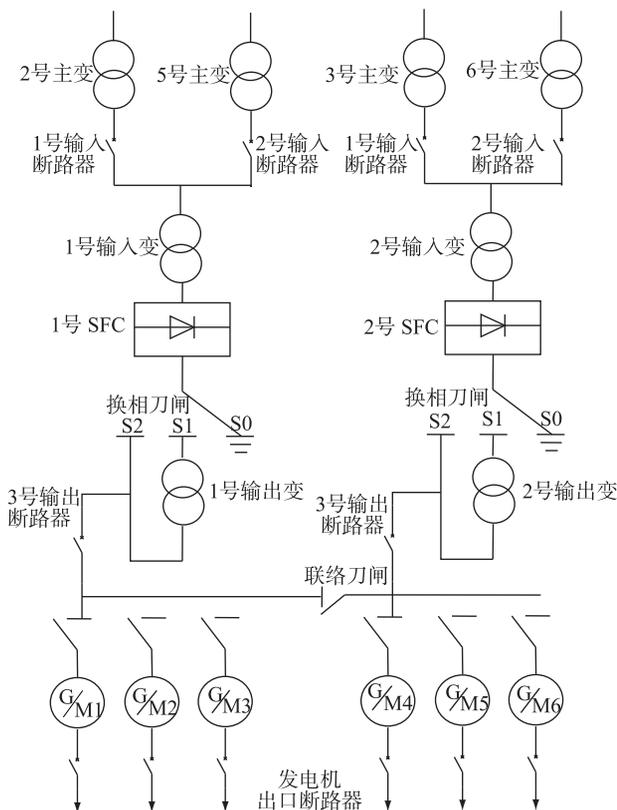


图 1 SFC 系统一次示意图

电压保护装置、直流平波电抗器、输入/输出断路器、隔离开关、输出电抗器、输出变压器、输出侧暂态过电压保护装置、冷却系统、控制、保护和监测系统、转子极位测量装置、测速装置等组成。

SFC 一般分为他控变频和自控变频 2 种,他控变频是用独立的变频电路向被启动的电动机组供电,而自控变频则由转子位置检测器来控制变频电路触发脉冲,溧阳抽水蓄能电站采用前一种控制方式。

1.2 SFC 继电保护

SFC 系统保护范围涵盖所有 SFC 一次设备,即输入变、格里兹桥(网桥侧与机桥侧)、直流电抗器、

输出变。输入变与输出变作为变压器保护进行配置,一般有差动保护,速断过流保护,限时速断保护,过负荷保护,单相接地保护,非电量保护。需要说明的是,输出变由于是变频电气量,因此保护采样应含滤波模块。

格里兹桥通常配置差动保护,由变流桥本体实现。SFC 网桥侧为工频电流,机桥侧为变频电流,如何将机桥侧变频电流转换成工频校正电流是 SFC 保护的难点之一。已有装置中包括比率制动差动保护,其动作方程为:

$$\begin{cases} I_d > \max(I_{qd}, K_{set} I_r) \\ I_d = |I_{nb} - I_{mb}| \\ I_r = (|I_{nb}| + |I_{mb}|) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{nb} 为网桥侧工频电流; I_{mb} 为机桥侧变频校正电流; I_{qd} 为差动保护启动电流; K_{set} 为比率制动系数。溧阳抽水蓄能电站 SFC 设备起初差动保护只采用 $I_d = |I_{nb} - I_{mb}|$ 作为唯一动作判断条件,无其他闭锁,启动过程中经常发生误动。

在低速阶段机桥侧频率小于 5 Hz 时电流互感器不能准确传变,差动保护应闭锁,该功能通过输出变旁路刀闸位置的辅助结点实现。

2 机组抽水调相启动流程介绍

机组抽水调相采用 SFC 启动,尽管设备配置有所不同,但启动流程是基本不变的。

2.1 自动开停机

机组抽水调相自动开停机流程首先由机组现地控制单元(LCU)调用停机态到停机热备态,包括:退出机坑加热器及启动推力及下导外循环油泵,开启紧急停机电磁阀,退出蠕动装置,启动机组技术供水泵,启动推力及上导、下导油雾吸引装置,启动碳粉吸尘装置,启动水导外循环油泵,开启调速器油压装置隔离阀,退出接压器锁锭,退出机械制动等辅机设备。

其次由机组 LCU 调用停机热备态至抽水调相态,包括:合抽水工况闸刀,置工况转换阀为水泵工况,合启动闸刀对 SFC 上电,水机充气压水,调用 SFC 辅机设备启动流程,设置励磁系统在 SFC 启动模式,设置调速器在调相控制模式。上述步骤均完成后,调用 SFC 启动流程。其中启动母线联络开关的投切取决于机组启动对 SFC 的选择。

值得注意的是在启动过程中充气压水引起的机组蠕动会影响转子位置检测的准确性,降低启动的成功率,因此现场增加“充气压水前机械制动投入、充气压水成功后机械制动退出”的流程,明显提

高了启动的成功率。

2.2 同期并网

在 SFC 和机组励磁系统的配合下,发出启动励磁系统指令,建立 SFC 启动的电气轴(SFC 与机组之间通过电气设备建立的一种电的联系),当 SFC 确定机组的转子位置后,建立定子电流启动机组,通过低速和高速 2 个阶段直接将机组拖动至 49.5 Hz,同时励磁系统将机组的机端电压调节至 $95\% U_n$ (U_n 为发电机额定电压),监控发令启动同期装置,同期装置将跟踪系统的频率和电压不断地向励磁系统和 SFC 发出调节电压和转速的指令。当同期装置检测到同期三要素满足时合上发电机出口开关,SFC 转入备用状态,分开启动闸刀,励磁系统在自动电压调节模式下正常工作,至此机组停机态至抽水调相态的启动结束。

3 SFC 参数优化

目前 SFC 采用全控桥自动换相必需有相适应的交流电压。当机组处于静止状态时,机端电压基本为零,过低的交流电压会使全控桥无法自动换相,因此机组拖动至定速的过程分为低速阶段和高速阶段。

3.1 低速模式

低速阶段也称强迫换相阶段,其影响拖动成功率的关键因素:一是转子位置检测,通过确定转子当前位置从而计算出格里兹桥的导通顺序;二是强迫换相的时机。

3.1.1 转子位置检测方法

转子位置检测的准确性是 SFC 启动过程中低速阶段能否强制拖动关键因素^[1]。从实现方法上来看,目前主要有 3 种:(1) 转子位置传感器检测;(2) 大轴位置编码检测;(3) 定子电压检测。定子电压检测由于无需任何外部设备,实施简单,减少了启运过程的中间环节,且目前技术较成熟,在实际应用中最为广泛,溧阳抽蓄也采用此方法。

转子的可能初始位置有无限多个,但机桥可能的导通桥臂组合只有 6 种^[2]。所以将电机定子内的空间划分为 6 个 60° 的扇形区,每个扇形区的起始轴线均为定子绕组一相的磁场的轴线,转子轴线必然处于 6 个扇形区之一。定子电压检测法通过在 SFC 启动前瞬间投入励磁电流时测量定子侧电磁感应电压,从而精确计算出第一对导通的晶闸管。通过两支晶闸管阀组导通产生的定子磁通,2 个磁通矢量相距小于 60° 空间角度,令转子获得最大的启动力矩,拖动机组。

调试阶段大量的参数调整是为获得与监控、励磁的指令时间上的最佳配合,若设置不当,机组将无法可靠启动。

在溧阳抽水蓄电站首台机组拖动试验前期,SFC 拖动的成功率较低,经多次录波比较发现,从 SFC 发出励磁启动命令到励磁调节器增磁至设定值的时间间隔过大,以致 SFC 所采集到的定子电压不能每次都实时反映转子位置的实际情况,从而使 SFC 无法分析出此时转子的初始位置,机组无法正确转动。图 2 所示励磁增磁时间为 1.60 s 时,SFC 开始启动的失败波形。

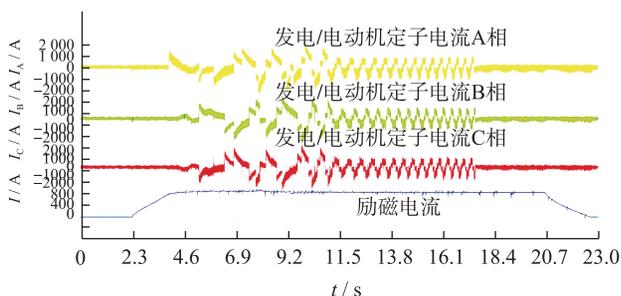


图 2 SFC 拖动失败波形

考虑到励磁电流是按阶跃函数变化的,如果起励时间过长,磁通变化率小,SFC 捕捉不到定子电势;如果起励时间过短,磁通变化率消失的过快,同样会导致 SFC 测不出转子位置。如图 3 所示,经过反复试验并修改参数,当励磁电流升至设定值时间为 1.8~2.1 s 时,SFC 滞后启动时间设置为 0.3~0.5 s,同时将励磁设定电流值由 I_{10} (I_{10} 为励磁空载额定电流) 升至 1.05~1.10 倍 I_{10} ,机组能可靠启动。

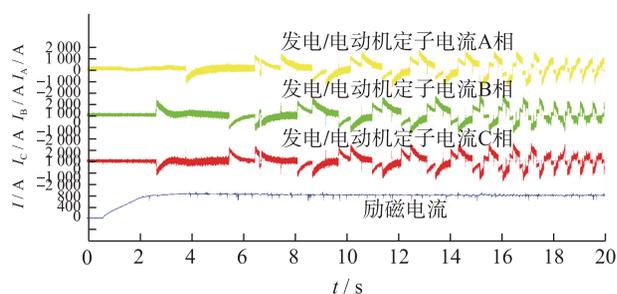


图 3 SFC 拖动成功波形

3.1.2 强迫换相

在低速阶段,每一个换相周期等于取消原回路电流的时间与非换相时间以及回路电流恢复时间之和。取消回路电流的时间经测试至少要 4~8 ms,随着机组转速的增加,可用于恢复回路电流的时间将越来越短,最终将无法继续强迫换相方式,为此必须对脉冲耦合方式中的上限工作频率设定一限制值,一般此频率设定在 2.5~8 Hz 左右。试验中,机组在 5 Hz 强迫换相时启动多次失败,经反复试验

后改在 4 Hz 强迫换相,启动成功率才显著提高。图 4 所示 4 Hz 换相成功时的励磁、定子电流波形。

在励磁起励 2.07 s 时,励磁电流达到 105% I_{10} ,SFC 根据感应到磁通,整流-逆变装置开始向定子注入变频电流。在转速到达 4 Hz 时,强制换相,启动成功切入高速模式控制。

3.2 高速模式

高速阶段为同步运行方式,其机端电压与机组转速成正比,且随之上升,由于机端电压的上升,机桥晶闸管输出交流电压亦随之升高,元件此时已进入自然换相的工作状态,即退出换相的晶闸管元件电流会被自动截止。此时 SFC 根据力矩设定值和转速基准值,并通过测量机桥、网桥侧电流、电压来控制触发脉冲,从而调节 SFC 输出的启动电流将机组拖动至 99% N_e (49.5 Hz) (N_e 为发电机额定转速),并最终启动发电机出口开关、同期并网。为了使 SFC 能在整个频率范围内能正常工作,要求脉冲耦合方式的工作频率上限应高于同步工作方式的工作频率下限,使两种工作方式能有效的切换与相接。

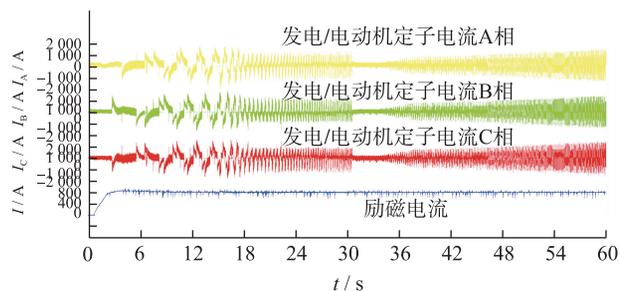


图 4 4 Hz 换相成功时的励磁、定子电流波形

在溧阳抽水蓄首台机组拖动至 25~40 Hz 期间,多次发生 SFC 差动保护动作引起启动不成功^[3]。经 SFC 复位后,报警信号能消除,检查并未发现故障存在,SFC 也能正常再次启动。对现场多次成功拖动的波形分析发现,由于整流和逆变,导致存在大量谐波干扰,在确认设备无任何故障时,最大差流能达到 0.25 I_c (I_c 为 SFC 额定电流)^[4],为此将动作电流设置为 0.3 I_c 并优化部分谐波的干扰和采样时间,启动成功率明显提高。建议 SFC 差动保护采用比率差动特性,在启动过程中逐步增大差动电流动作值,可兼顾低速阶段故障的灵敏性和高速阶段的选择性。

4 结束语

SFC 作为重要的启动设备,带动机组运行启动平稳,不存在失步问题,而且成功率高、维护量小,被抽水蓄能电站广泛采用。本文结合抽蓄现场的

SFC 启动试验,对 SFC 启动流程、保护设置及启动参数进行优化,大大缩短了启动调试的时间,为同类机组的 SFC 启动试验提供了参考。

参考文献:

- [1] 陈刚,廖文亮,彭永怀. 抽水蓄能机组变频启动时 3 种转子位置测量方式的比较[J]. 华东电力,2008, 36(10): 142-144.
- [2] 李集成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2009:415-448.
- [3] 舒建红,郑建锋. 静止变频器在抽水蓄能电站中的应用[J]. 华东电力,2010,32(8): 39-43.

- [4] DL/T 1166—2012 大型发电机励磁系统现场试验导则[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

作者简介:



单华

单华(1985—),男,江苏扬州人,工程师,从事发电厂继电保护工作;

彭宇菲(1995—),女,江苏南京人,本科在读,专业为电气工程及其自动化;

徐钢(1967—),男,江苏扬州人,高级工程师,长期从事继电保护及励磁系统的试验研究工作。

Application and Parameter Optimization of SFC in Pumped Storage Power Plant

SHAN Hua¹, PENG Yufei², Xu Gang¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Static frequency converter (SFC), as the variable frequency starting device of pumping conditions, is based on the speed regulator equipment. It is mainly used to apply the torque to the unit and drag it to the desired speed, so the unit can connect to the grid. This paper expounds the basic working principle, main equipment, and function of the SFC, also analyzes and summarizes the problems and solutions in the starting process.

Key words: static frequency converter starting device (SFC); pumping phase modulation; rotor position; parameter optimization.

(上接第 101 页)

祝宇楠(1984—),女,吉林人,博士,从事电力计量检测技术方向工作;

刘建(1981—),男,河南信阳人,高级工程师,从事电力计量检测技术工作;

周超(1987—),男,江苏宜兴人,工程师,从事电力计量检测技术工作;

龚丹(1979—),男,江苏南通人,高级工程师,从事电力计量检测技术工作。

Early Failure Analysis of the Intelligent Watt-hour Meter Based on the Accelerated Degradation Test Data

TIAN Zhengqi, XU Qing, Jin Ping, ZHU Yunan, LIU Jian, ZHOU Chao, GONG Dan

(State Grid Key Laboratory of Electric Energy Metering (State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute), Nanjing 210019, China)

Abstract: Life prediction based on the accelerated degradation data analysis is an effective means for the reliability evaluation of intelligent watt-hour meter. In the process of design and manufacture, the early failure problem is inevitably introduced to watt-hour meter. If the early failure analysis is ignored in the accelerated degradation test, the pseudo data will be introduced to life prediction, which will lead to wrong life evaluation and the unnecessary maintenance cost and risk. In this paper, an early failure analysis method based on the accelerated degradation test data is proposed to solve the problem of the accelerated degradation test data processing of the intelligent watt-hour meter. At last, the method is verified by the analysis of a single-phase intelligent watt-hour meter, and the life assessment accuracy of the intelligent watt-hour meter is further enhanced by this method.

Key words: accelerate degradation; early failure; watt-hour meter; life assessment