

抽水蓄能机组 SFC 系统保护关键技术

陈俊¹, 司红建², 周荣斌¹, 徐金¹, 严伟¹, 沈全荣¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 江苏沙河抽水蓄能发电有限公司, 江苏 溧阳 213333)

摘要: 介绍了抽水蓄能机组静止变频器(SFC)系统保护的配置方案。针对 SFC 系统保护的关键技术中的难点, 提出了相应的解决方法。SFC 变流桥本体差动保护: 将机桥侧变频电流转换成工频校正电流, 再与网桥侧电流构成差动电流和制动电流, 采用全周傅氏算法计算, 并提出了提高保护可靠性的比率制动特性。输出变压器变频差动保护: 采用了启停机保护算法, 实现了低频启动过程中的准确测量; 采用变斜率比率制动特性, 防止区外故障导致的误动; 脉冲换相阶段, 经旁路开关位置接点将该保护退出。电流变化率保护: 为了提高其可靠性, 连续、多次判断是否满足动作条件, 并增加采样值过流辅助判据, 其与电流变化率判据均满足动作条件时, 保护才出口。设计了数字低通滤波器, 保证脉冲换相阶段机桥侧频率的准确测量。上述措施已经在抽水蓄能机组上得到应用, 应用效果良好。

关键词: 抽水蓄能机组; SFC; 变压器; 继电保护; 电流变化率保护

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.029

0 引言

大型抽水蓄能机组均采用静止变频器(SFC)变频启动系统, SFC 系统是大型抽水蓄能机组水泵工况启动的重要设备, 可以快速、平稳地将抽水蓄能机组由静止拖动到同步转速, 从而减小机组启动和并网时对电网的冲击。它的工作原理是, 根据电机转子位置或机端电压信息, 将频率逐渐升高的交流电压加到电机定子上, 产生超前于转子磁场的定子旋转磁场, 通过定/转子磁场的相互作用, 将电机转子加速到设定转速^[1-12]。

目前, 已投产的国内大型抽水蓄能机组 SFC 系统全部采用进口设备, 导致投资成本高, 维护和更新困难。随着国内技术水平的进步, 少数企业已掌握 SFC 系统的核心技术, 并且成功应用在小型抽水蓄能机组上, 具备了取代进口设备的条件。以往, 进口 SFC 系统的保护功能均集成在 SFC 调节器中, 保护功能简单, 配置不完整, 通常不具备变流桥差动保护(ALSTOM 公司产品除外)和输出变压器差动保护功能^{①-②}, 且一些抽水蓄能电站接入 SFC 调节器的电流互感器(TA)为测量级, 很容易在故障时快速饱和, 不能为 SFC 系统提供可靠的保护, 存在一定的安全隐患。虽然 SFC 系统只在启动阶段投入运行, 但考虑到很多抽水蓄能电站只有 1 套 SFC 系统, 而且其造价昂贵, 因此, SFC 系统的继电保护也应引起足够重视。

综上所述, 有必要研究 SFC 系统的保护配置方案和关键技术, 研制单独的 SFC 系统保护装置, 为

SFC 系统提供完备的保护功能, 更好地保障设备的安全运行。

1 SFC 系统保护配置方案

SFC 的拓扑结构按功率桥交流电压等级分为高-高结构和高-低-高结构; 按功率桥脉动数分为 6-6 脉动方式、12-6 脉动方式和 12-12 脉动方式。目前抽水蓄能机组 SFC 多采用高-低-高结构。

大型抽水蓄能机组 SFC 系统一般采用 12-12 脉动方式, 其典型配置如图 1 所示。

图 1 所示配置包括调节器、I/O 装置、保护装置等二次设备; 还包括输入/输出断路器、输入/输出变压器、直流电抗器、整流桥、逆变桥、切换刀闸等一次设备。完整的 SFC 系统保护的 protection 范围应涵盖以上一次设备。

输入变压器保护具体包括: 输入变压器差动保护、输入变压器高压侧过流保护、输入变压器高压侧电流变化率保护、输入变压器低压侧过流保护、输入变压器低压侧电流变化率保护和输入变压器低压侧低电压保护。

变流桥本体差动保护为整流桥、逆变桥和电抗器提供了快速主保护, 其包括 SFC 差动保护 1 至 SFC 差动保护 4, 保护范围可分别选择网桥侧 TA(TA₁ 和 TA₂)和机桥侧电流互感器(TA₃ 和 TA₄)的两两组合。

输出变压器保护具体包括: 输出变压器差动保护、输出变压器高压侧过流保护、输出变压器低压侧过流保护、输出变压器低压侧电流变化率保护、输出

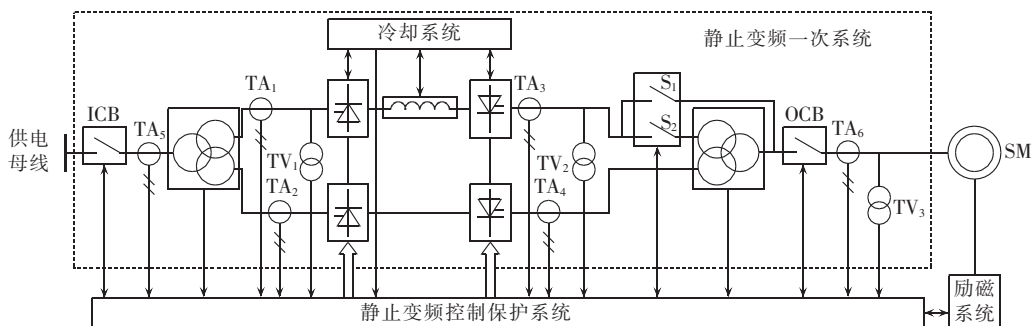


图 1 SFC 系统典型配置图
Fig.1 Typical configuration of SFC system

变压器低压侧过频保护、输出变压器低压侧过励磁保护、输出变压器低压侧零序过压保护、输出变压器高压侧低电压保护和输出变压器低压侧低励磁保护。

2 SFC 系统保护的关键技术

2.1 SFC 变流桥本体差动保护

SFC 系统的网桥侧为工频电流,而机桥侧为变频电流,如何实现两侧频率不一致情况下的差动保护,是 SFC 变流桥本体差动保护的难点。

将机桥侧变频电流经算法处理转换成工频校正电流,再与网桥侧电流构成差动电流和制动电流,采用全周傅氏算法计算。为了提高差动保护的可靠性,采用如下比率制动特性:

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

其中, I_N 为网桥侧电流, I'_M 为机桥侧校正电流, I_d 为差动电流, I_r 为制动电流, I_{qd} 为差动启动定值, K_{set} 为比率制动系数。

RTDS 试验表明,该原理的动作速度与机桥侧的频率无关,动作时间小于 30 ms(2 倍定值)。

沙河抽水蓄能电站 SFC 系统负载换相阶段的网桥侧 TA 和机桥侧 TA 电流见图 2,由两侧电流构成的 SFC 变流桥差动保护差流和制动电流(已转换为相应电流和 TA 二次侧额定电流 I_n 的比值)见图 3。

可见,变频启动过程中,变流桥差动电流接近于 0,远小于制动电流,差动保护的比率制动系数可以整定为 0.3~0.5,保护可以获得比较高的灵敏度。

2.2 输出变压器变频差动保护

输出变压器两侧电流为变频(0~50 Hz),常规变压器差动保护均采用工频算法,无法在此过程中保障输出变压器的安全。以往进口的 SFC 系统均未配置输出变压器变频差动保护功能。

输出变压器差动保护应采取与频率无关的算法,确保低频情况下也能准确测量,本文采用了发电机保护中常用的启停机保护算法,实现了低频启动

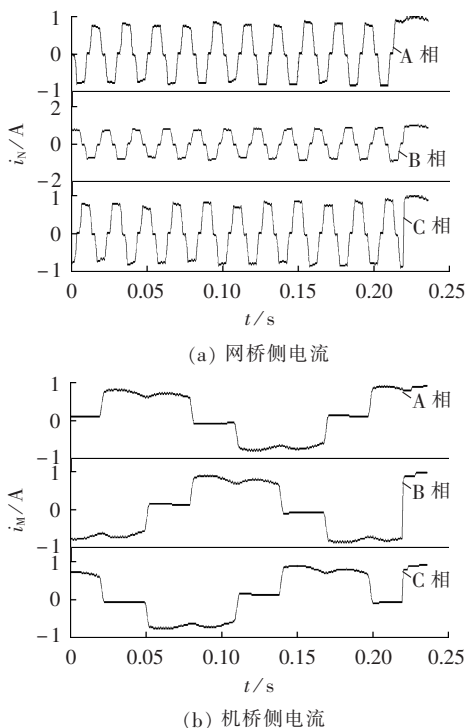


图 2 负载换相阶段的网桥侧和机桥侧电流
Fig.2 Currents at grid side and generator side during load commutation

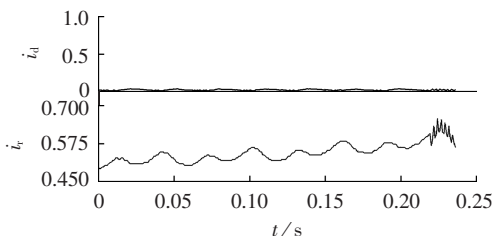


图 3 负载换相阶段的差动电流和制动电流
Fig.3 Differential current and braking current during load commutation

过程中的准确测量^①;采用变斜率比率制动特性,防止区外故障导致的误动^[13]。另外,脉冲换相阶段可能不带输出变压器启动,此时,经旁路开关(图 1 中的 S_1)位置接点将输出变压器差动保护退出。

① 南京南瑞继保电气有限公司。PCS-985 系列发电机变压器组保护装置技术说明书。2010。

2.3 电流变化率保护

电流变化率保护具有动作迅速、灵敏度高的特点,在短路电流上升的起始阶段就能动作,而且故障越严重,电流变化率保护反应越迅速^[15-16],因此,能够对变流桥本体的电力电子器件起到很好的保护作用。对于未配置变流桥差动保护的情况,电流变化率保护实际上充当了变流桥本体快速主保护。

但从现场应用情况来看,该保护易受干扰信号的影响,如沙河抽水蓄能电站的进口 SFC 系统,其调节器内的电流变化率保护曾多次发生误动。

为了提高电流变化率保护的可靠性,可采取以下 2 个措施:连续、多次判断是否满足动作条件;增加采样值过流辅助判据,其与电流变化率判据均满足动作条件时,保护才出口。

2.4 机桥侧频率测量方法

SFC 系统脉冲换相阶段,机桥侧电压波形严重畸变,含有大量的谐波分量。图 4 为某抽水蓄能电站 SFC 系统脉冲换相阶段的机桥侧 AB 相间电压波形,显然,若不进行数据处理,难以准确计算电压的幅值和频率。如何消除谐波分量的影响,准确测量电压幅值和频率,是实现机桥侧频率异常保护、过励磁保护和低励磁保护的关键。

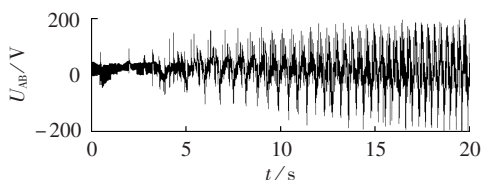


图 4 机桥侧 U_{AB} 原始波形

Fig.4 Original waveform of U_{AB} at generator side

为了准确计算机桥侧的频率,需设计高性能的数字低通滤波器,要求 0~60 Hz 频率范围内不衰减,同时能够很好地抑制高次谐波,其幅频特性如图 5 所示。

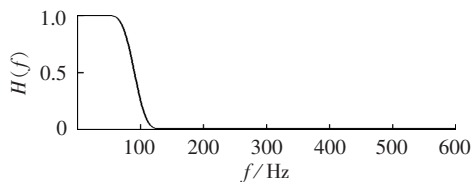


图 5 数字低通滤波器的幅频特性

Fig.5 Amplitude-frequency characteristic of digital low-pass filter

图 4 所示的电压经以上数字低通滤波器后的波形如图 6 所示。可见,经高性能数字低通滤波后,机桥侧电压波形大为改善,为准确测量机桥侧频率和电压幅值创造了条件。

图 7 为脉冲换相阶段频率为 3.5 Hz 的机桥侧电压波形和实测频率值。可见,频率计算值与实际频率

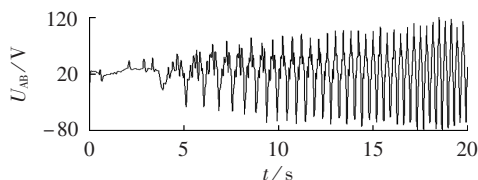


图 6 滤波后的机桥侧 U_{AB} 波形

Fig.6 Waveform of U_{AB} at generator side after filtering

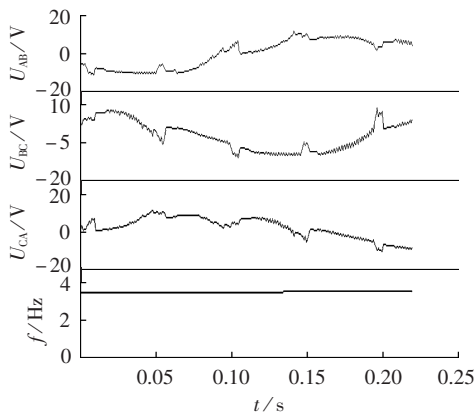


图 7 脉冲换相阶段机桥侧电压和频率

Fig.7 Voltage and frequency at generator side during pulse commutation

吻合,采用以上方法,能够在脉冲换相阶段准确测量机桥侧的频率。

2.5 提高 SFC 系统保护可靠性的措施

所有用于 SFC 系统保护的电流不应取自测量级 TA,而应该设置独立的保护级 TA。

脉冲换相阶段,机桥侧频率小于 5 Hz,TA 不能正确传变,变流桥差动保护和输出变压器差动保护均将出现较大的差流,为防止差动保护误动,应在此过程中闭锁这 2 种保护。

不带输出变压器拖动的阶段,经旁路开关(图 1 中的 S_1)位置接点将输出变压器高压侧过流保护、输出变压器高压侧低电压保护退出;当频率超过 5 Hz,投入输出变压器后,相应的保护功能自动投入。

3 现场应用情况

基于本文研究结果开发了 SFC 系统保护装置 PCS-985FA,实现了输入变压器、变流桥本体和输出变压器的所有电气量保护功能。该装置采用 4U 标准机箱,双 CPU 系统硬件结构,“与门”出口方式,2 个 CPU 系统之间进行相互校验,可靠防止硬件异常导致的误动。

该装置已在江苏沙河抽水蓄能电站得到应用,SFC 变频启动过程中,保护装置能准确测量机桥侧频率和过励磁倍数等重要电气量,所有保护功能运行正常。自 2012 年 6 月投入应用以来,保护装置未出现任何异常,运行情况良好。

4 结语

进口 SFC 系统保护功能配置不完整,缺少了 SFC 变流桥差动保护和输出变压器差动保护功能,存在一定的安全隐患。为了克服进口保护设备存在的问题,本文研究了 SFC 系统保护的典型配置方案和关键技术,简要总结如下:

- a. 提出了 SFC 变流桥差动保护方法,实现了与机桥侧频率无关的快速差动保护方法;
- b. 提出了输出变压器变频差动保护方法,提高了输出变压器内部故障检测的灵敏度;
- c. 提出了提高电流变化率保护可靠性的措施;
- d. 设计了高性能数字低通滤波器,消除了大量谐波分量的影响,实现了机桥侧频率和过励磁倍数的准确测量;
- e. 提出了提高 SFC 系统保护可靠性的若干技术措施。

根据本文研究内容开发的 SFC 系统保护装置已在现场得到应用,应用效果良好,具备了推广应用的条件。该保护装置同样适用于 F 级大型燃气轮发电机组的 LCI 变频启动系统,只需将输出变压器的相关保护功能退出即可。

参考文献:

- [1] PETERSSON T. Starting of large synchronous motor using static frequency converter[J]. IEEE Trans on PAS,1972,91(1):172-179.
- [2] LOU Y L. Study of the variable frequency start-up process of pumped storage machines[C]//ICEM'93. Wuhan, China: [s.n.], 1993:153-164.
- [3] 周军. 抽水蓄能电站中 SFC 变频启动的若干特点[J]. 电力自动化设备,2004,24(11):99-101.
ZHOU Jun. Variable-frequency starting of SFC in pumped storage power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(11):99-101.
- [4] 郑飞,吕宏水,朱晓东. 抽水蓄能电站静止变频器(SFC)启动关键问题[J]. 软启动器,2007(2):69-72.
ZHENG Fei, LÜ Hongshui, ZHU Xiaodong. Key problems on the starting of Static Frequency Converter(SFC) in pumped storage power plant[J]. Soft Starter,2007(2):69-72.
- [5] 赵政. 抽水蓄能电站的变频启动装置[J]. 水力发电,2010,36(1):66-69.
ZHAO Zheng. Static frequency converter for pumped storage power station[J]. Water Power,2010,36(1):66-69.
- [6] 曾德华,刘立红. 黑麋峰抽水蓄能电站变频启动装置的自动控制[J]. 水力发电,2010,36(7):68-69.
ZENG Dehua, LIU Lihong. Automatic control on SFC of Heimifeng pumped-storage power station[J]. Water Power,2010,36(7):68-69.
- [7] 杨洪涛. 天堂抽水蓄能电厂变频启动系统分析[J]. 水电自动化与大坝监测,2004,28(4):25-28.
YANG Hongtao. Analysis of static frequency converter system in Tiantang pumped storage power plant[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring,2004,28(4):25-28.
- [8] 李官军,杨波,陶以彬,等. 抽水蓄能机组静止变频器启动控制系统半实物仿真[J]. 电机与控制应用,2011,38(1):52-56.
LI Guanjun, YANG Bo, TAO Yibin, et al. Hardware-in-the-loop simulation of static frequency converter control system for pumped storage machines[J]. Electric Machines and Control Application,2011,38(1):52-56.
- [9] 胡雪琴. 抽水蓄能电站静止变频启动装置应用情况总结与探索[J]. 水力发电,2007,33(5):51-54.
HU Xueqin. Summary and probe of static frequency converter of pumped storage power station[J]. Water Power,2007,33(5):51-54.
- [10] 杨波,李官军,胡旭光,等. 基于 RTDS 的抽水蓄能机组静止变频器启动技术研究[J]. 电气传动,2010,40(5):20-23.
YANG Bo, LI Guanjun, HU Xuguang, et al. Research static frequency converter of large pumped storage machines based on RTDS[J]. Electric Drive,2010,40(5):20-23.
- [11] 戈宝军,李玉玲,李波. 抽水蓄能电机静止变频器启动过程分析[J]. 电机与控制学报,2002,6(3):200-203.
GE Baojun, LI Yuling, LI Bo. Study of starting process of pumped storage machines by static frequency converter[J]. Electric Machines and Control,2002,6(3):200-203.
- [12] 冯钢生,阚朝晖. 白莲河抽水蓄能电站 SFC 系统运行中故障的分析与处理[J]. 水力发电,2012,38(7):67-68.
FENG Gangsheng, KAN Zhaohui. Analysis and treatment on operation failures of SFC system in Bailianhe pumped-storage power station[J]. Water Power,2012,38(7):67-68.
- [13] 沈全荣,严伟. 主设备继电保护技术的现状与发展[J]. 电力设备,2006,7(2):40-45.
SHEN Quanrong, YAN Wei. Development and the present situation of main equipment protection technology[J]. Electrical Equipment,2006,7(2):40-45.
- [14] 石祥建,司红建,吴小放,等. 静止变频器系统分数次谐波分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(5):36-39.
SHI Xiangjian, SI Hongjian, WU Xiaofang, et al. The analysis on system fractional harmonic of static frequency converter[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2012,31(5):36-39.
- [15] 冯如鹤,冯密罗,孔金生. 基于电流变化率的短路检测保护方法[J]. 煤矿机械,2008,29(5):171-173.
FENG Ruhe, FENG Miluo, KONG Jinsheng. Based on current rate of change of short-circuit protection methods[J]. Coal Mine Machinery,2008,29(5):171-173.
- [16] 赵敏. 基于电流变化率的电网短路保护原理[J]. 电网技术,2008,32(4):105-108.
ZHAO Min. Grid short-circuit protection based on current rate of change[J]. Power System Technology,2008,32(4):105-108.

作者简介:

陈俊(1978-),男,江苏姜堰人,高级工程师,硕士,主要从事电气主设备保护的研究、开发和管理工(E-mail: chenj@nari-relays.com);

司红建(1979-),男,江苏南通人,工程师,主要从事抽水蓄能电站安全技术管理工作;

周荣斌(1981-),男,江苏丹阳人,工程师,主要从事电厂电气主设备保护调试工作;

徐金(1979-),男,山东烟台人,工程师,主要从事电厂电气主设备保护调试和管理工作;

严伟(1975-),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士,从事电气主设备微机保护的研究、开发和管理工;

沈全荣(1965-),男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,硕士,从事电力系统继电保护的研究、开发和管理工。

Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit

CHEN Jun¹,SI Hongjian²,ZHOU Rongbin¹,XU Jin¹,YAN Wei¹,SHEN Quanrong¹

(1. NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China;

2. Jiangsu Shahe Pumped-Storage Power Generation Co.,Ltd.,Liyang 213333,China)

Abstract: The configuration scheme of SFC(Static Frequency Converter) system protection for pumped storage hydro unit is introduced and solutions are proposed for its key technologies. Differential protection of SFC converter bridge;the variable-frequency current at generator side is converted to power-frequency current, which is used together with the current at grid side to form the differential current and braking current; full-period Fourier algorithm is adopted and the proportional breaking characteristic is applied to enhance its reliability. Variable-frequency differential protection of output transformer;the protection algorithm of generator startup/shutdown is applied to realize the accurate measuring during the low-frequency startup;the variable-slope braking characteristic is applied to avoid the misoperation due to out-zone fault;it is disabled by the position contact of bypass switch during the pulse commutation. Current changing rate protection;the repeated and continuous detection of action conditions and the additional auxiliary criterion of sampling value over-current are applied to enhance its reliability;the digital low-pass filter is designed to guarantee the accurate measuring of frequency at generator side during pulse commutation. All measures mentioned above are applied in the pumped storage hydro unit with excellent effect.

Key words: pumped storage hydro unit; SFC; power transformers; relay protection; current changing rate protection

(上接第 161 页 continued from page 161)

作者简介:

黄新波(1975-),男,山东海阳人,教授,博士后,研究方向为电力系统在线监测理论与技术(E-mail:huangxb1975@163.com);

程文飞(1987-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为检测技术与自动化装置;

张周熊(1987-),男,陕西周至人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

Design of intelligent high-voltage and variable-frequency power source

HUANG Xinbo,CHENG Wenfei,ZHANG Zhouxiong,SHI Jie,ZHAO Yang

(College of Electronics and Information,Xi'an Polytechnic University,Xi'an 710048,China)

Abstract: An intelligent high-voltage and variable-frequency power source for insulation test is designed, which,applying the principle of LC series resonance,outputs PWM wave and SPWM wave by its DSP core board to control Buck circuit and inverter circuit respectively,adopts the intelligent correction algorithm and PI algorithm to modulate frequency and power,samples the secondary-side voltage of excitation transformer to automatically search the resonant point by the FFT operation,and adjusts the parameters of external reactor and capacitor to change the frequency of resonance point for modulating the amplitude of output voltage. The designed device outputs high/extra-high voltage with continuously variable frequency from 30Hz to 300 Hz.

Key words: electric power supplies to apparatus; design; resonance; SPWM; pulse width modulation; frequency modulation; electric inverters