

上都电厂轴系次同步扭振保护系统

陈天宇¹, 赵永林¹, 刘全², 张远取³, 谢小荣³

(1. 上都发电有限责任公司, 内蒙古自治区 锡林郭勒盟 027200; 2. 四方电气(集团)有限公司, 北京 100084;
3. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对次同步谐振(SSR)危及机组轴系安全问题, 研发了轴系次同步扭振保护系统。该保护系统包括底层的扭应力继电器(TSR)和上层的保护协调机(Tmaster)。TSR实时采集轴系模态转速信号, 进而判别扭振模态稳定性和疲劳寿命是否越限, 并将判断结果传递给Tmaster, 由后者执行选择性跳机逻辑, 从而起到保护机组轴系的作用。将所述次同步扭振保护系统应用于上都电厂串补输电系统, 分析了其运行机制和定值设置。保护系统自2008年9月投运以来, 经历了现场试验和实际故障的考验, 起到了正确检测次同步扭振和保护机组轴系安全的作用。

关键词: 次同步谐振(SSR); 扭应力继电器(TSR); 轴系扭振保护; 串补输电系统; 现场试验

Shafting torsional protection system at Shangdu power plant

CHEN Da-yu¹, ZHAO Yong-lin¹, LIU Quan², ZHANG Yuan-qu³, XIE Xiao-rong³

(1. Shangdu Power Plant Co., Ltd, Xilingol 027200, China; 2. Sifang Electric (Group) Co., Ltd, Beijing 100084, China;
3. State Key Lab of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A subsynchronous torsional protection scheme is developed to protect generator shafts from damage caused by subsynchronous resonance (SSR). The scheme is composed of the bottom-layered torsional stress relay (TSR) and the upper-layered coordinator, called Tmaster. The TSR gathers the modal speed of generator shafts in real time and detects dangerous SSR according to the criteria of torsional stability and fatigue loss-of-life. The Tmaster coordinates the response from multiple TSRs and trips generators selectively. The proposed "TSR+Tmaster" scheme is implemented for the Shangdu series-compensated transmission system, of which the operation principle and the protection setting are elaborated in this paper. Since it was put into practice in September 2008, the protection system has experienced various field tests and real system faults, demonstrating its effectiveness in detecting subsynchronous vibration and protecting generator shafts.

Key words: sub-synchronous resonance (SSR); torsional stress relay (TSR); shafting torsional protection; compensated transmission system; field test

中图分类号: TM77; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0122-04

0 引言

二十世纪七十年代以来, 由固定串联电容补偿(FSC)引起的次同步谐振(SSR)问题受到广泛的关注^[1-2]。国内近几年来, 随着独立电厂远距离大容量输电的需求上升, 特别是一些新建大型煤电基地, 远离负荷中心, 较多采用远距离、高固定串补输电模式, 使得SSR成为一个现实难题^[3-5]。

基金项目: 电力系统国家重点实验室项目(SKLD08M02); 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2004CB217906); 国家电网公司科技项目资助(20090857)

SSR危害严重: 轻则造成机组轴系慢性损伤、寿命缩短, 重则可导致大轴出现裂纹甚至猝然断裂, 危及机组和电网的安全稳定运行。

针对SSR的解决方案一般包括抑制和保护两个侧面。抑制即采用一定的控制方法或/和设备防止出现危险的SSR, 避免轴系次同步扭矩过大而损伤机组; 保护即实时监视轴系扭振强度, 一旦监测到危险扭振时, 启动跳机操作, 使机组脱离电网, 从而达到保护机组安全的目的。最常用的保护设备即扭应力继电器(Torsional Stress Relay, TSR)。

TSR最早出现在上世纪七十年代, 在通过串补和HVDC送电的电厂中得到广泛应用。国内目前有

上都、托克托、伊敏、锦界、盘南等存在 SSR 风险的大型火电厂采用 TSR 保护。其中上都电厂在国内首次集成美国进口和国内自主研发 TSR 装置构成整体扭振保护系统; 本文将介绍其基本构成、工作原理、定值设置和实际应用情况。

1 上都电厂串补输电系统及其 SSR 风险

上都电厂送出工程(二期)的等值单线系统如图1所示, 输电线路包括上都-承德线(简称上承线, 243 km)和承德-姜家营线(简称承姜线, 130 km), 固定串补安装在承德站内的上承线进线上, 串补度为45%。

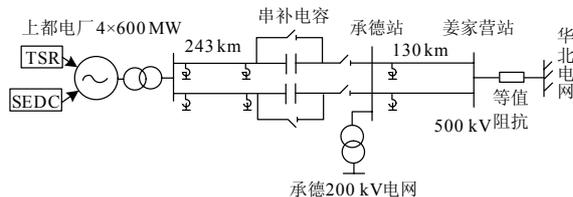


图1 上都电厂串补输电系统(二期)

Fig.1 The single-line diagram of Shangdu system

电厂四台机组为参数相同的国产亚临界空冷式汽轮机组, 集中参数轴系模型包括高中压缸、低压缸A、低压缸B和发电机四个质块。分析表明, 轴系与电气系统存在耦合的三个次同步扭振模式分别约为15 Hz、26 Hz和30 Hz; 其中模式2(26 Hz)的阻尼最弱, 最容易出现SSR现象。

分析计算和现场试验均表明, 上都电厂串补输电工程在一些运行方式(如3/4机上都-承德1回线)下会引发次同步谐振(SSR), 故在上都电厂侧加装附加励磁阻尼控制器(SEDG)和轴系扭振保护装置, 以消除次同步谐振给汽轮发电机组和电网安全稳定运行带来的危害^[6]。

2 TSR的工作原理

TSR在检测到危险扭振时, 能够启动切机操作, 保护机组安全。它的基本原理是: 对轴速信号进行高速采样和带通滤波处理, 得到与SSR模式的振动值成比例的电信号(即“SSR模式速度”), 然后应用扭振模式不稳定判据和疲劳寿命损失判据两个动作逻辑对机组进行跳闸操作。

扭振模式不稳定判据的基本原理是: 模式转速超过启动值, 连续一定时间内模式转速幅度持续增长则判定为该模式不稳定(发散), 而如果模式转速幅度持续下降或模式转速低于启动值则判定为该模式稳定(收敛)。

疲劳寿命损失判据的基本原理是: 模式转速超过启动值, 单次疲劳寿命损失超过常规定值则判定为常规疲劳越限, 而如果单次疲劳损失超过极限定值则判定为极限疲劳越限。

TSR的工作原理可以用图2表示。

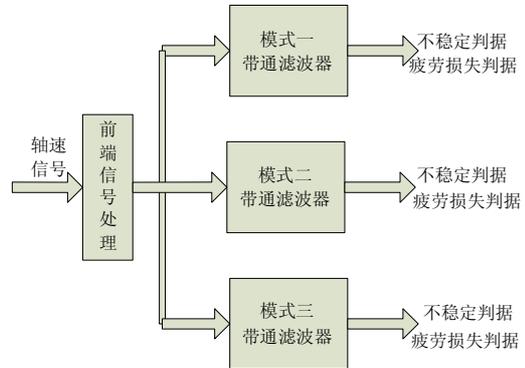


图2 TSR原理图

Fig.2 The principle of TSR

可见, TSR的关键技术主要包括两方面, 即扭振发散判定和疲劳累积计算。特别是后者, 牵涉到轴系应力分析、机械疲劳特性和在线疲劳累积等方面的技术。

针对上都电厂, TSR对机组的保护效果主要表现在两个方面:

(1) 对于被切除的机组, 由于与电网脱离, 机网互作用产生的电气负阻尼效果消失, 在原动机动作的配合下, 转矩迅速下降, 避免SSR发散和暂态扭矩增大, 保护了机组;

(2) 对于剩余的在线机组, 切除机组将改变系统结构和等效串补度, 一定程度上能增强在线机组的模式阻尼, 有利于抑制SSR。

简言之, 针对上都电厂情况TSR对被切机组起保护作用, 对其他机组能起到一定的提高模式阻尼的作用, 有利于缓解和消除SSR风险。

3 轴系扭振保护系统

3.1 系统构成

整个机组次同步扭振保护系统体系由八套TSR和两套互为备用的协调机(Tmaster)组成。八台TSR中的四台由国外提供, 另外四台为国内自主研发装置。每台TSR的逻辑判断结果通过硬接线节点方式传递给Tmaster, 由Tmaster执行选择性跳机逻辑, 保护机组轴系。

Tmaster实现多台机组扭振保护的优化出口, 将扭振保护切机对电网的影响降为最小。同一发电厂的多台机组扭振保护构成一个协调控制组, 分为单

元机组TSR和Tmaster两层。机组TSR独立监测机组扭振，采用Tmaster完成TSR的选择性切机，Tmaster采用双机主备方式，集中放置于升压站继电保护室。系统接线逻辑如图3所示。

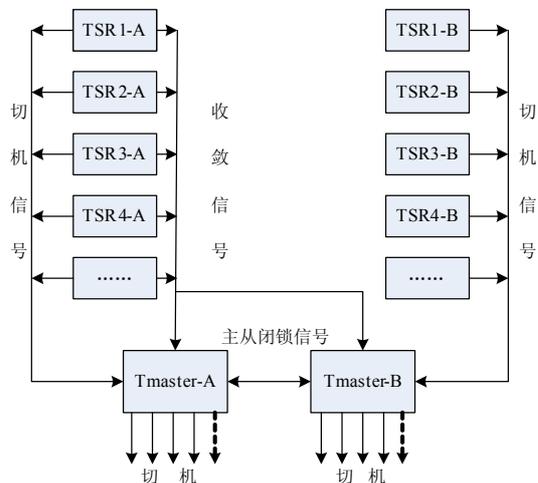


图3 协调机制系统连接示意图

Fig.3 The TCR and Tmaster system

3.2 动作逻辑

Tmaster/TSR包括三个动作逻辑，即：扭振模式不稳定动作（逻辑一）、常规疲劳越限动作（逻辑二）和极限疲劳越限动作（逻辑三）。

上述三种逻辑的功能重点如下：

(1) 逻辑一的重点是SSR发散，主要针对一些轴系扭矩不大或疲劳寿命损失累积量还不小、但呈明显发散的SSR现象，能尽快判别，并向Tmaster发出动作指令，它的动作时间最短可达到0.4 s左右（避开稳控装置动作时间），早发现SSR发散并尽快采取措施，有利于在SSR现象初期抑制扭振发散，降低机组轴系疲劳寿命损失，保证电网安全性。

(2) 逻辑二的重点是疲劳寿命损失超过一定幅度，主要针对一些轴系扭矩较大或疲劳寿命损失积累很快，但SSR发散现象还不是很明显或时间长度达不到逻辑一数据窗的情况，考虑到较短时间内产生了较大的疲劳寿命损失，可能威胁机组的安全，恶化SSR，故向Tmaster发出动作跳机指令，以尽快采取措施，保证电网安全性。

(3) 逻辑三的重点是机组轴系疲劳寿命损失过大，应立即跳机以保证其安全性，它作为逻辑一和逻辑二的后备保护措施，具有“最后一道防线”的功能，主要针对极其恶劣情况下，机组轴系疲劳寿命过大，严重威胁机组安全性的情况下，不经过选择性逻辑，断然跳机，并配合汽门控制减出力，达到保护机组安全的目的。

(4) 逻辑一、二和三在功能上既具各自特色和重点针对性，又相互补充和具有一定的重叠性，共同组成Tmaster/TSR轴系扭振保护整体，起到抑制SSR、保护机组轴系安全的作用。

3.3 定值构成和设计

Tmaster/TSR参数的整定上，遵从安全、裕度以及配合设定等三个基本原则来进行。一般来说分两个步骤完成整定工作：首先在电磁仿真模型上通过分析计算，设定Tmaster/TSR的出厂参数；然后通过现场测试各台机组的特征频率，对出厂参数进行微调。

针对上都电厂的具体计算环境，Tmaster/TSR参数整定流程如下：

- (1) 明确TSR的动作逻辑和流程；
- (2) 整定保护启动值；
- (3) 采用理论分析和PSCAD/EMTDC仿真相结合依次整定TSR和Tmaster的判据定值；
- (4) 采用时域仿真方法对以上整定参数进行校核，兼顾SSR收敛特性和各种故障方式下的轴系疲劳损失，需要的情况下适当优化TSR/Tmaster定值，以达到更好的保护效果；
- (5) 根据现场测试结果，微调整定参数（主要是模态滤波参数）。

表1 各机组的模态频率

Tab.1 Modal frequency of generators

#1 机组	模态	频率/Hz	#2 机组	模态	频率/Hz
	模态 1	15.33		模态 1	15.32
	模态 2	26.12		模态 2	26.12
	模态 3	30.54		模态 3	30.52
#3 机组	模态	频率/Hz	#4 机组	模态	频率/Hz
	模态 1	15.22		模态 1	15.19
	模态 2	26.04		模态 2	26.01
	模态 3	30.51		模态 3	30.25

表2 轴系扭振保护系统主要的保护定值

Tab.2 Value set of shafting torsional protection system

整定参数	整定值
模态1滤波器中心频率	15.33 Hz
模态2滤波器中心频率	26.12 Hz
模态3滤波器中心频率	30.54 Hz
TSR保护启动值	模态转速的有效值 ≥ 0.1 rad/s
TSR模态稳定/不稳定判据	轴系疲劳损耗门槛 = 0.2%；
TSR常规疲劳越限的门槛值	1%
TSR极限疲劳越限的门槛值	2.8%
Tmaster的响应等待时间	1 s

上都电厂四台机组模态频率有所区别, 如表 1 所示。TSR 在进行参数整定时, 需要根据模态频率的不同进行相应的设置。1#机组轴系扭振保护系统主要的保护定值如表 2 所示, 其它机组的 TSR 整定值类似。

以上参数能适应上都二期和远期工程的需要, 同时该定值出厂设定后, 一般不需要后续调整, 除非影响轴系疲劳损耗的机组参数(如物理构造、S-N 曲线)发生较大变化。

4 保护系统在上都电厂的运行情况

本文所描述的次同步扭振保护系统于2008年9月于上都电厂试运行, 在后续的串补并网和SEDC 试验中均表现正常。相关试验过程中轴系扭振的幅度超过了TSR的启动值, TSR正确发出提示信息, 但扭振幅度均未达到动作值, 故TSR没有启动跳机, 符合预期设计目标。

5 结语

针对上都电厂串补输电工程(二期)的SSR问题, 研究采用了SEDC和TSR的组合方案进行抑制。由TSR为基础所构成的轴系扭振保护系统在机理和实际运行中都表现出来了其具有的抑制SSR的效果。国内自主研发的TSR装置表现出了其实用性, 有效保护发电机机组。

参考文献

- [1] Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee. Reader's Guide to Subsynchronous Resonance IEEE Committee Report [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 150-157.
- [2] IEEE SSR Working Group. Countermeasures to

Subsynchronous Resonance Problems[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1810-1818.

- [3] 杨煜, 陈陈, 伊敏—大庆 500 kV 输电系统次同步谐振分析——兼论发电机轴系共振频率[J]. 电网技术, 2000, 24 (5): 10-12.
YANG Yu, CHEN Chen. SSR in Yimin-Daqing 500 kV Transmission System[J]. Power System Technology, 2000, 24 (5): 10-12.
- [4] 北京国电华北电力工程有限公司. 上都电厂串补输电方案次同步谐振专题研究[R]. 2005.
North China Power Engineering (Beijing) Co., Ltd. SSR Research Report of Shangdu Generation Station with Series Capacitor Compensation [R]. 2005.
- [5] 郭锡玖. 串补输电系统次同步谐振分析及防止措施比较[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 24 (3): 1-4.
GUO Xi-jiu. SSR Analysis and Prevent Measures Comparison on Series Compensation Transmission Line System[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006, 24(3): 1-4.
- [6] 李国宝, 张明, 郭锡玖, 等. 上都电厂串补输电系统次同步谐振解决方案研究[J]. 中国电力, 2008, 41(5): 75-78.
LI Guo-bao, ZHANG Ming, GUO Xi-jiu, et al. The Solution to SSR Problem in Shangdu Series Compensation Transmission System[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 75-78.

收稿日期: 2009-04-21

作者简介:

陈大宇(1970-), 男, 高级工程师, 从事电力生产技术管理工作; E-mail: chendayu@shangdupower.com

赵永林(1962-), 男, 工程师, 从事电力生产技术管理工作;

刘全(1970-), 男, 高级工程师, 研究领域为电力系统继电保护等。

(上接第 121 页 continued from page 121)

- [2] 王亚强, 田野. 一种三端输电线路故障定位算法[J]. 东北电力技术, 2004(11):23-25.
WANG Ya-qiang, TIAN Ye. A Practical Fault Location Algorithm for Three Terminal Transmission Line[J]. Northeastern Electric Power Technology, 2004(11): 23-25.
- [3] 田羽, 范春菊, 龚震东. 三侧同杆双回线互联的 T 型线路测距新方法[J]. 电力自动化设备, 2007,27(9): 63-66.
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. Fault Locating Algorithm for T-type Lines with Parallel Transmission Lines on Same Pole at Three Sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9):

63-66.

- [4] 刘静. T 型线路电流差动保护方案研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
LIU Jing. Study on Current Differential Protection Scheme for T Connection Transmission Lines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.

收稿日期: 2009-04-16; 修回日期: 2009-07-09

作者简介:

李瑞生(1966-), 男, 教授级工程师, 从事继电保护方面的研究; E-mail: ruishengl@xjgc.com

贺要锋(1972-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护方面工作;

樊占峰(1974-), 男, 工程师, 从事继电保护研究与开发。