

500 kV 串补设备 MOV 温度实时模拟与保护算法研究

王德昌¹,周启文¹,方太勋¹,孙 健¹,章耀辉²

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102;

2.安徽省电力公司马鞍山供电公司,安徽 马鞍山 243011)

摘 要:串联补偿(简称串补)串补系统中金属氧化物限压器(MOV)温度的实时模拟是其正常工作以及串补重投的前提。根据简化的 MOV 热模型,采用数字式串补保护装置对 MOV 温度进行实时模拟,测量了实际 MOV 的温度特性,通过调整相关参数即可保证 MOV 实时模拟温度与实际 MOV 温度吻合并有一定的裕度。结果表明,MOV 实时模拟算法能够为 MOV 温度保护提供可靠的依据。

关键词:串联补偿; MOV 温度保护; 实时模拟; MOV 热模型

中图分类号: TM773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)01-0028-03

由于串联补偿(简称串补)能够显著提高输电能力,其投资相对于架设新的输电线路(尤其在偏远山区)要小得多。而我国的能源分布结构决定了必须进行超高压远距离输电,目前串补技术已经相当成熟,因此近年来越来越多的串补系统在我国投入运行,而串补控制保护技术被几个厂家垄断,但投运后仍有误动,因此有必要对串补控制保护技术进行深入研究。在串补系统中,金属氧化物限压器(MOV)对限制电容器组两端过电压起着重要的保护作用。由于 MOV 始终跨接在电容器组两端^[1],当线路故障导致电容器过电压时,MOV 将其过电压限制在设定的保护水平之内,自身吸收能量,温度升高。但考虑到投资成本,MOV 的容量不可能配置得太高,主要依据是躲开远景年区内故障时 MOV 在一定时间内吸收的最大能量,并保留足够裕度。串补保护系统中一般都配置 MOV 高电流保护、能量保护、温度保护以及不平衡保护,串补保护通过测量 MOV 电流和 MOV 一分支电流实现上述保护(MOV 电压不易测量)。当上述保护动作后,串补保护通过光纤发点火命令点燃火花间隙,同时发旁路命令将旁路开关合闸,并根据故障的严重程度判断是否将串补系统重新投入运行。

1 MOV 温度保护配置

目前国内外各串补保护生产厂家的 MOV 温度保护配置基本相同,即分别配置 MOV 高温保护和 MOV 高温闭锁重投^[2-5],一般 MOV 高温保护定值大于高温闭锁重投定值。

考虑到 MOV 在区内故障时吸收能量较快,MOV 电流的采样率及程序中断频率均为 10 kHz,保证 MOV 相关保护的判断速度。

借鉴常规线路保护启动+保护的動作模式,串补保护亦采用启动+保护的動作模式,即配置启动板 DSP 和保护板 DSP,两 DSP 板分别对采样的 MOV 电流进行处理,并根据与实际 MOV 相对应的伏安特性曲线插值得到对应的电压,进而计算出 MOV 吸收的能量。只有当启动板和保护板都动作时,串补保护装置才能发出合闸命令。

1.1 MOV 温度保护

当 MOV 由于多次区外故障吸收能量而使温度持续升高,或区内经大过渡电阻故障,线路保护切除故障时间较长时,MOV 温度保护可能动作。当 MOV 温度高于高温保护定值时,即将串补系统三相旁路,并根据故障的严重程度是否触发火花间隙。MOV 高温保护定值可根据 MOV 生产厂家给定的其能够承受的最高温度考虑一定的裕度来确定。

1.2 MOV 高温闭锁重投保护

当串补系统由于 MOV 高温保护动作而三相旁路时,串补系统永久闭锁,不允许串补系统自动重投,直到 MOV 温度降低到高温闭锁重投定值以下才允许运行人员手动将串补系统投入运行。

高温闭锁重投定值可以根据 MOV 生产厂家给定的技术参数并考虑实际串补系统的过电压程度来确定,保证串补系统在该定值下重投时,如果串补系统重投于故障,MOV 能够再次吸收一定容量的能量并有一定的裕度。MOV 温度保护的動作逻辑如图 1 所示。

2 MOV 温度算法

为实现 MOV 温度保护,需要根据当前 MOV 温度进行判断。最理想的办法是在 MOV 内部放置温度传感器,直接测得温度并将其传送到保护设备中,但由于串补系统中 MOV 布置在高压绝缘平台

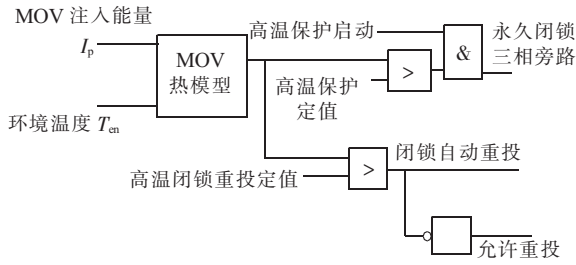


图 1 MOV 温度保护逻辑

上,且由多支并联跨接在电容器组两端,当电容器组过电压时 MOV 内部处于高电压、大电流的状态,传感器放置在内部存在绝缘、过热等问题,并不安全,且在每个 MOV 柱中都装配温度传感器不太现实。因此研究人员希望通过模拟计算能实时正确获取 MOV 的内部温度,目前采用较多的也相对较为可行的方法是对 MOV 进行物理建模分析,建立 MOV 热模型,通过热模型计算得到 MOV 的实时温度。

文献^[6]提出了一种 MOV 热模型。该模型以热学为基础,考虑了温度的传导、对流以及辐射,根据该模型可以比较准确地计算出 MOV 内部阀片的温度,但是其难点在于模型太过复杂,涉及的参数非常多,有些参数不易确定。而一般的保护装置中考虑到动作快速性的要求,任务中断频率非常高,过多的计算量将大量占用 DSP 的任务资源。

为此对该温度模型进行了一定的简化,根据文献^[7,8]所述,阳光辐射使 MOV 工作温度仅上升 $1.5\sim 2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,影响不大,因此可忽略阳光辐射的影响。简化后的热模型如图 2、图 3 所示。

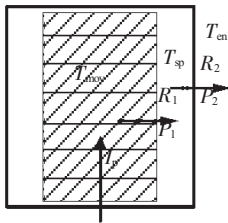


图 2 MOV 热交换示意图

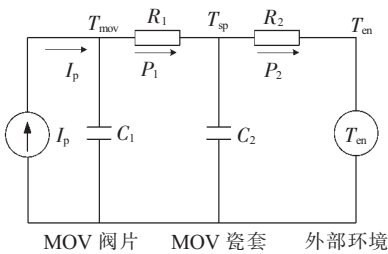


图 3 MOV 热模型的简化电路

图中: T_{mov} 为 MOV 阀片温度; T_{sp} 为阀片与内壁之间温度; T_{en} 为外部环境; I_p 为通过 MOV 电流注入阀片的能量; P_1 为从阀片流出的热量; P_2 为从 MOV 流出的热量; R_1 为阀片内部之间的热阻; C_1 为

阀片的热容; R_2 为 MOV 与外部环境之间的热阻; C_2 为瓷套(或复合材料外套)的热容。

从图 3 可以得到如下 4 个公式:

$$T_{mov} = \frac{(I_p - P_1) \Delta t}{C_1} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{T_{mov} - T_{sp}}{R_1} \quad (2)$$

$$T_{sp} = \frac{(P_1 - P_2) \Delta t}{C_2} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{T_{sp} - T_{en}}{R_2} \quad (4)$$

式中: Δt 为时间常数。通过上述公式即可实时计算得到 MOV 阀片的温度。

3 MOV 温度特性试验

为了验证上述简化 MOV 热模型的合理性,选取了某支 MOV 单元作为试品,该单元内部阀片并联柱数为 3,单柱 MOV 阀片串联数为 23,阀片尺寸 $D99 \times 44.6\text{ mm}$,重约 1.82 kg,外套为复合绝缘材料。

3.1 MOV 温升特性试验

为使测量具有一定代表性,分别对 3 个阀片进行测量,采用接触式热电偶对 MOV 阀片表面温度进行测量,但由于温升试验不是绝热过程,因此在温度稳定(约 1min)时 MOV 吸收的能量有一定的损失,因此测量出的温升系数有一定的误差。

考虑到实际应用中温升系数必须准确,而通过式(1)计算可以得到阀片的温升系数。

一般 MOV 阀片材料 ZnO 的热容^[7,8]为 $0.5\sim 0.52\text{ J/(g}\cdot^{\circ}\text{C)}$,而 ZnO 的密度 $\rho=4.71\sim 5.6\text{ g/cm}^3$,我国为 5.53 g/cm^3 ,因此根据阀片的尺寸易得到阀片的热容 C_1 ,通过式(1)即可求得阀片的温升^[9,10]。

由上述可知,通过式(1)可以计算出单个阀片的温升系数(考虑绝热),即:

$$K = \frac{\Delta E}{\Delta T} = m \times C_{MOV}$$

式中: K 为温升系数; ΔE 为绝热吸收能量; ΔT 为绝热 MOV 阀片温升; m 为 MOV 阀片质量; C_{MOV} 为 MOV 阀片的热容。计算得到的温升系数 $910\sim 946\text{ J/}^{\circ}\text{C}$ 与生产厂家给定的温升系数 $968\text{ J/}^{\circ}\text{C}$ 很接近。

3.2 MOV 温度实时模拟试验

将温度传感器放置在距离顶端 1/3 到 1/2 之间的阀片中间,2 个温度传感器分别放置在 2 个并联 MOV 柱中。升压设备向 MOV 单元内注入大量能量,MOV 的温度上升到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,然后将升压设备撤除,使 MOV 在环境温度(环境温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$)中自然散热,记录 MOV 散热过程中温度的变化。

通过数字式串补保护装置来实现上述简化 MOV 热模型,通入一定的 MOV 电流,使 MOV 温度升高到 120℃(环境温度通过温度探头测量输入保护装置),实时模拟 MOV 温度(环境温度校正后为 16℃),将实测 MOV 温度数据与模拟数据进行对比,如图 4 所示。结果表明,保护装置模拟得到的 MOV 散热特性曲线与实测数据吻合,表明通过简化的 MOV 热模型计算阀片温度能够用于实际串补 MOV 温度保护。

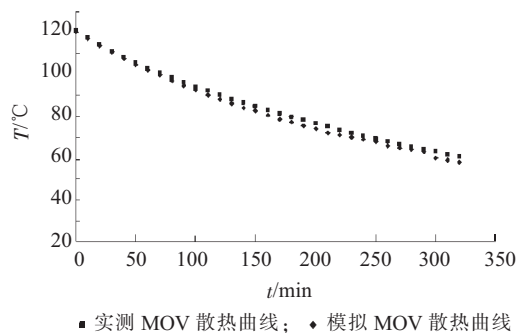


图 4 模拟 MOV 散热曲线与实测散热曲线对比

4 固定串补控制保护实现

根据国内用户习惯,将固定串补保护与控制功能分开,控制系统采用在数字化变电站常用的断路器测控装置实现串补所有开关刀闸的控制及连锁功能,配合监控后台实现顺控功能。

保护装置独立配置,并配置启动和保护 DSP 板,使保护动作更加可靠,保护程序基于可视化编程,程序维护更加方便,中断频率最高达到 10 kHz。保护装置所有模拟量采用全数字量传输,与电子式 CT 配合使用,其采样率达到 10 kHz,详细如图 5 所示。设计的间隙触发装置(GTD)与激光供能装置和保护装置形成闭环系统,实时对触发回路进行检测,并根据保护分别配置 2 套独立的 GTD。

串补保护装置通信机控制装置通信均采用 IEC61850 协议,方便与未来数字化变电站接口,配合远动装置还能实现远方对串补进行顺控操作,实现串补站无人值守。

5 结束语

通过实测 MOV 的散热特性,将简化后的热模型通过数字式串补保护可视化编程实现,并记录下模拟的 MOV 散热特性曲线,对比发现串补保护模拟的 MOV 散热特性曲线与实测数据吻合并有一定的裕度;验证了简化的 MOV 热模型能够用于实际串补保护系统中,可以为 MOV 温度保护提供较为准确的 MOV 实时温度,保证 MOV 持续安全可靠地工作。该简化热模型适用于不同厂家生产的

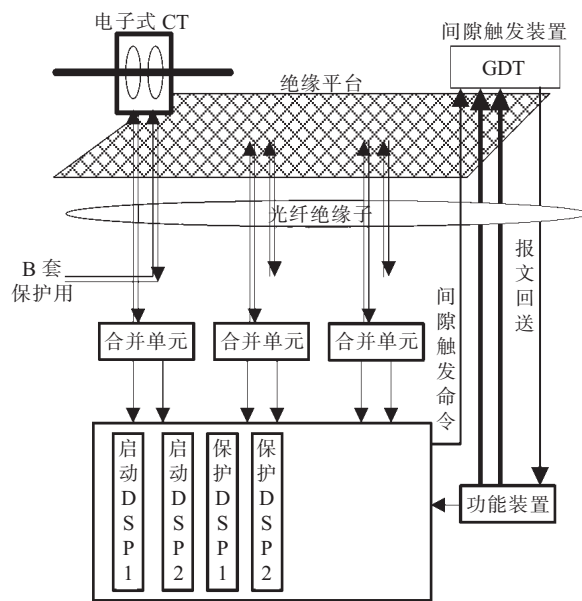


图 5 固定串补保护实现

MOV 产品,只需根据实测 MOV 散热特性曲线相应调整热阻 R_1, R_2 以及热容 C_1, C_2 即可,不需要重新建模。新设计的数字式串补保护装置与电子式互感器配合使用,采用全光纤传输;启动+保护的動作模式使得保护更加可靠;高采样率和中断频率使串补保护动作更加迅速。

参考文献:

- [1] 安德森 P M, 法墨 R G. 电力系统串联补偿 [M]. 周孝信, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 王 奇, 王海军, 李妍红. 砚山 500 kV 固定串补控制保护装置 RTDS 动态性能试验与系统短路试验研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 118-124.
- [3] 祝 谦, 刘相枪. 平果可控串补本体保护介绍 [J]. 电网技术, 2004, 28(16): 73-77.
- [4] 赵淑珍, 于德明, 李 钢. 大房双回 500 kV 线路蔚县串补站二次系统及试验 [J]. 华北电力技术, 2002(3): 5-8.
- [5] 曾 玉, 汪 建. 500 kV 河池串补站控制保护系统的设计与实现 [J]. 继电器, 2005, 33(10): 75-78.
- [6] LAT M V. Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7): 2194-2202.
- [7] 王秉钧. 金属氧化物避雷器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [8] 高新疆, 邓世建. 金属氧化物避雷器温度检测方法的研究 [A]. 第十七届全国煤矿自动化学术年会、中国煤炭学会自动化专业委员会学术会议论文集 [C], 2007.
- [9] 吴维韩, 何金良, 高玉明, 等. 合成套氧化锌限压器的热特性研究——第一部分: 限压器热特性研究的有限元方法及其散热特性 [J]. 中国电机工程学报, 1996(2): 110-113.
- [10] 何金良, 吴维韩, 高玉明, 等. 合成套氧化锌限压器的热特性研究——第二部分: 阀片功率损耗的模型及限压器的热稳定性能 [J]. 中国电机工程学报, 1996(2): 114-118.

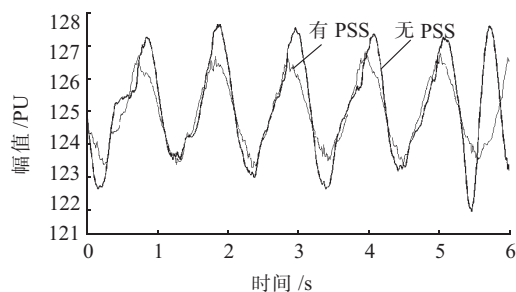


图 6 0.7 Hz PSS 投退录波曲线

需要注意,逐渐增加正弦信号量,使观察到的有功功率曲线基本为正弦波且波动明显大于机组扰动,同时保证无功功率波动在许可的范围内。所加的正弦波最小频率只需到系统振荡模式最低频率即可。

4 结束语

近年来电网低频振荡时有发生,通过目前通常采用的电压阶跃试验方法并不一定能完全验证出 PSS2A 对系统在 1 Hz 以下的低频振荡抑制效果,而

且对这方面讨论的文献也不多见,鉴于此情况,希望对 1 Hz 以下的 PSS2A 抑制效果验证方法能够提供一定的借鉴和思路。

参考文献:

- [1] 方思立,朱 方.电力系统稳定器的原理及其应用[M].北京:中国电力出版社,1996.
- [2] 许其品,胡先洪,陈小明.双输入电力系统稳定器实现方法探讨[J].水电自动化与大坝监测,2008,32(5):8-11.
- [3] 方思立,苏为民.电力系统稳定器配置、构成、参数计算及投运试验[J].中国电力,2004(10):8-13.
- [4] Q/GDW143—2006,电力系统稳定器整定试验导则[S].

作者简介:

余 振(1983),男,江苏南京人,工程师,从事发电机励磁系统研究工作;

郭春平(1981),男,河南安阳人,工程师,从事发电机励磁系统研究工作;

安 宁(1985),男,河北石家庄人,助理工程师,从事发电机励磁系统研究工作。

A Method of Verifying the PSS2A Model on Low-frequency Oscillation Damping

YU Zhen, GUO Chun-ping, AN Ning

(NARI Technology Development Co.Ltd., Nanjing 210061,China)

Abstract: Along with the interconnection of regional power grid, the percent of low-frequency oscillations below 1Hz is increasing. And sometimes negative damping phenomenon can happen after PSS installed in generator's excitation system under certain operation mode. This paper points out that normal test methods of PSS cannot verify the effect of suppressing low-frequency oscillations, and gives a test method of superposing a sinusoidal perturbation signal on generator's terminal voltage. Results of field tests show that this method is reasonable and effective.

Key words: power system dynamic stability; low-frequency oscillation; excitation system

(上接第 30 页)

作者简介:

王德昌(1982),男,河南开封人,硕士,从事串补保护与控制系统开发与串补一次设备集成工作;

周启文(1977),男,湖北鄂州人,工程师,从事串补保护与控制系统开发与串补一次设备集成工作;

方太勋(1973),男,湖北随州人,高级工程师,从事串补保护与控制系统开发与串补一次设备集成工作。

孙 健(1986),男,陕西西安人,硕士,从事串补保护与控制系统开发与串补一次设备集成工作;

章耀辉(1981),男,安徽安庆人,本科,从事超高压线路的维修工作。

Studies on Real Time Simulation and Protection Algorithm of the MOV Temperature for 500 kV Series Compensation System

WANG De-chang¹, ZHOU Qi-wen¹, FANG Tai-xun¹, SUN Jian¹, ZHANG Yao-hui²

(1.Nanjing Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102,China;

2.Anhui Electric Power Company Maanshan Power Supply Company, Maanshan 243011,China)

Abstract: In the series compensation system, the Metal Oxide Varistor (MOV) temperature's real-time simulation is the basis of its properly working and SC (series compensation) reinserting. According to the simplified thermal model of MOV, the MOV's temperature is simulated in real time by using digital Series Compensation (SC) protection device. And the MOV's temperature characteristic is also measured at the same time. Related parameters can be adjusted to guarantee the simulation temperature dovetail with the actual one and some margin to be left. Results show the MOV real-time simulation can provide reliable support for the MOV temperature protection.

Key words: series compensation; MOV temperature protection; real-time simulation; MOV thermal model