### 300 Mvar 调相机继电保护的分析与改进

桑建斌<sup>1</sup>,包明磊<sup>1</sup>,李玉平<sup>1</sup>,万洛飞<sup>2</sup>,李明<sup>1</sup>,朱宇聪<sup>1</sup> (1. 南京国电南自电网自动化有限公司,江苏南京 211100;2. 南瑞集团公司,江苏南京 210006)

摘要:介绍了已投运 300 Mvar 调相机的启动特点、运行特点以及继电保护配置方案。分析了调相机启机时的 谐波特性对调相机保护的影响,在此基础上对调相机保护在启机及并网运行过程中的状态闭锁逻辑进行了 讨论,给出了调相机保护的状态闭锁配置。鉴于频率跟踪在调相机保护中的重要性,根据启机过程中的谐波 特性、变频特性,在过零点测频算法中增加了低通滤波、过零点抖动甄别,并进行了仿真和实验验证,结果表 明防干扰处理后的过零点测频在保证精度与响应速度的同时,抗干扰性能良好。

关键词:调相机;继电保护;保护配置;状态闭锁;频率跟踪;过零点测频;仿真

中图分类号:TM 77 文献标志码:A

DO

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.031

#### 0 引言

近年来特高压直流输电快速发展,电网的"强直 弱交"特性较为突出,尤其对于直流多馈入受端电 网,存在多回直流换相失败、动态无功储备以及电压 支撑不足等问题<sup>[1-3]</sup>,其中受端电网的无功补偿问题 可通过配置大型调相机解决<sup>[4]</sup>。目前,300 Mvar 大 型调相机在扎鲁特±800 kV 换流站、湘潭调相机工 程、湖南韶山换流站等相继投运。

调相机有多种启动方式,主要包括直接启动方式、电抗器降压异步启动方式、电动机启动方式、静止变频器(SFC)启动方式<sup>[5]</sup>。已投运的 300 Mvar 调相机容量较大,需采用 SFC 启动方式,通过惰转同期并网。SFC 启动方式控制精准、并网冲击小,配合同期装置能够实现软启动<sup>[6]</sup>。

300 Mvar 大型调相机造价昂贵,其主变高压侧 电压等级为500 kV 以上,保护需采用双重化配置。 SFC 启动的调相机在启机过程中,机端电压、电流等 电气量可能出现较大的谐波,启机状态下的测频算 法需要考虑谐波影响,如果频率无法准确测量,调相 机的启机保护、误上电保护、过激磁保护等将无法正 常工作。目前,关于测频的各种改进算法研究较多: 文献[7]根据时域连续有限冲激响应滤波器的原理 设计了短窗窄带带通连续滤波器,改进了过零测频 方法,但文中的频率计算均在接近工频的情况下进 行,短窗窄带带通连续滤波器对于 SFC 启机的大范 围变频工况并不适用;文献[8-10]在傅氏测频的基 础上进行改进,虽然傅氏测频不易受整次谐波的影 响,但其对于系统频率未严重偏离工频的情况更为 适用,对于大范围变频的系统,傅氏测频需要较长的 数据窗,或进行多次迭代计算;文献[11]针对 SFC 启动的抽水蓄能机组机桥侧电压波形畸变严重的工 况,设计了单个低通滤波器改善机桥侧的测频环境, 但是当机组工作在较低频率时,SFC 的输出谐波频

率也较低,此时单低通滤波器难以滤除 SFC 的谐波频率。考虑保护装置对测频的响应速度、计算效率要求较高,本文采用双低通滤波器与过零点插值测频相结合的方式进行频率跟踪。

本文介绍已投运 300 Mvar 大型调相机的启动 特点、运行特点以及继电保护配置方案,对采用 SFC 启动的调相机在启机状态下的机端电压、机端电流、 中性点电流等电气量进行谐波分析,探讨启机时谐 波特性对保护的影响,在此基础上给出调相机保护 的状态闭锁配置方案。鉴于频率跟踪对调相机保护 的重要性,根据启机过程中的谐波特征与变频特性, 在过零点测频环节增加了低通滤波、过零点抖动甄 别等防干扰措施,并进行了仿真验证。

### 1 300 Mvar 同步调相机的启动与运行特点 以及继电保护配置方案

#### 1.1 300 Mvar 同步调相机的启动与运行特点

SFC 启动的调相机主回路如图 1 所示。调相机 启动时,投入 SFC 变频启动系统及他励启动励磁系 统,调相机工作在同步电动机状态。调相机从静止 状态开始升速,当转速上升到 3 150 r/min 时,调相



Fig.1 Main start circuit of synchronous condenser

机进入惰转过程,此时退出 SFC,励磁系统由他励启 动励磁切换至自并励主励磁,在转速降到额定值 3 000 r/min前快速增加励磁,使调相机电压升到额 定值,然后由同期装置合闸并网。

SFC 启动的调相机与普通发电机在启动过程中 的区别较大,普通发电机在转速达到 3 000 r/min 后 才加励磁,而 SFC 启动的调相机在整个启机过程中励 磁一直投入。并网后调相机为了维持转子旋转,只消 耗少量有功功率,且无功功率的输出范围较大,达到 -150~300 Mvar,与发电机在运行状态上亦有区别。

#### 1.2 300 Mvar 同步调相机的继电保护配置方案

调相机的差动保护、定子接地保护、转子接地保护、过负荷保护、复压过流保护、过励磁保护、过电压保护等均可沿用常规发变组保护中的配置方式。调相机失磁时的机端阻抗轨迹在第二、三象限,阻抗轨迹的收敛性较差,失磁状态与正常状态的区分度不够,因此,失磁保护不再使用阻抗原理<sup>[12-13]</sup>,而采用逆无功、机端电压、母线电压、转子电压等组合判据实现。由于调相机无机械原动力输入,有功功率近似为0,不存在与电网失步的可能性,因此无需配置失步保护。表1给出了已投运的300 Mvar 调相机的保护配置。

表 1 300 Mvar 调相机保护配置表 Table 1 Protection configuration of 300 Mvar

	0		
synchronous	cond	lenser	

	• , • - • • • • • • • • • • • • • • •
保护类型	保护配置
差动保护	调相机差动保护、主变差动保护、 励磁变差动保护
匝间保护	调相机纵向零压匝间保护、 负序功率变化量匝间保护
复压过流保护	调相机复压过流保护、主变复压过流保护、 励磁变过流保护
零序过流保护	主变高压侧零序过流保护
定子接地保护	基波零压定子接地保护、3次谐波电压定子 接地保护、注入式定子接地保护
转子接地保护	乒乓式转子接地保护、注入式转子接地保护
过励磁保护	调相机过励磁保护、主变过励磁保护
过负荷保护	定子过负荷保护、负序过负荷保护、 励磁过负荷保护、主变过负荷告警
过电压保护	调相机过电压保护
失磁保护	调相机失磁保护
启机保护	调相机启机差动保护、调相机启机过流保护、 调相机启机零压保护
其他保护	误上电保护、开关量保护、低压解列保护、 断口闪络保护、非全相保护

表1中的低压解列保护是发变组保护配置中没 有的,其主要用于防止全站失电后线路重合闸,调相 机未经同期并网的情况。

# 2 300 Mvar 调相机变压器组启机过程的谐 波分析

对调相机的启机过程进行测试(物理动模),启

机主回路如图 1 所示, SFC 由实际工程供货厂家提 供, 拓扑结构为 12-6 脉波, 最大输出电压为 20 kV, 最大输出功率为 60 MW; 动模机组的额定容量为 15 kV·A, 额定电压为 400 V。对应的具体原型系统参 数为: 调相机的额定容量为 300 MV·A, 额定电压为 20 kV, 直轴同步电抗  $X_d$  = 0.61 p.u., 交轴同步电抗  $X_q$  = 0.321 p.u., 直轴瞬变电抗  $X'_d$  = 0.187 p.u., 直轴 次瞬变电抗  $X''_a$  = 0.116 p.u., 交轴次瞬变电抗  $X''_q$  = 0.125 p.u., 机端电压互感器变比为 20 kV/100 V, 机 端或中性点电流互感器变比为 12 500 A/5 A; 主变 额定容量为 500 MV·A, 高压侧额定电压为 550 kV, 低压侧额定电压为 20 kV,短路阻抗为 12%;等值系统 电压为 500 kV,短路电流为 3 000 A。保护装置录波采 样频率为 2 400 Hz, 保护算法采样频率为 1 200 Hz。

导出保护装置在调相机启机过程中在低频运 行、定子接地以及相间短路等状态下的录波波形,并 对导出波形进行谐波分析,如图2所示。

图 2 中,  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为调相机机端三相电压;  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 分别为调相机机端 AB 相、BC 相相间电压;  $U_0$ 为调相机机端零序电压;  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  为调相机机端 三相电流;  $I'_A$ 、 $I'_B$ 、 $I'_C$ 为调相机机尾三相电流; p 为各 电压、电流中谐波占基波百分比。谐波分析中的谐 波总失真度(THD)计算公式为:

$$\Gamma HD = \sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left(\frac{A_h}{A_1}\right)^2}$$
(1)

其中,A<sub>1</sub>为电压或电流的基波有效值;A<sub>h</sub>为电压或电流的h次谐波有效值;H为最大测量谐波次数,受装置录波采样频率2400 Hz的限制,本文计算中取H=20。

图 2(a)、(b)均为调相机正常启机时的波形,调 相机频率分别为 4.3 Hz 与 23.4 Hz。2 种频率下  $U_{AB}$ 的 THD 值均低于 10%, 而  $U_0$  主要含有 3 次谐波电 压。此外, $I_A$  的 THD 值较高, 主要包含基波与 5、7 次谐波。

由图 2(a)、(b)可知,由于机端相间电压的谐波 含量较低,启机时的频率跟踪可通过对机端相间电 压进行过零点测频实现;U<sub>0</sub>在正常启机时含有 3 次 谐波电压,启机零压保护宜将变频状态下的 3 次谐 波电压滤除;启机过流算法宜将变频过程的 5、7 次 以上谐波电流滤除。

图 2(c)中的调相机频率为 14.9 Hz,此时发生 C 相接地故障,零序电压  $U_0$ 中主要含基波分量与 3 次 谐波分量,机端 A 相电流  $I_A$  主要含基波与 5、7 次谐 波。图 2(d)中的调相机频率为 49.9 Hz,0.01 s 时发 生调相机机端 AB 相间故障(调相机差动保护区 内),由于调相机定子绕组反电势的作用,机尾电流  $I'_A$ 、 $I'_B$ 迅速增大,而机端三相电流受 SFC 输出限制, 均缓慢上升。在 SFC 输出电流增大的同时,机端电 压在 0.15 s 时测得 5 次谐波上升明显。





Fig.2 Harmonic analysis under different states in startup process of synchronous condenser

由图 2(c)、(d)可知,当调相机发生相间短路故障时,电压亦出现较大谐波,在对相间电压进行过零 点测频前,应先进行滤波处理;调相机发生相间短路 故障时,机尾电流的正弦度较机端电流高,且机尾电 流的故障特征更为明显,这是因为定子绕组反电势 的短路容量受 SFC 控制影响较低,且定子绕组反电 势的正弦度较高。因此机尾电流更能反映调相机启 机时的内部相间故障,调相机启机过流保护宜采用 机尾电流。

### 3 300 Mvar 调相机保护启机与并网运行下 状态闭锁逻辑分析

#### 3.1 差动保护状态闭锁分析

调相机零序电压中的 3 次谐波分量主要由调相 机本体产生,机端电压或电流出现的 5、7 次及以上 谐波则由 SFC 的逆变器产生。调相机启机过程中, SFC 输出电源频率逐步上升,调相机电气量的基波 分量、谐波分量均处于变频过程。在调相机保护配 置以及实现方法中,需要充分考虑低频特性、变频特 性以及谐波特性。部分保护功能在调相机启动过程 中可能误动,应在启动过程中闭锁这些保护功能;待 调相机并网后再自动投入;部分保护功能在启动过 程中的灵敏度不够,需要提供与频率无关的启机专 用保护。

对于采用傅氏算法或采样值算法的差动保护, 在无故障情况下不存在差流,即便不在工频环境下, 差流计算值也为0,所以差动保护无需闭锁。

若 SFC 未配置输出变压器(已投运的 300 Mvar 调相机工程均采用该方式),则须采用低电压启动调 相机,在接近工频时,机端电压较低,而同步电抗接 近最大值,此时发生调相机相间故障,其故障电流比 并网后同样故障下的电流要小。实际启机过程中, SFC 短路容量不够,故障电流主要由调相机定子的 反电势提供,其功率主要由转子转动惯性下转子磁 场切割定子绕组提供,其产生故障电流的能力并不 强。由于常规调相机差动保护的定值设计仅针对额 定电压,如果此时仅配置常规调相机差动保护,灵敏 度可能不够。此外,根据图 2(d),调相机内部发生 相间故障时 SFC 输出的机端电流除了明显的 5、7 次 谐波,还有一定量的 2、3 次谐波,如果差动保护的电 流互感器饱和判据采用了谐波判别原理,饱和判据 可能会误闭锁。

可见在调相机启机过程中不应使用常规调相机 差动保护代替调相机启机差动保护,在整个调相机 启机过程中调相机启机差动保护都应作为差动主保 护,且无需为其配置频率闭锁功能。

#### 3.2 其他保护状态闭锁分析

如果调相机工作在非工频状态下(f<45 Hz 或 者 f>55 Hz),部分使用傅氏算法的保护,例如调相 机纵向零压匝间保护、负序功率变化量匝间保护、失 磁保护、3次谐波电压定子接地保护、注入式定子接 地保护等,算法的误差可能导致保护误动,应该闭锁 这些保护。

在并网前,调相机低频状态下不会误动的保护,

例如常规差动保护、转子接地保护、过励磁保护、启 机保护、误上电保护、过电压保护、开关量保护等都 应投入。部分保护虽然在非工频状态下测量不准 确,但在启机过程中调相机频率接近 50 Hz 时仍应 投入,例如非全相保护、断口闪络保护等。

并网后应防止误动的保护,例如启机保护、误上 电保护、断口闪络保护应受并网状态闭锁。启机保 护在整个调相机启机过程中都应当投入,待并网后, 为防止高压侧开关位置节点异常而导致启机保护在 并网后误投,可将保护压板退出。

#### 3.3 调相机保护状态闭锁逻辑配置

总结非工频状态、并网前状态以及并网后状态 对调相机保护的影响,得到整体的保护闭锁配置方 案如表2所示。表中,"\*"表示不作处理,"可选" 表示开放与闭锁可选。

#### 表 2 调相机保护的状态闭锁配置

Table 2 Status blocking configuration of synchronous condenser protection

F						
	闭锁配置					
保护类型	非工频 状态	并网前	并网后			
调相机差动保护、主变差动保 护、励磁变差动保护、乒乓式 转子接地保护、注人式转子接 地保护、调相机过励磁保护、 主变过励磁保护、调相机过电 压保护、开关量保护	*	*	*			
基波零压定子接地保护	*	可选	*			
非全相保护	可选	*	*			
发电机复压过流保护、主变复 压过流保护、励磁变过流保 护、主变高压侧零序过流保 护、定子过负荷保护、负序过 负荷保护、励磁过负荷保护、 主变过负荷告警	可选	可选	*			
纵向零压匝间保护、负序功率 变化量匝间保护、失磁保护、 3次谐波电压定子接地保护、 注入式定子接地保护	闭锁	可选	*			
断口闪络保护	可选	*	闭锁			
启机保护、误上电保护	*	*	闭锁			
低压解列保护	*	闭锁	*			

注入式定子接地保护受变频信号影响,无法区 分启机时 20 Hz 信号是由注入源产生还是由系统产 生,所以启机过程中可能无法正常工作,但在停机或 并网工频状态下可提供检测定子绝缘功能。

## 4 启机过程中 300 Mvar 调相机变压器组频 率跟踪的防干扰措施及其验证

SFC 启动的调相机在启机过程中,机端电压、电流等电气量可能出现较大的谐波,启机状态下测频算法的精度以及响应速度需要考虑谐波的影响,如果频率无法快速准确地测量,那么启机保护、误上电保护、过激磁保护等受频率影响的保护可能无法正

常工作。

#### 4.1 频率跟踪的防干扰措施

过零点测频的响应速度快,但当谐波影响过零 点检测时精度较差,本文采用低通滤波后的相间电 压进行过零点测频,同时过零点检测时采用抖动甄 别判断,如果故障时电压幅值过低,则采用电流 测频。

根据调相机启机过程中的谐波分析,若调相机 启机时发生相间故障,则相间电压的5、7次谐波明 显增大,可能影响过零点检测。为保证频率跟踪的 可靠性,本文对测频前的数据进行防干扰处理,主要 思路是将调相机9~55 Hz 之间测频信号的5次及以 上谐波滤除,具体方法是将启机过程分为*f*>20 Hz、 *f*≤20 Hz 2 个阶段,*f*>20 Hz 时采用滤波器 1,*f*≤20 Hz 时采用滤波器 2,流程如图 3 所示。



图 3 频率跟踪滤波处理流程

Fig.3 Filtering process for frequency tracking

图 3 中,频率 f 为上次中断程序的计算值,当 f≤30 Hz时,则更新数据窗 2;当 f>30 Hz 时,为提高 效率,停止更新数据窗 2,而数据窗 1 则一直更新。 滤波器 1 与滤波器 2 均为非递归数字滤波器,程序 中的实现方式为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N} h(k) x(n-k)$$
 (2)

其中,x(n)为当前采样点;h(k)为滤波器系数;y(n) 为滤波后的采样点;滤波系数的个数为 N+1。滤波 器的滤波特性如图 4 所示。

为了兼顾滤波效果及响应速度,图4中滤波器1 的 N 值取 23,滤波器 2 的 N 值取 34。滤波器 1 在频 率为 20~55 Hz 时滤除谐波次数  $h \ge 5$  的谐波,滤波 器 2 在频率小于 20 Hz 时滤除谐波次数  $h \ge 5$  的谐 波。实际滤波器的性能受到了滤波算法采样频率 $f_s$ 的限制,当 $f_s$ 为 1 200 Hz、系统频率为 50 Hz 时,滤 波器最高能滤除 12 次谐波,但保护装置采样一般有



前置的抗混叠模拟低通滤波,因此,进行数字滤波设 计时需要与前置的模拟低通滤波相配合。

调相机最大工作频率不超过 70 Hz,据此判别 2 个过零点的时间间隔,如果间隔过短,则认为存在过 零点抖动。假设 t<sub>0</sub>(j)为采样点X(n-j)、X(n-j+1) 之间的过零点时间,且已判定为有效,t<sub>0</sub>(k)为采样 点 X(n-k)、X(n-k+1)之间的过零点时间,且为距 t<sub>0</sub>(j)最近一次的过零点时间,则两者的计算公式为:

$$\begin{cases} t_0(j) = t(n-j) + \Delta t \left| \frac{X(n-j)}{X(n-j+1) - X(n-j)} \right| \\ t_0(k) = t(n-k) + \Delta t \left| \frac{X(n-k)}{X(n-k+1) - X(n-k)} \right| \end{cases}$$
(3)

其中,t(n-j)为采样点 X(n-j)的时间;t(n-k)为采 样点 X(n-k)的时间; $\Delta t$  为采样间隔时间。如果 2 个过零点的过零方向相反,则过零点抖动甄别公 式为:

$$t_0(k) - t_0(j) < 1/140 \tag{4}$$

如果2个过零点的过零方向相同,则过零点抖 动甄别公式为:

$$t_0(k) - t_0(j) < 1/70 \tag{5}$$

如果满足式(4)或(5),则认为采样点 X(n-k)、 X(n-k+1)之间的过零点是无效过零点。

过零点测频以及抖动甄别如图 5 所示。

图 5 中, $t_A$ 、 $t_B$ 、 $t_c$ 、 $t_D$  时刻的过零点均为有效过 零点, $t_E$ 、 $t_F$  时刻满足了过零点抖动的判别条件, $t_E$ 、  $t_F$  时刻对应的过零点为无效过零点; $t_1$ 、 $t_2$  为过零点 测频的 2 次频率计算,可见过零点测频每半个周期 就能计算一次频率。

#### 4.2 频率跟踪的防谐波干扰验证

在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真验证,将





Fig.5 Zero-crossing jitter discrimination 图 2(d) 中发生机端 AB 相间短路故障时的  $U_{BC}$ 波形 数据导入 MATLAB,滤波器的采样频率设置为 1 200 Hz,调相机频率为 49.9 Hz,因此采用滤波器 2 对  $U_{BC}$ 的原始信号进行滤波,滤波效果如图 6 所示。







图 6 中, U<sub>BC</sub>的原始信号中含有较高的 5 次谐 波, 过零点附近波形存在毛刺, 谐波分析显示滤波后 U<sub>BC</sub>仅存在少量调相机自身的 3 次谐波电压, 不影响 过零点检测。同时, 滤波器 1 给 U<sub>BC</sub>带来的相移约为 180°, 时间上约为 10 ms, 与滤波器设计一致。

在保护装置中测试防干扰措施,装置采用 MPC8247 的硬件核心以及 VxWorks 的嵌入式操作 系统,滤波器采样频率  $f_s = 1$  200 Hz,继电保护测试 仪型号为 PW466。初始时刻相间电压的基波有效 值为 10 V,频率为 6 Hz,同时叠加有效值为 7 V 的 7 次谐波,0.3 s 时刻,基波频率增加为 11 Hz,7 次谐波 频率增加至 77 Hz,电压基波与谐波的有效值不变, 装置测频计算如图 7 所示。

图 7 显示 U<sub>AB</sub>经低通滤波后的过零点测频延时 在 20 ms 以内。可见,在合理设计滤波器,并增加过 零点抖动甄别之后,过零点测频能保证较快的响应 速度,且精度较高,不易受谐波及过零点抖动的 影响。



harmonics are superimposed

#### 5 结论

本文介绍了 300 Mvar 调相机的启动、运行特点 以及继电保护配置方案。分析了调相机启动时的谐 波特性对调相机保护的影响,在此基础上对启机以 及并网运行过程中各保护的闭锁逻辑进行了讨论, 给出了调相机保护的状态闭锁配置方案。根据调相 机启机过程中的谐波特性,在测频方法中增加了防 谐波干扰措施,并进行了验证。通过本文的分析与 研究能够得到以下结论。

a. 调相机含有调相机本身的 3 次谐波零序电 压,启机零压保护宜将 3 次谐波电压滤除;调相机发 生相间故障时机端电流含有较大的 3、5 次谐波,而 机尾电流谐波含量较低且故障特征更为明显,因此 启机过流保护宜采用机尾电流;为了在变频过程中 滤除 3、5、7 次谐波,应使用能够适用于变频状态的 傅氏算法对启停机保护进行改进。

**b.** SFC 启动的调相机在启机与并网后的工作状态区别较大,应尽量避免不同状态下使用同一套保护功能,因此并网前应配置启机状态专用保护,其定值应针对启机过程进行设计。

c.如果调相机频率在45~55 Hz 以外,则部分 使用傅氏算法的保护,例如调相机纵向零压匝间保 护、负序功率变化量匝间保护、失磁保护、3 次谐波 电压定子接地保护、注入式定子接地保护等,算法 的误差可能导致保护误动,应进行闭锁;在并网 前,应投入常规差动保护、转子接地保护、过励磁 保护、启机保护、误上电保护、过电压保护、开关量 保护等;非全相、断路器闪络保护等在启机过程中 接近 50 Hz 时应当投入;并网后为防止误动,启机 保护、误上电保护、断口闪络保护应当受并网状态 闭锁。

d. 启机过程中机端相间电压谐波含量较低,但 调相机发生内部相间故障时相间电压的5、7次谐波 将可能影响过零点检测,合理设计低通滤波,并增加 过零点防抖甄别,可以有效解决该问题。

#### 参考文献:

 [1]黄华,潘学萍,李乐,等.并网大容量调相机对交直流电力系统 无功电压灵敏度的影响[J].电力自动化设备,2018,38(12): 162-167.

HUANG Hua, PAN Xueping, LI Le, et al. Effect of integrated large capacity synchronous condenser on reactive power and voltage sensitivity for AC/DC power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12) : 162-167.

[2] 李新年,易俊,李柏青,等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术,2012,36(6):266-271.
LI Xinnian,YI Jun,LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system
[J]. Power System Technology,2012,36(6):266-271.

 [3] 屠竞哲,张健,王建明,等.大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J].中国电机工程学报,2015, 35(21):5492-5499.

TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21):5492-5499.

[4] 张开宇,崔勇,庄侃沁,等.加装同步调相机对多直流馈入受端 电网的影响分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(22): 139-143.

ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(22):139-143.

- [5]王潇,周平,王洋,等.大容量调相机静止变频器起动方式研究
   [J].电气技术,2016,17(10):31-35.
   WANG Xiao,ZHOU Ping,WANG Yang, et al. Bushing PD analysis and electric field simulation large capacity synchronous compensator
   [J]. Electrical Engineering,2016,17(10):31-35.
- [6] 邹东霞,余锐,聂娟红,等. 300 Mvar 大型同步调相机的启动及 继电保护[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(20):160-164.
   ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, et al. SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control,2016,44(20):160-164.
- [7] 吴崇昊,陆于平,饶丹. 用时域连续有限冲激响应滤波器进行过 零测频的方法[J]. 电网技术,2007,31(7):18-21.
   WU Chonghao, LU Yuping, RAO Dan. An zero-crossing frequency measuring method using time-domain continuous finite impulse response filter[J]. Power System Technology,2007,31(7):18-21.
- [8] 李一泉,何奔腾.一种基于傅氏算法的高精度测频方法[J].中 国电机工程学报,2006,26(2):78-81.
  LI Yiquan,HE Benteng. A high-accuracy algorithm for measuring frequency of power system based on Fourier filter[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):78-81.
- [9] 吴梓亮,李银红,李明. 一种基于修正相角差的傅氏测频算法
   [J]. 电力系统保护与控制,2015,43(13):111-117.
   WU Ziliang,LI Yinhong,LI Ming. Fourier frequency measurement algorithm based on modified phasor angle difference[J]. Power System Protection and Control,2015,43(13):111-117.
- [10] 张义辉,尹项根,陈德树. 基于富氏滤波测频算法的改进研究
  [J]. 电网技术,1998,22(3):65-67.
  ZHANG Yihui, YIN Xianggen, CHEN Deshu. Study on improved algorithm for frequency measurement based on Fourier filter [J].
  Power System Technology, 1998,22(3):65-67.
- [11] 陈俊,司红建,周荣斌,等. 抽水蓄能机组 SFC 系统保护关键技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):167-171.

223

CHEN Jun, SI Hongjian, ZHOU Rongbin, et al. Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 167-171.

- [12] 罗凌,李振文,宋兴荣.大容量调相机继电保护配置方案研究
  [J]. 湖南电力,2016,36(5):26-30.
  LUO Ling,LI Zhenwen,SONG Xingrong. Study on the relay protection scheme of high-capacity synchronous condenser [J]. Hunan Electric Power,2016,36(5):26-30.
- [13] 潘仁秋,何其伟,陈俊. 大型调相机的保护配置及其实现[J]. 江苏电机工程,2011,30(6):45-47.
   PAN Renqiu, HE Qiwei, CHEN Jun. Implementation of protection configuration for large-scale synchronous compensator[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2011,30(6):45-47.

#### 作者简介:



桑建斌(1986—),男,江苏无锡人,工 程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力 系统继电保护(E-mail:sangjianbin7@126. com);

包明磊(1977—),男,浙江宁波人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护;

李玉平(1978—),男,湖南郴州人,高级工程师,主要研 究方向为电力系统继电保护。

#### Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser

SANG Jianbin<sup>1</sup>, BAO Minglei<sup>1</sup>, LI Yuping<sup>1</sup>, WAN Luofei<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, ZHU Yucong<sup>1</sup>

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China;2. NARI Group Corporation,Nanjing 210006,China) Abstract: The start-up characteristics, operating characteristics and relay protection configuration scheme of 300 Mvar synchronous condenser that has been put into operation are introduced. The influence of the harmonic characteristics during the start-up process on the synchronous condenser protection is analyzed, based on which, the blocking logic of the synchronous condenser protection during the process of start-up and grid-connection operation is discussed, and the state blocking configuration of the synchronous condenser protection, according to the harmonic characteristics and frequency tracking in the synchronous condenser protection, according to the harmonic characteristics and frequency conversion characteristics in the start-up process, the low-pass filtering and zero-crossing jitter discrimination are added in the frequency measurement methods. The simulation and experimental verification show that the zero-crossing frequency measurement after anti-interference processing can not only guarantee the accuracy and response speed, but also have good anti-interference performance.

**Key words**: synchronous condenser; relay protection; protection configuration; state blocking configuration; frequency tracking; zero-crossing frequency measurement; simulation

• **+** • **+** • **+** • **+** • **+** • **+** • **+** • **+** 

(上接第 216 页 continued from page 216)

## Calculation and verification for stray loss of transformer copper shield under harmonic excitation

ZHAO Zhigang, YIN Saining, GUO Ying, LIU Jia, YANG Kai

(Province-Ministry Joint State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical

Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract**: By referring to the harmonic loss calculation method of converter transformer provided by IEC61378-2 standard, an analytical formula for calculating stray loss of transformer copper shield is obtained. Based on the simplified model of P21<sup>e</sup>-EM1, a new method of stray loss mea-surement is adopted, in which the stray loss in the structure is obtained by subtracting the accurate simulation value of the model excitation coil loss from the total loss measurement value of the model. The obtained results are used as experimental values to verify the calculation result of the analytical formula. The results show that the calculative results of the fundamental wave loss of the copper plate are generally consistent with the experimental values. The copper plate loss under the fundamental wave superimposed multiple harmonic excitation is almost the same as the sum of the copper plate loss under each individual harmonic excitation. Under the same excitation current frequency, the stray loss of the copper plate satisfies a certain proportional relationship with the square of the current size. Under the same excitation current size, the relationship between the copper plate loss and the 0.8 times of the current frequency does not satisfy the frequency characteristic given by IEC standard. In these regards, a correction factor that considers the magnetic field distribution is introduced to correct the frequency characteristics. The effectiveness of the correction factor is verified by comparison results obtained from the correction approach and the experimental value.

Key words: power transformers; copper shield; harmonic current; stray loss; IEC61378-2; P21°-EM1 model