

DOI: 10.7667/PSPC201638

300 Mvar 大型同步调相机的启动及继电保护

邹东霞, 余锐, 聂娟红, 苏毅

(北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 随着直流输电、新能源、大电网、特高压等技术的发展, 同步调相机重新得到关注, 300 Mvar 大型同步调相机即将使用。综述了我国调相机的以往应用状况及大型同步调相机的需求背景, 介绍大型调相机的静止变频 SFC 启动方式。重点分析几种特殊的调相机保护功能及原理。首次提出了 300 Mvar 调相机的继电保护功能配置方案、原理及实现等。

关键词: 同步调相机; SFC 启动; 调相机继电保护

SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser

ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, SU Yi

(Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: More attention is paid to synchronous condenser nowadays with developing of DC transmission, new energy resources, large HV power grid and EHV technology. 300 Mvar synchronous condenser (CS) will be put into service soon in China. This paper summarizes CS present applying status, as well as requirement background and SFC (static frequency converter) start mode of large CS. Some special relay protective functions for CS are analyzed in detail. Relay configuration scheme, principle and implement method of the 300 Mvar CS are put forward.

Key words: synchronous condenser; SFC (static frequency converter) start; relay protection of condenser

0 引言

目前国内同步调相机最大单机容量为 160 Mvar, 尚未使用过 300 Mvar 调相机, 本文调相机继电保护配置方案及原理等为首次提出(2016 年 3 月), 属抛砖引玉。实际上, 国内运行中的大型调相机很少, 上世纪投运的 100 Mvar 以上级调相机后来也部分拆除。GB/T 14285《继电保护和安全自动装置技术规程》的 1993 版尚有同步调相机保护要求, 而 2006 版已无调相机保护内容^[1]。

1 无功补偿与调相机

1.1 无功补偿与我国同步调相机的应用状况

电网发展对系统稳定性提出更高要求^[2], 电压调节及无功补偿是一个重要方面, 电网可靠运行要求充足的系统无功储备、合理的无功电源配置。

电力系统的无功源, 主要有同步调相机、并联电容器、电抗器、静止补偿器等多种; 发电机既是有功源, 又是最基本的无功源。调相机在我国电网中的应用有过一番变迁。作为专用的无功功率源,

调相机与其他几种无功源相比, 其输出的无功功率可连续控制、灵活调节无功数值, 精度高, 无差调节, 易于提高系统稳定性。当出现短路故障、电压降低时, 换流站里其他电容型补偿设备的出力也下降, 容量与电压平方成正比, 而调相机无此问题。但是, 调相机的各种成本相对较高, 加之负荷侧的就地无功补偿、系统的同步电动机等逐渐广泛应用, 调相机受到制约, 所占系统补偿容量之比日益下降。曾有上世纪八九十年代投入使用的 100 Mvar 以上级别的同步调相机, 但后来已部分弃用。

现在大容量的电力同步调相机又引起重视, 300 Mvar 调相机工作已启动, 投入使用应是指日可待。

1.2 300 Mvar 大型同步调相机的需求背景

近年来, 随着直流输电、新能源^[3]、大电网、特高压^[4]等技术的发展以及电力电子设备大量应用, 电网运行特性变化很大, 交流与直流、送端与受端相互影响, 带来电压和频率稳定、电网的安全运行等问题。系统所需无功日渐增多, 需解决电网的无功与电压问题, 加强无功功率补偿及调节能力。

同步调相机是专用无功功率源, 对于大电网系

统中受电端、送电端的无功不足都可动态补偿, 可加强系统的无功储备, 维持电压和系统稳定。其调节范围可滞后/可超前(滞相/进相), 能发出或吸收感性无功; 是旋转设备, 可向系统提供转动惯量……当成本不再是最首要因素时, 大型同步调相机即将在特高压、直流系统、大电网系统中获得应用, 国家电网公司规划“十三五”期间投运一批大型调相机组。

我国可生产的调相机最大单机容量约 100 Mvar(凸极式)、300 Mvar(隐极式)。国网计划建设的为 300 Mvar 调相机组, 其进相无功调节深度优于传统调相机。

2 300 Mvar 大型同步调相机的启动

2.1 启动方式—SFC

调相机的启动只能借助外部方式, 不能直接自启动, 目前所用启动方式有异步启动、低频启动、同轴励磁启动、同轴电动机启动等, 都只适用于容量较小的调相机(目前最大为 160 Mvar)。

对于 300 Mvar 大型调相机, 优先采用静止变频 SFC 启动方式(Static Frequency Converter), 利用晶闸管变频器产生频率可变的交流电源对调相机进行启动, 并在其并网后退出运行。此方式在多机启动时可互为备用, 多机共享, 也降低成本。SFC 启动的调速范围广, 频率控制精度高, 并网冲击小, 具有软启动性能。另外, 静止设备 SFC 也具有操作简便、运行成本低、日常维护方便等优点。

如图 1 所示, 调相机启动时, 先由励磁建立转子磁场。启动电源从外部电网引接(如引自 10 kV 厂用电), 经由专用的隔离变压器后通过 SFC 变频启动设备进行整流和变频, 再经隔离开关输出给调相

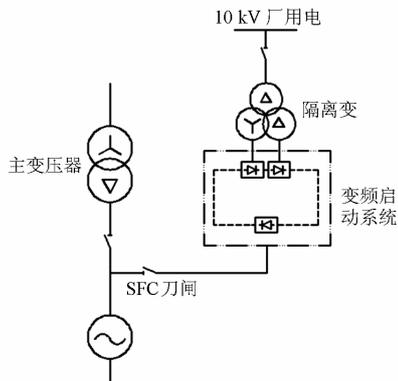


图 1 调相机的 SFC 静止变频启动示意图

Fig. 1 Static frequency converter (SFC) of synchronous condenser

机定子, 拖动整个机组升速至同步速以上(105% 额定转速)。再断开变频器开关, 转子进入惰转模式。在转速降到额定值 3 000 rpm 前, 增加励磁使调相机电压升到额定值, 调相机满足同期条件后与系统并网, 完成启动。

2.2 调相机启动过程对继电保护的影响

调相机启动是由外部 SFC 装置来输送电力将电机拖动的, 在启动过程中, 输入到继电保护装置的电流、电压模拟量, 为明显的低频特性、而且其频率处于变化中, 从 0~50 Hz 范围都有。相应地在调相机保护配置及实现方法里, 需充分考虑低频特性、且能满足此特殊工况下对调相机的保护。

保护需配置一些特殊功能应对低频工况, 如调相机的低频过流保护、启停机差动保护、启停机定子接地保护等, 相关的保护算法应与信号的频率无关, 采用低频转变特性良好的传感器, 能够正确计算低频状态下的电流电压模拟量。

另外, 有的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, 待调相机并网后再自动投入这些保护功能, 详见后文。

3 300 Mvar 同步调相机的继电保护

3.1 几种特殊的调相机保护功能

现 GB/T 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》(以下简称“规程”)里没有专门的调相机保护内容。1993 老版规程对调相机保护的部分要求:“可参照同容量、同类型的发电机保护的规定装设保护……”。但是有几种特殊的调相机保护功能, 与发电机保护是不同的, 分析如下:

3.1.1 纵联差动保护

这是反映调相机内部定子绕组相间短路的主保护, 可采用比率制动特性, 原理与发电机纵差保护基本相似, 但需考虑在调相机启动过程中是否退出(闭锁)差动的问题。

调相机纵差保护与其启动方式、机端是否设置断路器等都有关。SFC 启动的大型调相机之前未曾有过, 这里以 SFC 启动的燃气轮发电机为例分析。

发电机机端有可能带出口开关 GCB, 也有可能不带, 带和不带的情况都有, 各有利弊。已有大型机组带 GCB 的多个应用, 其中不乏 1 000 MW 汽轮机组、480 MW 燃机级别的。对于带机端 GCB、由 SFC 启动的燃气轮机组, 差动保护有两种情况:

(1) 若发电机差动保护 87G 的机端电流取自 GCB 上口 CT(即图 2 的 A 点, 靠近系统侧)。

在机端出口开关 GCB 未合、SFC 正常启动过程中, 该机端 CT 没有电流流过, 而中性点 CT 有

电流,从而保护能感受到差流。此时发电机纵差保护应闭锁以防误动,而由低频过流保护反应发电机短路故障。待 SFC 启动结束、GCB 合上、机组并网后再自动投入差动保护。

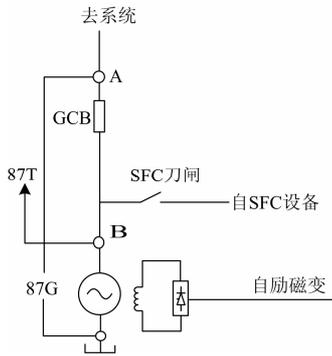


图 2 纵联差动保护 87 G 示意图

Fig. 2 Generator differential protection (87 G) with SFC connection

(2) 若差动保护的机端电流若取自 GCB 下口 CT(即图 2 的 B 点,靠发电机侧)。

SFC 接入点在发电机差动保护 87G 范围以外,在 SFC 启动过程中差动保护不会误动,可以投入 87G。

以上对燃机纵差保护的 analysis,对调相机仍适用,国外有大型调相机带 GCB 的应用。若机端有 GCB,要对上述两种情况不同处理:前者需在启动过程中闭锁纵差保护,后者不需。若机端无断路器,同上类似,如果 SFC 注入点的位置在差动保护 87G 范围内,则启动过程中需闭锁差动以防误动;否则启动时可投入 87G。保护应可设置启动时是否闭锁,如通过控制字方式。

另外,纵差保护里还进行电流互感器 CT 异常及饱和等判别,可选择 CT 异常时是否闭锁差动,当差动电流过大时自动解除闭锁。

3.1.2 逆功率保护、频率异常保护

这两种保护在大型发电机组中较常见,但主要目的都是用于保护汽轮机的^[5]。

发电机逆功率时,发电机从系统吸收有功功率,转为电动机运行,这对发电机本身基本没有危害,但是汽轮机叶片却可能由于过热等而损坏。在发电机频率异常时,汽轮机叶片及其拉金可能因疲劳损伤累积而断裂;限制汽轮机组低频运行的主要因素是汽轮机而不是发电机。

这类用于保护汽轮机的功能模块,由于是反应发电机电气参数的变化,所以集成在发电机保护装置里,这样更易于实现。但是,同步调相机则与发

电机不同,发电机必须有原动机(如汽轮机)拖动,而调相机则没有原动机,所以不需配置这些保护。

3.1.3 低电压解列保护

规程 1993 老版里要求装设调相机的解列保护,并就其实现方式给出“可选用下列方式:a.低频闭锁的功率方向保护;b.反应频率变化率的保护”。

本文认为解列保护对调相机是必要的,以防当调相机供电电源因故断开后,在变电所装设的低频减载装置可能因调相机的反馈而误动作,或电源侧的自动重合闸动作,将造成非同步合闸。但是就其实现方式,可考虑更简单可靠的低电压元件,动作于解列。当调相机供电电源断开后,通过低电压保护动作以实现调相机的解列。

保护在自动低频减载和自动重合闸动作前将调相机断开。

3.1.4 失磁保护和失步保护

调相机的同步电磁功率,含基本分量、附加分量两部分,基本电磁功率与励磁电流有关,而附加分量是与励磁无关的磁阻功率,在励磁消失后(即失磁)仍存在^[6]。隐极调相机虽理论上直交轴电抗相同,但实际上有工艺、制造离散性等导致的微小偏差,且转子有大、小齿的差别(如图 3),所以存在着 $X_d > X_q$;另一方面,因调相机不发有功、不带负载、也无原动机等,各种损耗及其产生的制动转矩都很小,上述附加分量对应的电磁转矩足以克服制动转矩,驱动调相机保持同步运转;而且剩磁建立的同步转矩也增加了同步运行的稳定性。所以,调相机具备无励磁同步运行的能力,这也为实践所证实^[7]。

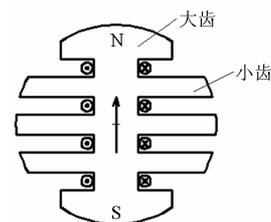


图 3 隐极机转子示意图^[8]

Fig. 3 Schematic diagram of the non-salient rotor pole

调相机的无励磁运行本质为欠励的极限,从系统吸收无功的能力达到最大。失磁前调相机向系统发出额定无功 Q_1 (过励状态),完全失磁后自系统吸收最大无功 Q_2 ,导致电网出现 Q_1+Q_2 的无功缺额,可能引起系统电压下降。失磁保护在反应励磁系统的故障的同时,也消除对系统无功、电压的影响。

调相机失磁后没有静态稳定和失步问题。发电机失磁保护里的定子阻抗判据,无论是静稳阻抗圆还是异步圆,在调相机失磁保护里可不必设置。

调相机的失磁保护, 电气量判据可以由无功方向元件、低电压元件组成。保护还应配置闭锁元件, 以防在振荡、短路或电压回路断线等异常情况下的误动。

由于调相机在失磁后仍可维持同步运行, 不会导致失步, 因此调相机保护里可不必配置失步保护功能。

3.1.5 GCB 失灵启动(若有 GCB)

若调相机有机端出口断路器 GCB(见前面 3.1.1 节), 此功能作为 GCB 失灵时的启动元件。在并网前需将此该功能退出, 并网后再投入。

此功能通过常规的机端相电流、负序电流元件相“或”, 并结合保护动作触点开入等实现。

3.1.6 方向过流保护

反应调相机内部短路的后备保护, 可采用方向过流保护。为提高灵敏度, 可用复压启动的过流及负序过流保护。为保证外部故障时保护的可靠性, 可采用 90° 接线的方向元件。

调相机的过流保护, 还需考虑以下方面:

(1) 只作为调相机内部故障的后备保护, 不需要做外部故障的后备, 1993 老版规程里, 调相机过流保护“可不反应外部短路”。这与发电机保护有所不同, 发电机过流保护通常也兼做外部故障的后备, 为“对发电机外部相间短路故障和作为发电机主保护的后备”^[1]。

(2) 调相机保护在只反映内部故障时, 可不必具备电流“记忆(保持)”功能。这与发电机保护“宜采用带电流记忆(保持)……”不同, 带记忆是以防自并励发电机在外部靠近机端故障时, 因机端电压下降导致短路电流衰减、从而后备保护可能拒动。

3.1.7 低频过流保护

此功能用于反应调相机在低频启动过程中的短路故障, 判别电流异常增大。在 SFC 启动过程中投入, 这时未并网、频率还未稳定到工频、机端 GCB(若有)也未合闸, 保护受主断路器位置状态与低频元件控制。调相机并网后处于正常工频状态时, 该保护自动退出。

保护反应低频下的电气量, 所以实现时需采用与频率无关的算法。

3.1.8 启停机保护

用于反应调相机在启动和停机过程中的主要故障, 如相间短路和定子接地故障, 可配置启停机差动保护和基波零压定子接地保护各一套。此为低频工况的保护, 受主断路器位置状态与低频元件控制, 在正常工频运行时自动退出。保护所采用的算法与信号的频率完全无关。

若调相机纵差保护需要在启动时退出(见 3.1.1 节), 则也应同时退出启停机差动保护部分, 这两者的 CT 配置是一致的。

3.2 保护配置方案及说明

300 Mvar 大型同步调相机的保护配置, 参照同容量、同类型的发电机保护, 并根据调相机的特点设计保护(见 3.1 节), 主要保护配置及说明如下。

1) 纵联差动保护

见 3.1.1 节。

2) 定子绕组匝间短路保护

如果调相机定子绕组有并联分支、且引出到机外的引线上能安装横联差动 CT 时, 可首选单元件横差保护反应匝间短路, 此方案简单可靠, 灵敏度高。因取自发电机双 Y 接线两中性点连线上的电流, 从而可反映内部匝间、相间短路和分支开焊故障。

如果调相机结构上无法装设一次横差 CT, 可采用纵向零压匝间保护, 取自机端的专用纵向零压互感器的开口 $3U_0$ 。增设负序方向闭锁元件, 以防保护在外部故障等情况下误动。

3) 定子绕组接地保护

300 Mvar 大容量调相机上, 需要装设保护区为 100% 的定子接地保护, 无死区。

4) 定子绕组过电压保护

用于反应定子绕组的过电压或绝缘状况变化。

5) 定子绕组过负荷保护

即调相机的对称过负荷保护, 反映定子绕组的发热状况, 由定时限和反时限段组成, 反时限特性反映定子电流变化时的热积累, 随定子绕组所允许的过载能力确定。

当启动时, 如过负荷保护可能动作, 应使它暂时退出运行(以下同)。

6) 转子表层(负序)过负荷保护

不对称过负荷保护, 反应定子绕组的负序电流大小, 保护转子以防表面过热, 含定时限和反时限段。

7) 励磁绕组过负荷保护

反映调相机励磁系统故障或强励时间过长, 与励磁绕组的过热特性相匹配, 可由定时限和反时限段组成。

8) 励磁回路接地保护

调相机转子一点接地保护, 反应转子对大轴绝缘电阻的下降。常见的有“乒乓式”变电桥原理, 也可采用注入式原理, 在未加励磁时也能起保护作用。

9) 过激磁保护

反映过激磁倍数 U^*/f^* 的增大而动作, 含定时限和反时限段, 反时限动作特性需与调相机的过激磁承受能力相匹配。

10) 误上电保护

即突然加电压保护,应能区分调相机误合闸(误上电)和正常并网状态。该保护在调相机解列后投入运行,并网后自动退出。

11) 低电压解列保护

见第 3.1.3 节。

12) 失磁保护

反应调相机的励磁异常下降或消失,见第 3.1.4 节。

13) GCB 失灵启动(若有 GCB)

见第 3.1.5 节。

14) 后备保护

采用方向过流保护,见第 3.1.6 节。

15) 低频过流保护

见第 3.1.7 节。

16) 启停机保护

见第 3.1.8 节。

17) 非电量保护

18) 其他故障和异常运行判别

如 CT 和 PT 异常判别等,与发电机保护的类似。

4 结束语

大型同步调相机可动态补偿无功,加强系统的无功功率储备。300 Mvar 大型调相机即将在国内电网应用,本文从其静止变频 SFC 启动、继电保护的配置方案及原理等方面加以论述,重点分析了几种特殊的调相机保护功能。

由于国内已多年没投运大型调相机,300 Mvar 同步调相机及其继电保护、调相机的 SFC 启动等方面都是新事物,文中一些观点为首次提出(2016 年 3 月),为引玉之砖。

参考文献

[1] GB/T 14285 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

[2] 李晔,张保会,薄志谦. 低频低压继电器联合减载方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 48-54.

LI Ye, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. A combined deloading method based on the underfrequency and undervoltage relay[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 48-54.

[3] 张顺,葛智平,郭涛,等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.

ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.

[4] 姜自强,刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.

JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.

[5] 王维俭,侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1989.

[6] 吴大裕. 电机学(下册)[M]. 北京:水利电力出版社,1979.

[7] 周德贵. 发电机组作调相机运行的分析与实践[J]. 四川电力技术, 2001, 24(3): 1-6.

[8] 高中德. 电力系统基础-电气二次人员入门必读[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-15

作者简介:

邹东霞(1969-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zoudongxia@sf-auto.com

余锐(1977-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yurui@sf-auto.com

聂娟红(1978-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护. E-mail: niejuanhong@sf-auto.com

(编辑 周金梅)