

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.02.001

新型同步调相机的关键技术及研究进展

程明¹, 田伟杰¹, 王伟¹, 蔚超²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着直流特高压输电系统的发展,大容量新型同步调相机成为满足系统无功动态需求的最优选择,逐渐成为研究热点之一。基于此,对新型同步调相机的研究现状进行了系统的总结和归纳。首先,从新型同步调相机的数学模型、运行状态以及控制策略3个方面对其运行原理进行介绍。其次,将其与电力电子无功补偿设备作对比,阐述了新型同步调相机优越的动态无功输出特性,并研究了其无功输出特性的影响因素。最后从新型同步调相机的现有故障诊断技术和参数辨识技术2个方面对其状态监测技术的研究现状进行总结。文中综述了新型同步调相机的数学模型、控制策略和运行状态监控等方面的研究情况,能够为新型调相机的进一步研究提供参考。

关键词:同步调相机;运行原理;无功特性分析;状态监测;控制策略

中图分类号:TM342

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)02-0002-08

0 引言

我国能源资源与电力负荷呈逆向分布,高压输电距离长、容量大、区域广的特点突出,其中直流特高压输电具有输送容量大等突出优势,得到快速发展和广泛应用^[1-2]。针对我国特高压直流送、受端动态无功供给不足和电压支撑能力较弱的突出问题,客观要求直流大规模有功输送,必须匹配大规模动态无功,即“大直流输电、强无功支撑”。随着直流特高压输电线路的建设,对于华东地区的直流受端网络,直流换相失败的问题以及电网电压的稳定性问题日益显著。同时直流特高压线路多建设在风力发电、光伏发电广泛分布的偏远地区,短路容量较小,对送端直流故障的容错能力较差,易引发大面积脱网故障。

同步调相机是运行于发电机状态、向电网提供和吸收无功功率的同步电机,不带机械负载,也不带原动机,用于电力系统无功补偿,维持电网稳定。传统调相机从上个世纪就已经投入到电网中运行,但由于其成本高、容量不足等缺点,慢慢退出电网运行,被逐渐淘汰。但是,近年来随着直流特高压输电工程的推进,用于满足输电需求的新型调相机重新成为研究热点之一。新型调相机是在传统调相机设计的基础上,对其动态响应能力和无功补偿能力进行优化的一种无功发生装置。新型调相机的调节能力受系统影响小,有较强的高低电压穿越能

力、较高的强励磁能力。新型调相机可以在系统出现故障的时候维持系统电压稳定,并为系统提供短路容量,对系统的暂态变量有较强的支撑能力^[3-6]。因此,在直流电网运行的受、送端分别投入大容量新型调相机以作为动态无功补偿装置,是解决直流特高压输电无功不足问题的切实有效方案。

大型新型同步调相机投入电网运行时,主要以解决电网故障的无功补偿问题,然而电网故障时的冲击电流较大,长期以来会对调相机本体产生较大影响,严重时造成温度过高、绝缘损坏、机械振动,引发电机故障,从而造成电网故障的进一步扩大。虽然在同步调相机系统中设有继电保护设备,但保护装置只能在故障发生之后动作,不能够在故障前有效防范,也不能对故障类型及位置进行有效判别。因此,为保证新型调相机对电网故障的应对能力,需要迫切开展对新型调相机的状态监测技术的研究工作。

文章首先介绍了新型同步调相机的运行原理,并将其与传统调相机以及电力电子无功补偿器作对比,阐述了新型同步调相机的动态无功输出特性。其次,分析了新型调相机的运行工况及状态参数对其动态无功输出特性的影响。最后从新型调相机的现有故障诊断技术和参数辨识技术2个方面,对调相机的状态监测技术研究现状进行总结。

1 新型调相机运行原理

调相机系统主要由调相机本体、励磁系统、升压变压器系统、启动系统、冷却系统、油系统以及保护系统组成^[7]。调相机本体和励磁系统是整个调

收稿日期:2019-09-21;修回日期:2019-10-13

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“改善大型城市电网电压支撑能力技术措施研究与示范应用”

相机系统的核心部分,通过调节励磁系统使得调相机工作于不同的状态,实现对电网的调节功能。

1.1 调相机建模

调相机可被作为同步发电机的一种特殊形式进行研究,故新型调相机的电机建模可以参照同步发电机建模的过程。

调相机模型有 2 种形式:一种是以磁通作为状态变量,由原型电路直接推导出的 PARK 电机模型;另一种是以电机电势为状态变量,由 PARK 模型推导出的实用模型。文献[8]详细介绍了发电机的 PARK 模型,并在 2 种不同的假设条件下推导出了电机实用模型,并且将模型计算结果与时步有限元计算结果对比,分析 2 种实用模型的暂态计算准确性^[8]。

假设绕组电抗满足如下关系式:

$$\begin{cases} x_{af}x_D = x_{aD}x_{fD} \\ x_{ag}x_Q = x_{aQ}x_{gQ} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{af} , x_{aD} , x_{aQ} , x_{ag} 分别为电枢绕组与励磁绕组 f、阻尼绕组 D、Q、g 的互感电抗。

根据以上假设,可导出实用模型^[8]:

$$\begin{cases} T''_{d0} \frac{de''_q}{dt} = e'_q - e''_q - (x'_d - x''_d) i_d \\ T'_{d0} \frac{de'_q}{dt} = E_f - e'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} (e'_q - e''_q) \\ T''_{q0} \frac{de''_d}{dt} = e'_d - e''_d - (x'_q - x''_q) i_q \\ T'_{q0} \frac{de'_d}{dt} = -e'_d - \frac{x_q - x'_q}{x'_q - x''_q} (e'_d - e''_d) \\ u_d = e''_d + x''_q i_q - r_a i_d \\ u_q = e''_q - x''_d i_d - r_a i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: e''_d , e'_d 分别为直轴的超瞬态电动势和瞬态电动势; e''_q , e'_q 分别为交轴的超瞬态电动势和瞬态电动势; T''_{d0} , T'_{d0} 分别为直轴的超瞬态开路时间常数和瞬态开路时间常数; T''_{q0} , T'_{q0} 分别为交轴的超瞬态开路时间常数和瞬态开路时间常数; x''_d , x'_d 分别为直轴的超瞬态电抗和瞬态电抗; x''_q , x'_q 分别为交轴的超瞬态电抗和瞬态电抗; x_d , x_q 分别为交直流同步电抗; u_d , u_q 为交直流电压; i_d , i_q 为交直流电流; r_a 为定子电阻。

1.2 调相机运行状态

1.2.1 调相机 3 种运行状态

从运行原理上看,调相机是一种空载运行的同步发电机,其运行状态分为 3 类:进相运行、迟相运行和空载运行。调相机 3 种典型运行状态的简化相量图如图 1 所示。

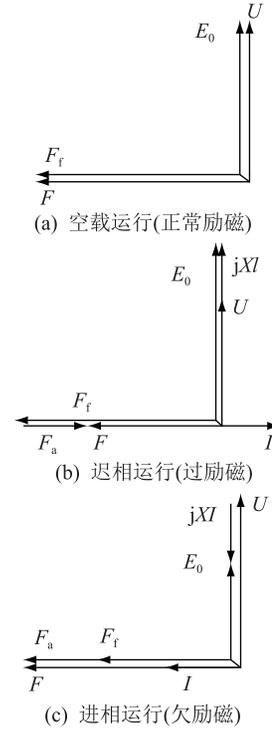


图 1 调相机 3 种运行状态(发电机惯例)

Fig.1 Three operating states of the synchronous condenser (generator practice)

空载运行是指电机的励磁系统工作于正常励磁状态,电机励磁磁势 F_f 等于定子合成磁势 F 。既不吸收无功,也不发出无功。

迟相运行是指电机的励磁系统工作于过励磁状态,电机励磁磁势 F_f 大于定子合成磁势 F ,此时定子电流滞后于定子电压,需要向电网发出感性无功功率,可补偿电网所需无功功率。

进相运行是指电机的励磁系统工作于欠励磁状态,电机励磁磁势 F_f 小于定子合成磁势 F ,此时定子电流超前于定子电压,需要从电网中吸收感性无功功率,可避免电网电压过高。

调相机运行于 3 种状态时,励磁系统需要根据电网系统的变化,动态提供励磁电流,励磁电流的变化以及电网谐波电压会对调相机内部的磁场产生影响。文献[9]使用有限元法建立新型调相机的三维模型,对 3 种工作状态下的调相机端部磁场和结构件的涡流损耗进行分析,以便于优化调相机结构设计。文献[10]采用有限元法建立调相机的二维模型,研究了电网谐波电压对电机内部损耗的影响,分析了转子损耗与谐波电压之间的关系。

1.2.2 调相机在电网中位置与运行状态的关系

新型调相机一般都是投入于直流特高压输电系统的送、受端系统中,用以满足端部换流站对无功的需求,维持换流站母线电压的稳定。然而电网的送、受端系统的运行特性不同,其对于无功补偿

能力的需求也不同^[11-12]。

直流特高压送端常会出现直流闭锁故障,使得电网中有大量的感性无功功率剩余,导致电网中出现过电压,影响电网的稳定运行。所以输电系统送端面临的主要问题是感性无功功率过多,系统出现暂态过电压。因而,调相机装于系统送端应具有较为优越的进相能力,以保证其对故障的快速响应和处理能力。文献[11]对送端系统故障类型及调相机对应无功补偿能力的归纳,如表1所示。

表1 电网送端系统故障对调相机要求
Table 1 Requirements for phase modulator for faults in power system sender

送端系统问题类型	故障类型	故障严重程度	运行状态	运行要求
交流母线过电压	双极闭锁	强	进相	暂态无功输出深度进相
	直流再启动	弱	进相	无
	换向失败恢复	强	进相	暂态无功输出
交流母线低电压	换相失败发生	弱	迟相	无
	交流系统故障	较强	迟相	无

直流特高压受端一般被布置在负荷中心,与送端不同,系统受端出现逆变器换相失败故障的几率更高。换相失败故障会使得电网中无功功率不足,导致电网电压过低。若暂态低电压持续较长时间,则电网容易崩溃,影响电网的稳定性。所以,相对于送端系统而言,调相机装于系统受端应具有较为优越的迟相能力,以向电网提供足够的感性无功功率,维持电压恒定。文献[11]对受端系统故障类型及新型调相机对应无功补偿能力的归纳见表2。

表2 电网受端系统故障对调相机要求
Table 2 Requirements for phase modulator due to faults in receiver system of power grid

受端系统问题类型	故障类型	故障严重程度	运行状态	运行要求
交流母线过电压	双极闭锁	弱	进相	无
	直流再启动	弱	进相	无
交流母线低电压	换相失败发生	强	迟相	暂态无功输出
	交流系统故障	强	迟相强励	暂态无功输出

1.3 调相机的控制策略

1.3.1 调相机的启动控制

调相机没有定位力矩,无法自启动,只能依靠外部设备启动,启动方式包括:直接启动、发电机拖

动启动以及静止变频器变频启动等方式^[13]。直接启动会在调相机定子中产生较大的启动电流,造成较大冲击,易损坏电机。电机拖动启动由于电机输出功率以及联轴设施的限制,适合启动小容量的机组。静止变频器启动是使用静止变频器向调相机定子供给频率可变的电流,实现调相机的启动。静止变频器启动,具备多种优点,结构相对比较简单,维护方便,调速范围广,控制灵活,成为调相机启动方式的首要选择。

目前静止变频器启动的方式主要有2种^[13]: (1) 静止变频器将调相机速度调节至同步速后,退出运行,调相机并网运行。(2) 静止变频器将调相机速度调节至105%同步速之后,退出运行,由其他装置调节调相机定子电压的频率、相位和幅值与电网电压一致后,调相机并网。

文献[13]对静止变频器的工作原理进行了介绍,并且对上述2种启动方案进行了分析对比,结果表明2种方案各有优缺点,均能满足启动要求。针对第二种启动方案,文献[14]以国网扎鲁特换流站为例,研究使用该方案启动调相机时关联开关的变位时序,进而验证该方案的正确性。文献[15]对静止变频器启动方式进行了介绍,并着重分析了调相机启动的2个阶段,即恒流励磁电流控制阶段和恒电压控制阶段。

1.3.2 调相机的励磁控制

调相机并网以后,其控制方式是通过监测电网的运行状态,调节励磁电流维持电网电压的稳定,实现调相机对电网无功功率的动态补偿。现有的调相机励磁控制策略可分为2类:机端电压调节控制和电网电压调节控制^[15]。

机端电压调节是一种双闭环的控制方式,其外环对无功功率闭环,内环对机端电压闭环。这种控制策略的内环调节速度较快,外环调节速度较慢,调节时间较短,但无功支撑能力较差。文献[16]针对机端电压调节控制策略无功支撑能力不足的情况,提出了一种无功和电压协调控制的策略,并进行了仿真验证。

电网电压调节控制是在机端电压调节控制的基础上,加入了电网电压闭环环节,保证电网电压的恒定,充分发挥调相机的无功作用。这种策略对电网有更大的无功支撑能力,但会在调节的过程中出现调节过电压的问题。

2 调相机的无功特性分析

新一代调相机之所以投入到实际电网系统中,

是因为其容量大、过载能力强以及动态响应速度快。调相机的无功特性分为稳态无功特性和动态无功特性。稳态无功特性是在系统稳态时,由励磁系统控制调相机输出无功的特性;动态无功特性是在电网电压突变时,调相机对电网的调节,包括自发无功特性和调节无功特性。调相机的自发无功特性,是在电压突变的瞬间产生,并随着时间衰减,为调相机物理特性。调相机的调节无功特性是在电压突变时,由励磁系统调节励磁电流控制调相机,其无功特性受到励磁系统调节特性的影响。

2.1 新型调相机与电力电子补偿装置的无功特性比较

传统调相机在上世纪用于向电网提供无功功率,从上世纪九十年代开始,逐渐被电力电子补偿装置取代,从而退出电力系统。近年来,随着直流特高压工程的推进,新型调相机因其容量大、动态响应能力强等优点进入人们的视线,未来可能会成为取代电力电子补偿装置的新型设备。文献[11]将传统调相机与新型调相机对比,分析了两者在应用场合、容量等级以及励磁方式等方面的区别,论证了新型调相机相对于传统调相机,有更加优越的动态响应性能以及更大的无功补偿容量。

目前应用比较广泛的无功补偿设备是静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)。SVC的原理主要是将传统的静止无功发生器与电力电子装置相结合,通过改变电力电子装置的导通情况实现对无功的补偿^[17]。STATCOM通常与电网并联,通过调节电路交流侧输出的电流或电压,实现无功补偿^[18]。

调相机和SVC、STATCOM装置在原理上有着本质的区别。在动态响应能力方面,三者均具备响应能力,而SVC和STATCOM装置在进行无功响应之前需要经过电子电路计算,故调相机有更快的响应速度。在无功容量方面,SVC装置迟相的能力优于STATCOM,调相机远远优于前两者。文献[19]将上述3个装置的特性进行了对比分析,利用仿真比较了3个装置在动态无功支撑能力方面的差异,结果表明,新型调相机具备更强的动态无功支撑能力,更能适应直流特高压电网的动态无功需求。文献[20]对比了调相机和SVC应对电网故障的动态性能,从故障类型、故障位置以及不同短路比3个方面进行仿真对比,结果表明:应对轻微故障时,SVC有较好的动态响应性能;应对严重故障时,SVC无功支撑能力不足,调相机能提供足够的无功,稳定

电网电压。

2.2 调相机无功特性的影响因素

调相机相对于电力电子补偿装置,具有更强的动态无功输出能力。在电网稳态运行的时候,电网中有足够的无功功率,而电网出现故障时,调相机的暂态输出能力才是其主要问题。同大多数的同步发电机一样,调相机的暂态输出能力与电机设计参数、调相机附加设备以及电网特性有关。

2.2.1 调相机设计参数的影响

现有研究表明,调相机的暂态无功输出能力主要取决于直轴次暂态电抗和主变短路电抗,暂态无功特性与上述2个参数的和成负相关。但直轴电抗过小,会对无功功率的输出产生短暂的抑制效果。文献[21]通过合理的简化,建立了调相机的暂态模型,对小扰动状况以及强励动作期间的调相机暂态特性进行分析,为调相机在暂态输出能力方面的优化设计提供理论支撑。因而对于电机参数的选取,直轴次暂态电抗应小于0.14 p.u.,主变短路电抗应小于0.12 p.u.^[21]。此外,直轴的开路时间常数对调相机的暂态输出能力也有一定影响,两者同样成反比。所以,直轴开路时间常数应不大于8 s,短路时间常数应不大于0.95 s^[21]。

励磁参数对调相机的无功输出特性有较大的影响。文献[11]建立了调相机和直流特高压输电系统耦合仿真模型,结合动态无功特性的理论分析,结果表明,增大励磁电阻、减小励磁电抗可减小调相机的动态响应时间,在电机设计时可从以上几个方面入手。文献[22]对多组励磁电阻下的调相机动态输出能力进行仿真,结果表明励磁电阻越大,调相机的动态响应时间越短。

电机的温升、电磁特性、绝缘等方面的特性也会对调相机的无功输出特性产生影响。文献[23]分析了双水内冷调相机的暂态和次暂态特性,根据电网故障对调相机性能的需求,优化调相机的电磁特性、冷却系统、绝缘系统和结构设计等方面,以提高调相机的暂态输出能力。

2.2.2 电网特性及励磁系统的影响

调相机的动态无功支撑效果与电网的故障程度呈正相关,但其无功输出能力受到调相机本体参数的限制。电网的故障程度越深,调相机的无功支撑效果越好。文献[24]将300 Mvar调相机与直流特高压输电系统进行联合仿真,分析电网受端出现电压暂降与电网故障的关系,结果表明,电压暂降越多,调相机的输出无功越多,对电网电压提升效果越好。

励磁系统的强励能力和欠励能力对调相机动态无功输出能力会产生影响。文献[25]对调相机与励磁系统的强励电压比及欠励电压比之间的关系进行仿真分析,结果表明强励电压比与调相机的无功输出特性正相关,欠励电压比与其呈负相关。

3 调相机的状态监测技术

调相机的状态监测技术是对调相机的运行状态进行检查监测,以判断其是否处于正常运转状态。状态监测技术的目的在于提前确定调相机的异常状态或者零部件的受损信息,从而提前采取措施进行调整,避免严重停机故障的发生。

调相机的状态监测技术可以分为运行特性监测和故障诊断,根据状态监测的方式可将其分为在线监测和离线监测。由于离线监测时,调相机需要退出运行,在停机状态对电机进行检修,在此不予讨论。

3.1 运行特性监测技术

由前面分析可知,当电网中出现故障时,调相机会呈现出优越的动态调节能力。调相机模型的精确度与调相机动态输出能力监测水平直接关联,因而精确的电机参数是对调相机运行特性分析的基础。

现阶段估测电机参数使用最多的方式是参数辨识法。参数辨识法是在已检测到调相机运行参数的基础上,使用监测信息对调相机的本体参数(如电阻、电抗等)进行辨识,根据辨识结果与理论分析对比,判断调相机运行特性。调相机是同步发电机的一种,但与传统同步发电机在运行特性上有很大差异。研究者在同步发电机参数辨识法的基础上,提出了多种改进的方法,应用于调相机参数辨识。

传统的参数辨识法应用于调相机时,并没有得到较好的辨识结果,原因在于调相机中多变量相互耦合,传统辨识法不适用多变量辨识的问题。文献[26]提出一种调相机逐步参数辨识法,这种方法首先确定调相机参数在不同扰动下的敏感度,然后根据参数的敏感度对参数排序,最后根据排序,使用Levenberg-Marquardt算法逐步确定调相机参数。该方法相对于传统的参数辨识法,具有更高的辨识度,并且对计算量的需求更少。

在时域辨识法中需要重复迭代无法测量的状态变量,实际工程中,瞬态和次瞬态电动势无法直接测量。为消除瞬态和次瞬态电动势的影响,文献[27]提出了一种基于时频转换的调相机参数辨识

法。这种辨识方法将调相机的六阶时域方程转换成代数方程,消除瞬态和次瞬态电动势,得到解耦后直轴和交轴传递函数,最后使用遗传算法优化传递函数的时频变换系数,对电机参数进行辨识^[27]。

为了进一步提高参数辨识的精度,部分研究者提出对不同的电气参数使用不同的识别方法。文献[28]提出了一种基于粒子群优化算法和小波变换法的调相机参数辨识法,仅识别直轴参数。这种辨识法首先使用直流阶跃电压实验获得电枢电流和励磁绕组电流响应,数学推导出2个电流响应,之后使用小波变换消除电流噪音,使用粒子群算法精确辨识直轴参数。然而该方法的不足之处是辨识超瞬态的参数时,仍存在较大误差,需要进一步矫正。

3.2 故障在线诊断技术

故障在线诊断技术是通过调相机运行参数(如电压、电流、转矩等)进行在线监测,直接对检测的信号进行处理,分析信号特征,判断调相机的运行状态。目前调相机的故障诊断方面的研究才刚刚起步,缺少对调相机各个类型的故障具体研究。

定子匝间短路故障是电机常见的故障之一,也是影响最严重的故障之一。若匝间短路故障没有得到及时发现和妥善处理,会逐渐演化成定子相间短路,造成停机事故。因此,对定子匝间短路的诊断是调相机故障诊断必不可少的一项。文献[29]和文献[30]分别从定子电流特性和定转子振动特性方面对定子匝间故障进行分析,各有优缺点。文献[29]针对短路故障会影响三相电流的幅值和非线性的特点,提出一种故障在线监测的思想,并从理论和仿真模型方面对所提方法进行验证。该方法可以通过对定子电流幅值和非线性程度的监测确定定子匝间短路的故障相和故障程度。然而该方法不能直接判断匝间故障的位置。文献[30]针对短路故障会影响调相机的电磁特性,进而影响调相机电磁转矩的特点,提出一种基于定转子振动特性的故障诊断方法,并进行场路耦合仿真。该方法可以通过对振动特性的傅里叶分析确定定子短路故障发生与否。然而定转子振动特性会受到其他类型故障的影响,易受到干扰。

转子匝间短路故障也是调相机组中常见的一种故障,轻微的匝间短路常被忽略。如果故障继续发展会使转子电流显著增加,绕组温度升高,无功出力降低,并出现其他故障,造成较大事故^[31]。文献[32]通过建立调相机转子绕组出现匝间短路的数学模型,分析了调相机转子绕组出现故障时的定

子电流特性和励磁电流特性。然而仿真结果表明,该调相机模型的计算精度仅有5%~10%。在未来的调相机研究工作中转子故障方面的研究需投入更多的精力,以精确诊断转子匝间短路故障。

由于机械加工以及运行环境的影响,调相机的长期运行会使得转子出现偏心故障。转子偏心故障会在定转子上产生不均衡的电磁拉力,造成轴承的磨损和转子表面的开裂。因而对转子偏心故障的诊断必不可少。文献[33]分别研究了调相机转子动态偏心故障和静态偏心故障对电机磁密、电磁力以及电磁转矩的影响,并分析了2种故障情况下故障恶化的趋势。

4 结语

随着新型调相机在直流特高压工程中的应用,调相机的无功特性以及状态监测研究具有重要意义。首先对同步调相机的运行原理进行了介绍,并分析了其运行状态与电网位置的关系。之后对现阶段新型调相机的无功输出特性进行了综述,将其与电力电子补偿装置进行对比,分析了新型调相机的优越性。最后,对新型调相机的状态监测技术的研究现状进行了分析归纳。从调相机运行原理、无功特性分析以及状态监测技术3个方面,对调相机的研究现状进行综述,为调相机的进一步研究提供参考。

由于现阶段对新型调相机的研究刚刚起步,在未来的研究中,还有大量工作需要进一步研究:

(1) 由于调相机的实际工况十分复杂,现阶段对调相机的建模还不精确,需要在未来的研究中提高模型和参数辨识的精度。

(2) 对于大电网系统中,新型调相机与电力电子补偿装置共同工作的协调控制以及共存情况下的无功特性仍需研究。

(3) 调相机的状态监测评价机制不完善,调相机发生多种故障时的状态特征仍然不明确,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013,37(3):566-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013,37(3):566-574.

[2] 汤涌,郭强,周勤勇,等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016,40(4):97-104.
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016,40(4):97-104.

[3] 王雅婷,张一弛,周勤勇,等. 新一代大容量调相机在电网中

的应用研究[J]. 电网技术, 2017,41(1):22-28.

WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017,41(1):22-28.

- [4] 蒋贤强,徐青山. 考虑需求响应的交直流配网调度研究[J]. 电力需求侧管理, 2019,21(2):19-23.
JIANG Xianqiang, XU Qingshan. Research on AC/DC distribution network dispatching considering demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019,21(2):19-23.
- [5] 肖繁,王涛,高扬,等. 基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(17):93-100.
XIAO Fan, WANG Tao, GAO Yang, et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHVAC/DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(17):93-100.
- [6] 陶骞,王庆,阮羚,等. 特高压直流工程大型调相机组启动调试及关键技术[J]. 中国电力, 2017,5(12):51-56.
TAO Qian, WANG Qing, RUAN Ling, et al. Contents and key technical problems in start-up and commissioning of large-scale synchronous condenser in UHVDC project[J]. Electric Power, 2017,5(12):51-56.
- [7] LIU Y, WANG C, ZOU Z, et al. Review on synchronous condenser modeling study [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018: 227-232.
- [8] 宋美红. 同步发电机不同实用模型对暂态稳定极限准确性的影响[J]. 电力工程技术, 2018,37(5):69-74.
SONG Meihong. The influence of different practical models of synchronous generator on the accuracy of transient stability limit [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):69-74.
- [9] 边旭,梁艳萍,朱二夯,等. 多工况下同步调相机端部磁场与结构件涡流损耗分析[J]. 大电机技术, 2018(6):26-31.
BIAN Xu, LIANG Yanping, ZHU Erhang, et al. Eddy current loss analysis of end magnetic field and structure parts of the synchronous condenser under multi-operating conditions [J]. Large Motor Technology, 2018(6):26-31.
- [10] 许国瑞,李金香,吴国栋,等. 电网谐波电压对同步调相机转子损耗的影响[J]. 大电机技术, 2018(1):28-33.
XU Guorui, LI Jinxiang, WU Guodong, et al. The influence of harmonic voltage of power grid on rotor loss of the synchronous condenser [J]. Large Motor Technology, 2018(1):28-33.
- [11] 马一鸣. 新型调相机接入对特高压直流输电线路动态过程的影响分析[C]//全球能源互联网发展合作组织、山东大学. 超/特高压直流输电技术会议论文集. 济南:《全球能源互联网》编辑部, 2018:207-215.
MA Yiming. The impact of new type of the synchronous condenser access on the dynamic process of UHVDC transmission lines [C]//Global Energy Internet Development Cooperation Organization, Shandong University, Conference Papers of UH-

- VDC Technology. Jinan: Editorial Department of Global Energy Internet, 2018: 207-215.
- [12] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
- CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [13] 王潇, 周平, 王洋, 等. 大容量调相机静止变频器启动方式研究[J]. 电气技术, 2016(10): 31-35.
- WANG Xiao, ZHOU Ping, WANG Yang, et al. Study on starting mode of static inverter for large capacity synchronous condenser[J]. Electrical Technology, 2016(10): 31-35.
- [14] 张寅, 武强, 王亚婧, 等. 新一代大容量调相机启动控制策略[J]. 大电机技术, 2018(6): 37-41.
- ZHANG Yin, WU Qiang, WANG Yajing, et al. Start-up control strategy of new generation large capacity synchronous condenser[J]. Large Motor Technology, 2018(6): 37-41.
- [15] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 44-50.
- SHI Xiangjian, MOU Wei, HAN Jiao, et al. Study on control strategy of large synchronous condenser[J]. China Electric Power, 2017, 50(12): 44-50.
- [16] FAN X, ZHOU Y, RUAN L, et al. Study on coordinated control strategy of reactive power compensation device in DC converter station with new-generation synchronous condensers [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, 2018: 2966-2971.
- [17] 胡婷婷. 基于 APF 与 SVC 无功补偿与谐波抑制的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017: 39-40.
- HU Tingting. Research on reactive power compensation and harmonic suppression based on APF and SVC[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2017: 39-40.
- [18] 赵波. 提高静止同步补偿器运行性能的关键技术研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013: 1-3.
- ZHAO Bo. Key technologies for improving the performance of static synchronous compensator[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013: 1-3.
- [19] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of the application of new synchronous condenser and power electronic reactive power compensation device in UHV AC/DC power grid [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [20] TELEKE S, ABDULAHOVIC T, THIRINGER T, et al. Dynamic performance comparison of synchronous condenser and SVC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1606-1612.
- [21] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
- LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new large capacity synchronous condenser[J]. Large Motor Technology, 2017(4): 15-22.
- [22] 许国瑞, 厉璇, 蒲莹, 等. 同步调相机励磁及阻尼电阻对动态运行特性的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 52-58, 67.
- XU Guorui, LI Xuan, PU Ying, et al. Effects of excitation and damping resistance of the synchronous condenser on dynamic operation characteristics [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(6): 52-58, 67.
- [23] 任章鳌, 闫迎, 晏桂林, 等. 特高压直流系统中大容量双水内冷调相机的作用及关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1795-1802.
- REN Zhang'ao, YAN Ying, YAN Guilin, et al. Research on the function and key technology of large capacity dual-water internal cooling synchronous condenser in UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1795-1802.
- [24] 胡一平, 许国瑞, 刘晓芳. 特高压近区系统不同程度电压暂降下调相机的动态响应[J]. 大电机技术, 2018(6): 32-36, 72.
- HU Yiping, XU Guorui, LIU Xiaofang. Dynamic response of the synchronous condenser with different degrees of voltage sag down in UHV near area system[J]. Large Motor Technology, 2018(6): 32-36, 72.
- [25] FAN S, HAN W, LI L, et al. Influence of synchronous condenser exciter limit on voltage stability of HVDC [C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, 2018: 210-215.
- [26] WANG A, ZHENG Z, ZHENG J, et al. Parameter identification of synchronous condenser based on sensitivity analysis of parameters [C]//2017 China International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, 2017: 725-730.
- [27] LIU Y, YAN X, WANG C, et al. Synchronous condenser parameter identification based on time-frequency transform [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018: 1484-1488.
- [28] MA Y, ZHOU Y, WANG J, et al. A new parameters identification method for novel synchronous condenser based on particle swarm algorithm and wavelet transform [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018: 593-597.
- [29] ZHOU J, RUAN L, ZHOU L, et al. A method of evaluating the stator inter-turn short circuit fault of synchronous condenser [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018: 520-524.
- [30] REN Z, WANG Z, YE Z, et al. Analysis of electromagnetic characteristics of synchronous condenser under stator inter-turn short circuit fault [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018:

- 2638-2642.
- [31] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京:机械工业出版社,2008:929-936.
- MA Hongzhong. Motor condition monitoring and fault diagnosis [M]. Beijing: Machinery Industry Press,2008:929-936.
- [32] NOVOZHILOV A N, AKAYEV A M, NOVOZHILOV T A. Currents in the synchronous condenser windings at turn-to-turn fault in the rotor winding[C]//2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016:1-4.
- [33] WANG C, LI D, HU Z, et al. Calculation on electromagnetic characteristics of synchronous condenser under rotor eccentricity

[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018:2633-2637.

作者简介:



程明

程明(1960),男,博士,教授,研究方向为电机系统及其控制、新能源发电技术(E-mail: mcheng@seu.edu.cn);

田伟杰(1997),男,硕士在读,研究方向为同步调相机的状态监测;

王伟(1985),男,博士,副研究员,研究方向为电机系统及其控制。

Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser

CHENG Ming¹, TIAN Weijie¹, WANG Wei¹, WEI Chao²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the development of high voltage direct current transmission system, the new large-capacity synchronous condenser has become the best choice to meet the dynamic reactive power demand of the system. Therefore, it has gradually become one of the research hot topics. Based on this, this paper systematically summarizes the research status of the new type of the condenser. Firstly, the operation principle of the condenser is introduced from three aspects: its mathematical model, operation state and control strategy. Secondly, by comparing it with power electronic reactive power compensation equipment, the superior dynamic reactive power output characteristics of the new condenser are expounded, and their influence factors are analyzed. Finally, the latest development of the state monitoring technology of the condenser is summarized from both the existing fault diagnosis technology and parameter identification technology of the condenser. In this paper, the mathematical model, control strategy and operation state monitoring of the new synchronous condenser are summarized, which can provide reference for the further research of the new synchronous condenser.

Keywords: synchronous condenser; operating principle; reactive power characteristic analysis; state monitoring; control strategy

(编辑 钱悦)