

电力系统的次同步振荡问题

文劲宇, 孙海顺, 程时杰

(华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着我国互联电网规模的快速发展, 尤其是(可控)串联补偿装置和高压直流输电的广泛应用, 电力系统的次同步振荡问题已经变得比较突出。本文介绍了电力系统次同步振荡问题的起因与危害, 回顾了国内外对次同步振荡问题的研究过程, 阐述了次同步振荡所研究的感应发电机效应、轴系扭转振荡、暂态扭矩放大以及由其它电气装置(如电力系统稳定器 PSS、静止无功补偿器 SVC 和 HVDC 等)引起的次同步振荡现象的主要内容, 指出了需要进一步关注和研究的问题。

关键词: 次同步振荡; 次同步谐振; 轴系扭振; 自励磁; 暂态扭矩放大

Subsynchronous oscillation in electric power systems

WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, CHENG Shi-jie

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In China the subsynchronous oscillation (SSO) in electric power systems has been a more serious problem than before because of the fast development of the scale of the power systems and the wide use of the (thyristor controlled) series capacitors and HVDC. In this paper, the cautions and harmfulness of SSO are introduced and the corresponding research progress is reviewed. Four types of SSO including inductive generator effect, torsional oscillation, transient torque amplification and SSO caused by other electrical equipments such as PSS, SVC and HVDC et al are discussed. The new characteristics of SSO in modern power systems are given in the conclusion of the paper.

Key words: subsynchronous oscillation; subsynchronous resonance; torsional oscillation; self excitation; transient torque amplification

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0001-04

1 次同步振荡问题的起因与危害

电力系统常见的失稳模式有振荡失稳和单调失稳等。次同步振荡属于系统的振荡失稳, 它是由电力系统中一种特殊的机电耦合作用引起的, 其最大的危害是, 严重的机电耦合作用可能直接导致大型汽轮发电机组转子轴系的严重破坏, 造成重大事故, 危及电力系统的安全运行。

早在 20 世纪 30 年代, 人们就发现发电机在容性负载或经串联补偿电容补偿的线路接入系统时, 在一定的条件下可能会发生“自励磁 (Self Excitation)”现象。此外, 投切空载长输电线路时, 由于线路分布电容的存在, 在某些运行情况下也可能引起“自励磁”的问题^[1]。在文献中, “自励磁”又经常被称为“自激”。一般来说, “自激”可分为两种: 同步“自激”和异步“自激”。由于不当的参

数配合或系统进入不当的运行方式, 使电力系统中的上述“自激”条件得到满足, 且这时发电机组仍运行在同步运行状态, 在这种情况下发生的“自激”是“同步自激”。当发生异步自励磁时, 同步发电机定子电流中的次同步频率(即定子回路电感和电容的谐振频率)分量, 是靠同步发电机对此分量发出的异步功率来维持的, 是一种单纯的电气谐振振荡。在此谐振频率下, 同步发电机相当于一台异步发电机, 它提供了振荡时所需要的能量。这种自激方式通常又称为“异步发电机效应”或“感应发电机效应 (Induction Generator Effect)”。尽管感应发电机效应在实际电力运行中早已被人们发现, 并观察到了所伴随的次同步频率自激振荡现象, 但由于早期发现的这种振荡造成的危害不大, 而且问题很快得到了解决, 所以这个问题并没有得到人们的特别广泛关注。

1970年和1971年,在美国莫哈夫(Mohave)电厂发生了由于线路串联补偿电容作用而造成的两台大型汽轮发电机组转子大轴损坏的严重事故^[2],当时,系统的故障录波图中出现了类似于电气谐振的现象,线路电流中含有较强的30.5 Hz的振荡分量,而这一振荡频率与汽轮发电机轴系的二阶固有扭振频率非常接近于互补,即两者之和接近于工频。也就是说,如果把发电机中因电气系统的扰动所产生的脉动转矩看成是轴系的外加力矩的话,机组轴系与外加转矩几乎处于共振状态,在这种状态下,不仅机组的轴系,电力系统的其它相关变量都会产生同频率的增幅振荡现象。这两次重大事故的发生使国际电力工程界开始意识到,输电线路的不恰当串联电容补偿不仅会引起电力系统“自励磁”运行状态的发生,同时,还可能会诱发一种新的更严重的机电耦合振荡。由于该振荡的频率明显高于人们当时已经熟悉的“低频振荡”的振荡频率,但又低于系统的同步频率,因此,学术界将这种机电耦合振荡称为“次同步谐振(Subsynchronous Resonance, SSR)”。同时,由于这种振荡的最大危险就是会导致汽轮发电机组转子轴系发生扭转振荡,影响转子的机械性能和寿命,严重时可能导致轴系的断裂,破坏电力系统的安全运行,所以人们又将这种振荡现象称为“轴系扭振”。

在随后几年的深入研究中,人们发现在电力系统进行各种线路开关操作时,特别是当这些操作会使汽轮发电机组输出的有功功率发生较大的突变以及操作频繁时,也可能会激发严重的轴系扭振。手动、自动和非同期并网也都可能激发轴系扭振,造成由于轴系扭振而产生的疲劳寿命损耗,其中以非同期并网最为严重。发电机出口母线经过多条输电线路与系统相连时,在输电线路发生三相短路、两相短路或单相短路时,不管采用的是单相还是三相自动重合闸,以及重合闸是否成功,都会引起故障点附近汽轮发电机组的轴系扭振,并导致不同程度的由于轴系扭振而产生的疲劳寿命损耗。在这些情况下,轴系可能由于过度的扭振疲劳寿命损耗而产生裂纹、损伤,轴系联结部位的连接螺栓可能会被巨大的剪应力剪断,在某些严重的故障或者操作条件下,可能造成轴系断裂。通常将这种轴系扭振现象称为“暂态转矩放大(Shaft Torque Amplification)”。

1977年,美国的斯奎尔巴特(Square Butte)发电厂在投入系统中新建成的高压直流输电(HVDC)线路时,发现该发电厂汽轮发电机的轴系发生了扭振现象,这时,即使将附近的串联补偿电容切除,

轴系扭振的现象依然存在^[3]。对这一现象的研究结果表明,这种轴系扭振是由于在高压直流输电系统及其控制器与汽轮发电机组之间发生的相互作用引起的。HVDC的换流器能够产生频带很宽的谐波电流,通过其定电流、定电压等控制回路,HVDC可能激发汽轮发电机组的轴系扭振^[4,5]。随后的研究还发现,不仅HVDC,其它很多有源快速控制装置在一定的条件下,也能激发次同步振荡和轴系扭振现象,如电力系统稳定器(PSS)、快速电压调速器、静止无功补偿器(SVC)、可控串联补偿装置(TCSC)等,它们响应快速,所产生的谐波频带非常宽,或者具有很宽的带通频率特性,足以使次同步谐振频率的信号通过,从而为汽轮发电机轴系扭振模态的次同步振荡提供闭环通路。因此,研究电力系统中这些常用的重要设备对轴系扭振的影响,也是次同步谐振和轴系扭振研究课题的重要内容之一。

2 次同步振荡问题的研究历史与现状

上述次同步谐振现象的发生非常突然,造成的后果又极其严重,因此,引起了国际电气工程学术界的关注和重视。自从上世纪70年代初美国莫哈夫电站的事故发生以后,在学术界和工业界,立即掀起了研究次同步振荡和大型汽轮发电机组轴系扭振的热潮。他们在电力系统次同步振荡的分析和抑制方法的研究上作出了巨大的努力,在这一主题下发表了大量的论文,还出版了专著介绍次同步振荡建模和分析方法。为了全面深入地研究这种新出现的机电耦合振荡现象,了解次同步振荡对发电机组的危害,解决带有串联补偿输电线路电力系统的这一隐患,国际电气电子工程师协会(IEEE)于1973年成立了由美国亚利桑那公用事业公司、洛杉矶水电局、内华达动力公司,盐湖城工程局,塔克桑煤气和电力公司以及内华达工程局等多个单位组成的庞大的次同步谐振工作组(Sub-synchronous Resonance Working Group, SSRWG,以下简称IEEE工作组),负责组织和开展这方面的研究工作。

IEEE工作组先后向电力工程界和学术界颁布和推荐了两个研究次同步振荡的标准模型以供这方面的研究用^[6,7],先后三次给出了次同步振荡的定义、术语和符号,解释次同步振荡发生的原因,给出了次同步振荡问题的分类^[8-10]。除此之外,该小组还定期归纳了国际上有关次同步振荡方面的研究成果,先后五次将这些成果清单发表在IEEE的有关期刊上,并分类列出了系列参考文献,以供研究人员参考^[11-15]。美国电力科学研究院(EPRI)也多次资助了与次同步振荡有关的研究工作,取得了广

泛的成果, 并连续专门撰文, 对这一主题的研究状况进行了总体介绍。所有的这些努力使次同步振荡的研究越来越深入, 它们从机理阐述, 分析方法、控制策略、现场测试、抑制对策和监测装置等不同侧面, 对这个问题进行了广泛而深入的研究^[16, 17]。目前, 不仅在与电力系统串联补偿的规划、设计领域中, 而且在电力系统运行与控制的其它领域, 充分了解和分析次同步振荡对电力系统安全稳定运行的影响已经成为一个必须考虑的问题。

大型汽轮发电机的轴系扭振是大电网大机组中存在的一个必须解决的问题, 它不仅发生在国外的电力工业界, 从上世纪八十年代开始, 在我国电力系统中也不断有由于轴系扭振导致事故发生的报道。1984年3月神头电厂3号机组在进行快关汽门的短暂快控和持续快控试验时, 发现机组异常振动并听到金属碰撞声, 停机检查, 发现高中压缸对轮12根直径为40mm的螺栓都受到不同程度的破坏, 其中断裂7根, 其余5根被打弯。1985年10月, 山西大同第二电厂的2号机组在发电机电气故障甩负荷的过程中, 由于超速而造成机组严重损坏, 轴系断为5截。1986年8月, 刚投入运行不到两年的陡河电厂6号机组, 在运行中发现汽轮发电机组的三瓦振动突然增大, 且振动随负荷波动, 运行人员当即判断为高压缸转子联轴节的螺栓断裂, 停机检查发现三根螺栓断裂, 其余螺栓的裂纹深达15mm。1988年12月, 陕西秦岭电厂5号机组的轴系在运行中发生强烈的振荡, 随即轴系断为15段, 5处出现裂痕。随着我国电力系统规模的扩大和结构进一步复杂化, 电力系统中的次同步振荡问题也受到了我国电力工业界和学术界的重视和关注, 从次同步振荡产生机理、研究方法、监测控制等多方面开展了大量研究, 取得了丰富的研究成果^[18]。

根据 IEEE 工作组的定义, 次同步谐振 (Subsynchronous Resonance, SSR) 是指电力系统的一种不正常运行状态, 在这种运行状态下, 电气系统和汽轮发电机组以低于系统同步频率的某个或多个振荡频率交换显著的能量, 从而危害汽轮发电机轴系安全的动态过程。次同步振荡 (Subsynchronous Oscillation, 简称为 SSO) 比次同步谐振概念的范围要大一些, 它在更广的范围内研究机电耦合系统的相互作用, 即汽轮发电机组和诸如 PSS、HVDC 以及 FACTS 装置等电气设备之间的相互作用。

3 次同步振荡问题的主要研究内容

根据 IEEE 工作组的研究报告, 次同步振荡的

研究主要包括以下四个方面的内容:

(1) 感应发电机效应 (Inductive Generator Effect)

感应发电机效应源于同步发电机的转子对低于系统同步频率的次同步频率电流所表现出的视在负阻特性。由于转子的旋转速度高于定子次同步电流分量产生的次同步旋转磁场的转速, 所以从定子端来看, 转子对次同步电流的等效电阻呈负值。当这一视在负值电阻大于定子和输电系统在该电气谐振频率下的等效电阻之和时, 就会产生电气自激振荡, 这就是感应发电机效应。感应发电机效应属于只考虑电气系统动态行为的自激现象, 与汽轮发电机轴系无关, 因此, 单纯的感应发电机效应不会导致轴系扭振现象的发生。

(2) 轴系扭转振荡 (Torsional Oscillation)

当发电机转子产生频率为轴系固有扭振频率的振荡时, 它将在定子中感应出次同步频率 (与轴系固有扭振频率互补) 的电压分量, 当该电压分量的频率与电气谐振频率接近时, 它将维持转子上产生的次同步转矩。而当次同步转矩与转子转速增量同相位, 且等于或大于转子固有机电阻尼转矩时, 它就会加剧轴系的扭振, 这就是电气系统和发电机轴系的扭转相互作用。在这种条件下, 即使因转子振荡而在电枢中感应出很低的电压, 此电压产生的电流会加强系统中因扰动产生的次同步电流, 合成的次同步电流也会产生足够的转矩来维持初始的转子扭转振荡, 使这种振荡呈增加的发展趋势, 形成持续的不稳定振荡过程, 即次同步谐振过程^[11]。扭转相互作用属于考虑机电耦合作用的自激现象, 它强调电力系统的电气谐振频率与汽轮发电机轴系的固有扭振频率互补。

(3) 暂态扭矩放大 (Transient Torque Amplification)

暂态扭矩放大是指汽轮发电机轴系在电力系统大扰动 (如各种短路、线路开关的频繁操作、发电机的非同期并网) 的作用下, 由于机电振荡的相互助增, 使得发电机轴系各组成部分之间, 在由扰动类型决定的一个或几个自然频率上的相互振荡。严重的暂态扭矩放大可能使轴系在第一个扭振周期内就造成严重的破坏。

(4) 由其它电气装置 (PSS、SVC、HVDC 等) 引起的次同步振荡

电力系统稳定器 PSS 在电力系统中已经获得广泛的应用, 在保证电力系统的稳定运行中占有重要的地位。但 PSS 在对系统低频振荡模态 (振荡频率为 0.1~2.0 Hz) 提供良好阻尼的同时, 可能将一个

或多个对应于轴系次同步扭振模态频率的振荡信号注入发电机的励磁绕组,从而激发轴系扭振模态的次同步振荡。高压直流输电系统 HVDC 的换流器能够产生很宽频带的电流,如果由于采用了不恰当的控制策略,使 HVDC 系统的控制回路对次同步电流呈正反馈,则有可能会激发汽轮发电机组的轴系扭振。此外, SVC 等各种 FACTS 装置的引入也可能造成次同步振荡现象的产生。研究电力系统中这些重要设备对轴系扭振的影响,也是次同步振荡研究中的重要内容之一。

水轮发电机组的转子包括水轮机转子和发电机转子。如果机组有同轴驱动的励磁机,则还应附加相应的转子质量,其结果是最多有两个扭转振荡模态。这类发电机组,发电机转子的转动惯量比水轮机转子的转动惯量高 10~40 倍,扭转振荡自然频率在 6~26 Hz 范围内。截至目前,国内外还没有报道过水轮机组和电网之间出现不利的动态相互作用的问题。文献[17]总结了在水轮机与电力系统没有发现不利相互作用的主要原因:

(1) 发电机转子的转动惯量相对于水轮机和励磁机的惯量来说大很多,这有效地保护了水轮机转子的机械系统,其结果是对发电机的扰动很难激发扭转振荡。

(2) 水轮机存在粘滞阻尼作用,它使水轮发电机组扭转振荡的固有阻尼明显高于汽轮发电机组,因而有效抑制了它们之间的不利相互作用。

4 结论

近年来,我国电力系统取得了飞速的发展,600 MW 及以上的机组成为电网的主力机组,电力系统稳定器得到广泛应用,建成和在建的高压直流输电线路和串联补偿或可控串联补偿线路达 20 多条,电力系统次同步振荡问题已经变得比较突出。电力系统的不断发展,电力系统的单机装机容量越来越大,电网的互联不断扩大了电力系统的规模,同时使系统的结构和运行方式日益复杂。特别是随着基于大功率电力电子技术的新型电力设备在电力系统的广泛应用,电力系统次同步振荡的研究必须面对新的问题。由于这些以大功率电力电子器件为基础的新型输电装置,如: HVDC 系统以及 FACTS 装置一般都具有电力电子器件不连续工作的特点,无论是这些装置本身的不连续工作特性还是由此引起的电力系统拓扑结构的频繁变化,都会给电力系统次同步振荡的分析带来新的内容。当然,这些设备所具有的灵活调节控制能力,也会给次同步振荡的有效抑制提供新的手段,所有这些问题,无论是

挑战还是机遇,都是值得深入研究的。

参考文献

- [1] Rustebakke H M, Concordia C. Self-excited Oscillations in a Transmission System Using Series Capacitors[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7): 1504-1512.
- [2] Walker D N, Bowler C E, Jackson R L, et al. Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.
- [3] Bahrman M, Larsen E V, Piwko R J, et al. Experience with HVDC-turbine-generator Torsional Interaction at Square Butte[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(3): 966-975.
- [4] Mortensen K, Larsen E V. Field Tests and Analysis of Torsional Interaction Between the Coal Creek Turbine-generators and the CU HVDC System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 336-344.
- [5] Yacamini R. How HVDC Schemes Can Excite Torsional oscillations in Turbo-alternator Shafts[J]. Proceedings of IEE-Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(6): 613-617.
- [6] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [7] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(5): 1057-1066.
- [8] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2): 506-511.
- [9] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.
- [10] IEEE Committee Report. Reader's Guide to Subsynchronous Resonance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 150-157.
- [11] IEEE Committee Report. A Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 216-218.
- [12] IEEE Committee Report. First Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 1872-1875.

(下转第 7 页 continued on page 7)

在运行经验和内部匝间短路分析计算的基础上确定合理的定值;防误动的辅助判据应有更深入的研究。

c. 单元件零序电流横差保护定值与定子绕组结构(分布或集中布置)、大轴振动和偏心程度有关,振动、偏心较大和集中式定子绕组的发电机单元件横差保护的定值可能超过 5%,分布式定子绕组发电机,经过现场测试,单元件横差保护定值可小于 5%。

(7) 继续提高主设备主保护设计和运行的技术水平。现在我国大部分大型水电机组的主保护配置方案均已采用量化优化的设计方法,但是特大型(600~1000 MW 级)火电机组主保护配置方案的设计仍依然故我,仅凭经验和概念办事,这种定性化设计方法的结果是设计和运行人员心中无数,不清楚选用的主保护方案的优缺点,究竟起到多好的保护作用?保护动作死区在哪里?如何进一步完善和提高?问题的症结是保护工作者不知道内部短路电流的大小和相位。我们说主设备保护技术水平长期落后于线路保护,首先是落后在对绕组内部短路电

流的认识,这对主设备保护技术人员来说是一个致命的弱点。由于发电机变压器绕组内部短路电流计算的复杂性,目前还不能要求所有发电机变压器主保护方案设计都作内部短路分析计算,以便采用量化优化设计方法,但 600~1000 MW 级的特大型机组还是应该高标准要求,因为我国已有自主知识产权的“多回路分析法”和“主保护量化优化设计方法”。进一步还将和电机制造厂合作,改变特大型汽轮发电机组的中性点侧引出方式,为推广单元件横差保护、裂相横差保护,完全和/或不完全纵差保护创造条件,以期获得特大型汽轮发电机主保护的全面完善。

收稿日期:2008-05-04

作者简介:

王维俭(1930-),男,教授,长期从事大机组保护教学和研究工作;E-mail:Wangwj-qhdx@263.net

桂林(1974-),男,博士,助研,研究方向为大机组保护及故障分析。

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [13] IEEE Committee Report. Second Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(2): 321-327.
- [14] IEEE Committee Report. Third Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 830-833.
- [15] Iravani M R, Agrawal B L, Baker D H, et al. Fourth Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1276-1282.
- [16] Anderson P M, Agrawal B L, Van Ness J E. Subsynchronous Resonance in Power Systems[M]. New York:

IEEE Press, 1989.

- [17] Padiyar K R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems[J]. Kluwer Academic Publisher, 1998.
- [18] 程时杰,曹一家,江全元.电力系统次同步振荡问题的理论与方法[M].北京:科学出版社,2008.

收稿日期:2008-05-21

作者简介:

文劲宇(1970-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制,电能存储与电力安全等;E-mail:jinyu.wen@hust.edu.cn

孙海顺(1971-),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统分析与仿真,FACTS,舰船电力系统等;

程时杰(1945-),男,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能、电力电子、电能存储等。E-mail:sjcheng@hust.edu.cn

热烈祝贺《继电器》杂志更名为《电力系统保护与控制》