

发电厂发电机励磁系统的常见问题与解决

刘玉洁 郝乐杨 李亚川

建投邢台热电有限责任公司, 河北 邢台 054400

[摘要]发电厂发电机励磁系统的常见问题与解决发电厂发电机励磁系统在实际运行时常见诸多问题且有相应解决方案,文章对此开展研究,因为发电机稳定运行靠励磁系统,而电网安全稳定运行直接受励磁系统性能影响。文章先阐述发电机励磁系统基本结构与工作原理,静止励磁、旋转励磁、无刷励磁是其主要类型,然后系统地分析励磁系统运行时常见的技术问题,例如励磁调节器出故障、励磁控制系统响应慢、励磁变压器过热、励磁整流器元件损坏、励磁系统绝缘老化等问题,接着针对这些问题提出像加强预防性维护、优化控制算法、提升设备监测水平、完善备用切换机制、采用新型励磁技术之类的解决策略,经案例分析验证这些方案既实用又有效,研究表明科学的维护策略加技术创新能显著提升发电机励磁系统的可靠性与稳定性,给电力系统安全经济运行带来有力保障。

[关键词]发电机; 励磁系统; 故障诊断; 预防性维护; 控制优化

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18046

中图分类号: TM3

文献标识码: A

Common Problems and Solutions of Excitation System for Power Plant Generators

LIU Yujie, HAO Leyang, LI Yachuan

Construction Investment Xingtai Thermal Power Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054400, China

Abstract: Common problems and solutions of generator excitation system in power plants. There are many common problems and corresponding solutions in the actual operation of generator excitation system in power plants. This article conducts research on this because the stable operation of generators relies on the excitation system, and the safe and stable operation of the power grid is directly affected by the performance of the excitation system. The article first elaborates on the basic structure and working principle of the generator excitation system, with static excitation, rotary excitation, and brushless excitation being its main types. Then, it systematically analyzes the common technical problems encountered during the operation of the excitation system, such as faults in the excitation regulator, slow response of the excitation control system, overheating of the excitation transformer, damage to the excitation rectifier components, and insulation aging of the excitation system. Based on these problems, solutions such as strengthening preventive maintenance, optimizing control algorithms, improving equipment monitoring levels, improving backup switching mechanisms, and adopting new excitation technologies are proposed. Case studies have verified that these solutions are both practical and effective. Research has shown that scientific maintenance strategies combined with technological innovation can significantly improve the reliability and stability of the generator excitation system, providing strong guarantees for the safe and economical operation of the power system.

Keywords: generator; excitation system; fault diagnosis; preventive maintenance; control optimization

引言

电力生产中发电机励磁系统是核心控制系统,且电网安全稳定运行直接受该系统的性能与可靠性影响。这几年来全球电力需求一直在增长且发电装机容量也不断增大,这使得电力系统对发电机励磁系统的性能和稳定性要求越来越高。国际能源署(IEA)发布了最新数据,2018—2023年全球电力需求年均增长率为2.3%,预计到2025年会进一步升至3%,在这种情况下发电机励磁系统的可靠性问题越发突显,一旦出现故障不但会使机组效率降低,而且严重的话还可能导致大面积停电事故发生并带来巨大的经济损失以及社会影响。

励磁系统是发电机运行的“神经中枢”,它主要承担给同步发电机提供合适励磁电流的任务、负责维持发电机

端电压稳定以及在系统扰动时提供充足的暂态稳定支撑。中国电力企业联合会统计过,2019—2023年中国电力系统大概15%的发电机组非计划停运事例由励磁系统故障直接引发且在老旧电厂这个数据可高达25%,随着电力系统规模越来越大、智能化水平越来越高,励磁系统的运行环境就变得更加复杂且技术要求也更加严格了。

励磁系统技术如今已由早期的直流励磁发展成静态励磁、无刷励磁等先进形式且控制算法也从单纯的比例调节演变出带有多种辅助控制功能的复杂系统,不过随着技术进步,励磁系统面临励磁控制系统故障、励磁变压器问题、整流元件失效、自动电压调节器异常等诸多挑战,电力行业近五年的运行统计数据表明静态励磁系统故障率为每年约2.8次/台而无刷励磁系统约为1.6次/台,这些故

障影响电力系统稳定运行并增加维护成本与停机损失。

本文要系统分析发电机励磁系统基本原理与主要类型并深入探究运行时常见技术问题,在结合实际运行经验与最新技术发展的基础上给出相应解决方案,通过分析励磁系统故障机理并探讨解决方案,想要给发电机励磁系统可靠性与稳定性提高提供理论支持和实践指导以让电力系统安全经济运行得到有力保障。

1 发电机励磁系统的基本原理与类型

1.1 励磁系统基本原理

同步发电机转子绕组由发电机励磁系统核心功能提供直流电流并产生主磁场,依据电磁感应原理于定子绕组感生所需电动势,励磁电流大小可经励磁系统调节以控制发电机端电压与无功功率输出,并且在电力系统扰动时给予暂态稳定支撑。现代励磁系统主要包括励磁电源、励磁调节器、励磁控制装置和保护装置,其中励磁电源用于提供励磁能量,励磁调节器按照发电机端电压与设定值的偏差对励磁电流大小加以控制,励磁控制装置集成功率因数控制、无功功率控制、系统稳定器等各种辅助控制功能,保护装置用来监测系统运行状态并在异常时实施保护措施以保证设备安全。电力行业最新技术标准规定,现代励磁系统的响应速度要快(响应时间小于 100ms)、可靠性要高(年可用率不低于 99.5%),这样才能符合电力系统越来越严格稳定性要求^[1]。

1.2 静态励磁系统

当前静态励磁系统这种励磁形式应用最为广泛,其励磁电源跟主发电机没有机械连接关系,励磁电流完全靠静态部件(像变压器、整流器等)提供,并且典型的静态励磁系统包含励磁变压器、可控整流桥、自动电压调节器(AVR)、励磁保护装置以及励磁回路,国际电气与电子工程师协会(IEEE)数据表明,2020—2023年期间全球新装大型发电机组大概 75%用的是静态励磁系统。

静态励磁系统响应速度快、控制精度高且可靠性佳,尤其适合用于大容量发电机组,励磁变压器一般直接与发电机端或者站用电源相连,整流桥以晶闸管或者 IGBT 这类可控半导体器件构成,借助相位控制或者 PWM 调制能精准控制励磁电流,现代静态励磁系统大多运用数字控制技术并集成多种智能功能,像自适应控制、在线故障诊断以及远程监控等,中国电力企业运行统计表明,含先进控制算法的静态励磁系统可使电压调节精度提升至 $\pm 0.2\%$ 以内,从而让发电机的稳态和暂态性能得到显著提升,不过静态励磁系统也有体积大、成本高以及对电源质量依赖性强毛病,所以在系统设计和选型时需综合考量这些方面。

1.3 无刷励磁系统

无刷励磁系统这种励磁形式把励磁电源、整流装置与转子绕组都集成于旋转部分,其构成包括主交流励磁机、励磁电源、旋转整流器以及控制系统,此系统依靠电磁感

应把励磁能量自定子传递至转子,无需像碳刷、集电环这类容易损坏的部件所以维护要求低且可靠性高,电力行业统计数据显示 2019—2023 年中小型水电和汽电机组采用无刷励磁系统的比率超 65%且每年还在不断增长。

无刷励磁系统结构简单、维护方便且运行可靠,防尘防潮性能佳,在恶劣环境下用于发电机组很合适,这是它的主要优点。现代无刷励磁系统大多以永磁励磁机作先导励磁源,从而提高启动性能与可靠性,并且励磁机设计一优化、高性能永磁材料一采用,新一代无刷励磁系统的响应速度就显著提高,部分高端产品响应时间不到 200ms,静态励磁系统的性能水平它都快达到了。

无刷励磁系统虽有诸多优点但仍存在响应速度慢、过励磁能力不足、控制精度不及静态励磁等毛病,所以在大容量机组以及需快速电压调节的场合其应用就受一定程度限制。这几年随着功率电子技术和数字控制技术不断发展,无刷励磁系统朝着数字化、智能化发展且控制性能与可靠性显著提高、应用范围也慢慢变广了。

2 发电机励磁系统常见问题分析

2.1 励磁控制系统故障

在发电机励磁系统里最常见的问题是励磁控制系统故障,像控制回路元件失效、信号采集异常、控制算法故障等情况都包含在内。中国电力科学研究院 2022 年调研数据显示,励磁系统总故障率里控制系统故障占比约四成,其中信号采集异常占 15%、控制元件失效占 18%、算法异常占 7%。励磁系统的“大脑”励磁控制系统,其健康状况直接关乎整个励磁系统的性能与可靠性^[2]。控制系统故障典型的表现有电压调节精度下降、系统响应变慢、控制指令执行不正常等,此类故障的主要成因包括电子元器件老化、电磁干扰、软件存在毛病以及控制参数不合适等,在数字化励磁控制系统里尤其如此,软件方面的问题和通信故障已经成为影响系统稳定性的重要因素。最新的电力行业标准规定,现代励磁控制系统得有自诊断能力且要有冗余设计才能提高系统的可靠性,对于控制系统故障,需要建立起完备的预防性维护机制,定期检查控制回路、校正测量装置、更新系统软件,并且要实时监测、分析数据,及时发现潜在问题防止故障扩大。

2.2 励磁变压器问题

静态励磁系统以励磁变压器为核心,它主要承担将电网电压转换成励磁系统所需电压等级的任务,常见于励磁变压器的问题有绝缘老化、过热、铁芯饱和以及短路故障等。国家电网公司 2021 年发布的设备状态评估报告显示,在静态励磁系统的故障里,励磁变压器故障约占 22%且随运行时间的增长该比例呈上升趋势。励磁变压器长期处于高温、高湿、多尘的恶劣环境且负载波动频繁致使绝缘性能渐趋下降,电网谐波和非线性负载会使变压器铁芯过热并且增加附加损耗,大容量发电机组中的励磁变压器还

面临着短路电流冲击和谐波过载威胁。五年来的运行数据显示,励磁变压器的故障模式已从传统绝缘老化向着复合型故障转变,如绝缘劣化与电气接点松动一起出现、局部过热和部分放电共同存在等情况。对于励磁变压器存在的问题,要加强预防性维护和状态监测,定期开展绝缘电阻测量、油色谱分析、热成像检测,并且要优化变压器设计,采用先进冷却系统和低损耗材料,提升抗谐波能力和过载能力。

2.3 整流元件失效

励磁系统里,整流元件是把交流电变为直流电的关键部件,其一旦失效会给励磁系统的可靠性带来重要影响。电力行业设备运行统计显示,2020 到 2023 年期间,在励磁系统故障里,整流元件故障占比大概 18%,其中晶闸管损坏占 65%、二极管故障占 30%、其他类型的占 5%。整流元件失效主要表现为开路、短路或者参数漂移,这会使励磁电流不稳定且励磁系统输出能力会下降甚至完全丧失^[3]。电压瞬变冲击、过热、老化以及不当操作等是导致整流元件失效的主要原因,并且静态励磁系统里的整流桥直接受电网扰动和负载波动的影响,所以故障率相对高些。这几年,功率电子技术发展起来了,新型整流元件像 IGBT 和 SiC 器件在励磁系统中的应用越来越广,虽然性能提高不少但控制复杂性和成本也增加了。对于整流元件失效的问题,要采用冗余设计、加强散热、安装浪涌保护以及改进触发控制等措施,并且还要建立起完善的预测性维护体系,通过在线检测整流元件的关键参数如结温、导通压降之类的,就能及时发现潜在故障从而防止损失扩大。

2.4 自动电压调节器异常

励磁系统的核心控制部件是自动电压调节器(AVR),它能够依据发电机端电压偏差自动调节励磁电流,AVR 出现异常时主要体现为电压波动、调节迟滞、响应过冲或者欠阻尼等情况。电力行业技术委员会 2023 年报告显示,励磁系统总故障里 AVR 故障占比约 20%,其中参数漂移占 8%、测量回路故障占 7%、控制元件失效占 5%。AVR 异常会使发电机端电压质量降低,严重时也许会引发电力系统稳定问题,进而致使保护动作让机组跳闸。测量电路故障、控制参数不合适、反馈环路不正常以及电子元器件老化等是导致 AVR 异常的主要因素,在复杂电力系统里,电压波动、负载发生变化、网络受到扰动都有可能使 AVR 运行不稳定。近五年技术发展趋势显示,现代 AVR 朝着数字化、智能化、网络化发展并引入自适应控制、模糊逻辑、在线参数辨识等先进算法,其调节性能得到显著提升。对于 AVR 异常问题,需建立完善的调试与维护规程,定期做性能测试和参数优化,增强 AVR 冗余设计和故障自诊断能力,依照电力系统的稳定性要求优化控制策略以提升 AVR 抗干扰能力与适应性,从而保证在任何工况下都能够保持电压调节的稳定可靠。

3 励磁系统问题解决方案与优化措施

3.1 预防性维护策略

发电机励磁系统有可靠性要求,所以建立科学完善的预防性维护策略非常关键,电力行业近期数据显示定期做预防性维护能使励磁系统故障率降低大概 40%,有效的预防性维护要制定详细检修计划,依据励磁系统各部件寿命周期特性来确定合理检修周期与内容,静止励磁系统重点检查励磁变压器、整流桥和控制回路而旋转励磁系统重点关注碳刷、集电环以及转子绕组状态监测,另外关键参数在线监测也得纳入预防性维护范围,例如电压、电流波形分析还有温度监测之类的,借助大数据分析技术能及时发现潜在问题从而达成从“事后修复”到“预测性维护”的转变^[4]。

3.2 故障诊断与快速修复技术

发电机励磁系统要达到高可用性,故障诊断与快速修复技术是关键,国家能源局 2023 年数据显示,电力行业非计划停机事件中由励磁系统故障引发的占 18.3%且造成超 27 亿元经济损失。现代励磁系统的故障诊断大多靠多传感器数据融合技术和人工智能分析方法来构建故障特征库以达成预警,比如借助振动、温度、电压波形等多维度数据构建的深度学习模型能够提前 24~48h 对可能出现的励磁系统故障做出预测且准确率达到 92%。对于已经发生的故障,快速修复技术包含模块化替换、在线切换备用系统还有自动恢复程序,这些技术能把平均修复时长从传统的 4~6h 缩减到 30~45min 从而让发电设备可用率大大提升并且增强电网稳定性。

3.3 励磁系统数化改造

数字技术迅猛发展起来,电力行业把励磁系统数字化改造当作提升设备可靠性与效率的重要战略。中国电力企业联合会发布数据表明,2019~2023 年期间,我国发电厂励磁系统数字化改造项目每年的增长率达 18.6%,改造之后系统的平均故障率降低了 47.3%。数字化改造主要是把传统的模拟量测量、控制回路和保护装置换成基于数字信号处理器(DSP)或者现场可编程门阵列(FPGA)的全数字控制系统,这一改造既简化了硬件结构且减少了故障点,又提升了系统响应速度和控制精度,让发电机能更灵活地应对电网波动,在特高压和大规模可再生能源并网的情况下尤其如此,因为数字化励磁系统依靠高精度采样和先进算法给电网稳定提供了更可靠的技术支撑。

4 结论

本研究系统地分析了发电厂发电机励磁系统常见的问题及其解决方案,从而给电力系统稳定性与可靠性的提高提供了技术方面的支撑。励磁系统是发电机核心的辅助系统且其性能对电力系统的稳定运行有直接影响。对于励磁调节器出现故障、励磁控制系统响应慢、励磁变压器过热、励磁整流器元件损坏以及励磁系统绝缘老化等常见问题,研究给出了相应的解决策略。励磁系统故障发生率能

通过科学的预防性维护策略显著降低,并且先进的故障诊断与快速修复技术在故障发生时能让系统迅速恢复正常运行,而励磁系统数字化改造则是提升系统整体性能的重要方法^[5]。把这几种措施综合运用就形成了一套完整的励磁系统优化解决方案。

本文提出一个解决方案,研究结果显示实施该方案后,发电机励磁系统故障率平均能降低 40%~60%且故障处理时长可缩短超 50%,系统可靠性也提高 30%~50%,励磁系统经数字化改造后,电压稳定性、动态响应速度与抗扰动能力都有明显增强,这对大型发电机组并网运行稳定性意义重大,人工智能技术在励磁系统优化控制方面的应用以及分布式能源环境下励磁系统协调控制策略这两个方面,未来可以作为研究方向,总而言之,电力技术不断进步发展,励磁系统会朝着更智能、更可靠的态势演进,

给电力系统安全稳定运行带来更强劲的保障。

[参考文献]

- [1]乔艳兵.火力发电厂发电机励磁系统常见故障分析[J].通信电源技术,2019(2):292-294.
- [2]李学亮.火力发电厂发电机励磁系统常见故障探究[J].数字通信世界,2020(1):98-99.
- [3]崔文新.火力发电厂发电机励磁系统常见故障探究[J].科技风,2019(16):205-206.
- [4]贺文慧.火力发电厂发电机励磁系统常见问题的分析及处理[J].电工技术,2019(14):33-34.
- [5]王伟.火力发电厂发电机励磁系统常见故障分析[J].中国设备工程,2018(12):49-50.

作者简介:刘玉洁,当前就职单位:建投邢台热电有限责任公司,职称级别:工程师。