

高比例新能源地区调相机优化配置方案研究及发展建议

王震* 李钦伟 曲炯辉 金莲花 贾祎飞

中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司, 吉林 长春 130000

[摘要] 随着风能、太阳能等高比例新能源大规模接入, 电力系统面临无功功率调节和电压稳定性问题, 同步调相机是重要无功补偿设备, 能够提高电网稳定性及电力质量。本研究围绕高比例新能源地区的调相机优化配置方案展开分析, 比较了分布式和集中式接入方案, 并综合二者提出具体优化配置方案。在此基础上, 研究提出推动调相机设备模块化设计、加强调相机运维管理、与新能源设施进行集成等发展建议, 以确保无功功率调节及电压稳定。

[关键词] 高比例能源; 调相机; 优化配置; 发展建议

DOI: 10.33142/hst.v8i1.15141

中图分类号: TM721.1

文献标识码: A

Research on the Optimization Configuration Scheme of Synchronous Condensers in High-proportion New Energy Areas and Development Suggestions

WANG Zhen*, LI Qinwei, QU Tonghui, JIN Lianhua, JIA Yifei

PowerChina Jilin Electric Power Engineering Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract: With the large-scale integration of high-proportion new energy sources such as wind and solar power, the power system faces challenges in reactive power regulation and voltage stability. Synchronous condensers are important reactive power compensation devices that can improve grid stability and power quality. This study analyzes the optimization configuration scheme of synchronous condensers in high-proportion new energy areas, compares distributed and centralized connection schemes, and proposes a specific optimized configuration combining both. Based on this, the study suggests promoting modular design of synchronous condenser devices, strengthening operation and maintenance management, and integrating with new energy facilities to ensure reactive power regulation and voltage stability.

Keywords: high-proportion energy; synchronous condensers; optimization configuration; development suggestions

引言

新能源发电存在间歇性、波动性特性, 要求电力系统能够更加灵活地进行无功功率的补偿与调节。同步调相机是高效无功补偿设备, 能够根据电网需求动态调节无功功率, 从而改善电网电压水平及功率因数。在大容量新能源接入的电网中, 调相机可以发挥重要作用, 帮助电网维持稳定。现有研究大多集中于调相机的单一功能或局部优化, 而对于高比例新能源地区调相机的系统化配置方案研究较少, 本文将探讨这一领域中的关键技术问题, 并提出相应优化配置策略, 为未来电力系统的稳定运行提供参考。

1 调相机概述

1.1 调相机概念

同步调相机是早期投入使用的一种无功补偿设备, 本质上是一种无功功率发电机, 具备显著技术优势。其响应速度快, 可有效抑制电压闪变和冲击现象, 补偿能力强, 可提供容性和感性无功功率, 运行稳定, 故障率低。此外, 同步调相机能够实现电压平滑调节, 单机容量较大, 最高可达数十万 Var, 能够显著增强电网的电压支撑能力和系统稳定性。尽管优势明显, 但同步调相机在实际应用中也存在一些不足之处。其运行维护过程较为复杂, 有功功率损耗较高, 运行时噪声较大, 小容量设备的单位容量投资

成本较高。因此, 同步调相机通常适用于大容量集中补偿场景, 设备容量一般在 10MVA 以上, 常布置于枢纽变电站、换流站以及受端变电站等关键节点。

1.2 调相机运行特点

电力系统中的主要负载为异步电动机和变压器, 其运行时需从电网中吸取大量无功功率以满足励磁需求, 导致电网承受较大感性无功电流^[2]。这种情况会使功率因数下降, 发电机及输配电设备效率降低, 同时增加线路损耗与电压损失, 进而恶化输电质量, 并可能对输电稳定性造成威胁。同步电机在过励状态下能够吸取超前于电压的电流, 从而提升电网功率因数。在早期电力系统中, 除采用同步电动机外, 还在受电端布置同步调相机, 以改善功率因数。根据电网负载实际情况调节同步调相机励磁电流, 可以改变其无功功率的吸收或输出, 使电网功率因数趋近于 1, 进而优化电网性能。

2 高比例新能源地区调相机优化配置方案

2.1 分布式调相机常规接入方案

中大型新能源场站的汇集母线电压多为 35kV, 分布式调相机组的出口电压通常为 10.5kV, 为实现电压等级匹配, 需要配置调相机变压器, 将调相机输出的 10kV 电压升至 35kV 后接入新能源场站的 35kV 母线, 进而并入电

网。此外,分布式调相机组需配备高压启动电源,为 SFC 变频启动系统供电,确保调相机能够正常启动并投入运行。

2.1.1 调相机系统主接线方案

分布式调相机的主接线形式主要分为两种。第一种是“调相机—变压器组”接线模式。在这种模式下,调相机出口直接连接调相机升压变压器的低压侧。调相机的启动电源从站内中高压电源引出,而机用低压电源可以利用现有的站用电系统,或从独立的中高压电源获取。第二种是调相机母线接线模式。在调相机出口设置断路器和 10kV 单母线,启动电源以及机组的低压电源均从该 10kV 母线获取。整个调相机系统通过一回线路接入调相机升压变压器的低压侧,形成完整的电力接入方案。

(1)“调相机—变压器组”接线方案

“调相机—变压器组”接线方案适合场站内 35kV 系统具备充足开关资源的情况。调相机的 10kV 出线经导体直接接入升压变压器的低压侧,升压后并入新能源场站的 35kV 母线。励磁变、出口 PT 以及避雷器均与调相机出线端直接连接。启动电源和必要时的站用电系统从场站的 35kV 母线获取,SFC 隔离变压器和站用变压器均采用 35kV 设备。在“调相机—变压器组”接线方案中,调相机启动阶段由场站的 35kV 系统为变频启动装置供电。变频启动装置将调相机拖动至超过同步转速后,启动回路中的 35kV 开关断开。在满足同期条件后,主回路的 35kV 开关合闸,调相机并入电网。

(2)“调相机母线”接线方案

“调相机母线接线”方案利用现有 35kV 系统的一组开关即可完成部署。具体设计包括在调相机出口配置 10kV 母线系统,母线上设置调相机进线回路、出线回路、励磁电源回路以及母线设备回路。此方案引入母线段后,调相机的启动电源和站用电系统均可由 10kV 母线供电,系统中的 SFC 隔离变、励磁变及站用变均采用 10kV 等级的变压器。启动阶段,主回路 35kV 开关及调相机 10kV 出线开关合闸,同时断开调相机 10kV 出口开关。启动电源通过场站 35kV 母线经调相机升压变回送供电。启动装置将调相机拖动至超过同步转速后,断开启动回路中的 10kV 开关。在满足同期条件后,调相机 10kV 出口开关合闸,调相机并入电网运行。

2.2 集中式调相机接入方案

在高比例新能源地区,集中式调相机接入方案主要适用于电网规模较大、功率需求高的场景。与分布式调相机不同,集中式调相机系统以大容量、高稳定性为特点,能够集中提供无功功率支持,有效增强电网电压支撑能力和系统稳定性^[3]。集中式调相机接入通常依赖站内高压母线系统,其接入方案可分为“调相机—升压变压器直连”模式和“高压母线直连”模式。

(1)“调相机—升压变压器直连”接入方案

此方案适用于需将调相机接入更高电压等级的系统

场景,调相机输出的 10.5kV 电压通过升压变压器升至 110kV 或 220kV 后接入高压母线,以实现与主电网的无缝连接。具体设计中,调相机出口直接连接升压变压器低压侧,升压变高压侧通过高压断路器接入高压母线,调相机的励磁变、出口 PT 和避雷器均配置在调相机出线端,确保系统安全和稳定。启动阶段,调相机启动电源通过站内高压母线经升压变压器回送供电,变频启动装置将调相机拖动至同步转速以上后,断开启动回路开关。在同期条件满足后,主回路高压开关合闸,调相机并入高压电网。此方案设计简洁,主回路设备配置集中,减少了复杂电气接线,运行效率较高。该方案的主要优势在于设备集中布置,便于管理和维护,同时升压变压器可与电网无缝衔接,提升电网整体调节能力。然而,由于升压变压器需满足高压要求,设备成本较高,且需要更大的站内布置空间。

(2)“高压母线直连”接入方案

“高压母线直连”接入方案适用于调相机输出电压直接满足接入高压母线要求场景,调相机出口电压设计与与高压母线相同的电压等级(110kV 或 220kV),无需额外配置升压变压器。调相机出口通过高压断路器直接接入高压母线,调相机的启动电源由站内高压母线供电,同时励磁变和站用变电源也直接从高压母线引出。在启动过程中,调相机的高压开关合闸,启动电源通过高压母线为调相机启动系统供电,启动装置将调相机拖动至同步转速以上后,断开启动电源回路。在同期条件满足后,调相机主回路开关合闸,完成并网运行。

2.3 高比例新能源地区调相机优化配置方案总结

在高比例新能源地区,分布式和集中式调相机接入方案各具特点。分布式调相机接入方案适用于分布式新能源场站,利用“调相机—变压器组”或“调相机母线”两种接线形式,提供灵活、独立的无功功率支持。然而,该方案在“调相机—变压器组”模式下,需要依赖站内的多个 35kV 开关,与现有系统的接口较多,影响了电网的整体协调性。而“调相机母线”接线模式虽然优化了系统独立性,但由于新增了 10kV 母线及相关设备,初始投资较高,占地面积要求也相对更大。相比之下,集中式调相机接入方案更适用于大型新能源场站或电网枢纽节点。“调相机—升压变压器直连”模式能够有效提升电网整体无功功率调节能力,便于统一管理和运维,但对站内空间要求高,设备成本较高。“高压母线直连”模式则能够简化设备配置,降低投资成本,但需要调相机具备直接接入高压母线的的能力,对设备设计要求更高。

针对以上方案对比,结合高比例新能源地区的运行特点,本研究建议采用“分布式调相机与集中式调相机结合”的混合配置方案,以充分发挥两种方案的优势,弥补单一方案的不足。具体配置方案如下:在分布式新能源场站,优先采用“调相机母线接线”模式,配置 10kV 母线系统,通过断路器与调相机升压变压器连接,实现设备的模块化

部署。各分布式调相机以单台 35kV 开关接入新能源场站的 35kV 母线,确保系统独立性。启动电源和站用电源均从调相机出口的 10kV 母线获取,优化布线结构,减少对场站原有系统的影响。在电网枢纽节点或大型新能源场站,优先采用“调相机—升压变压器直连”模式,利用升压变压器将调相机输出电压升至 220kV 或更高电压等级,接入主电网高压母线。集中配置大容量调相机,减少设备数量,优化布置空间,提升无功功率集中调节能力。启动电源从高压母线引出,通过独立的启动回路为调相机提供变频启动支持,确保设备的快速并网。

3 高比例新能源地区调相机优化发展建议

3.1 加强调相机运维管理

在高比例新能源地区,调相机的运维管理需从设备监测体系和专业化团队建设两方面优化管理。一是建立全面设备监测与诊断体系,配置在线监测装置,实时采集励磁系统电流、主轴振动、冷却系统温度等关键运行参数,采用智能化分析技术,对运行数据进行动态评估和故障预测,精准判断设备状态。重点加强励磁系统、冷却装置及机械部件的检测,提升运维精准度、时效性,还应定期组织专项检查,对高频故障区域进行针对性维护,确保设备长期稳定运行。二是提升专业化运维团队能力,组建专门的调相机运维队伍,明确职责分工,增强技术培训频次,熟悉新型调相机设备特性和运行模式。制定标准化操作流程和紧急预案,提高异常状况下的快速响应能力。在此基础上应引入智能化管理平台,整合运维数据,实现设备状态的集中监控和运维调度自动化,提升运维效率,减少人为失误。

3.2 推动调相机与新能源设施集成

调相机与新能源设施的深度集成可从物理连接优化和控制策略融合两方面展开,规划新能源场站时,需要将调相机纳入整体设计方案,明确设备间的电气连接模式。推荐采用集中式接线方案,将调相机升压变压器与场站主母线连接,减少功率传输路径,降低传输损耗,合理配置调相机的安装位置,确保设备运行环境满足散热、维护和检修需求。同时应开发协同控制策略。利用新能源场站监控数据,构建调相机动态运行模型,开发基于大数据的智能化无功调节算法。针对风电和光伏发电的不稳定性,调相机应快速响应功率波动,实时调整励磁电流,稳定场站电压水平。推动调相机与新能源发电设备的控制系统融合,

形成统一运行平台,提高电网运行协调性。

3.3 优化调相机设备模块化设计

优化调相机模块化设计可从结构标准化和运行灵活性提升两方面展开,首先可将调相机的励磁系统、主轴冷却装置、控制模块等主要功能单元划分为独立标准模块,每个模块应具备独立接口,实现快速拆装和替换。同时应制定模块化设计技术标准,确保设备在不同场站的通用性,降低设备定制化设计的复杂性和成本。采用工厂预制的方式,完成模块的调试和装配,减少现场施工工作量。其次,需要针对新能源场站需求多样化特点,开发可扩展模块设计,根据场站负荷需求和电压等级灵活配置调相机容量。支持模块间的即插即用和动态扩展,便于未来场站设备升级。模块设计需配备独立的状态监测系统,实现模块内运行状态的实时反馈,为远程调控和智能化管理提供基础。

4 结语

分布式调相机具有对大规模新能源汇集的支撑作用,可以增强系统动态无功支撑能力,增大系统短路比,高惯量的调相机可以对系统提供惯量支撑,降低故障时系统的频率变化率。SVG 控制响应快,对系统电压恢复支撑能力强,但是 SVG 电流过载能力相对弱一些,另外不提供短路电流和惯量。多种动态无功补偿协调互补,有利于提高综合技术经济性。在现阶段,调相机与 SVG 不可互相替代,考虑到两者不同的功能,分布式调相机安装在 35kV 母线首端能够更有效地抑制风场侧暂态过电压,将同步调相机布置在系统中容量较大以及电气距离较长的风场,对系统稳定性提升更为明显。

[参考文献]

- [1]省天骄,李积泰,权慧娟,等.适应高比例新能源直流外送输电能力提升的分布式调相机配置方法研究[J].青海电力,2023,42(2):1-7.
 - [2]赵志勇,王立华,刘威,等.面向新能源场站的分布式调相机励磁配置与控制优化[J].大电机技术,2024(3):123-130.
 - [3]李书山,高玉玲,麻梦岭.多目标优化的分布式调相机协调控制方法[J].自动化应用,2023,64(14):41-44.
- 作者简介:王震(1994.1—),毕业院校:华北电力大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司,职务:能源规划研究中心副主任,职称级别:工程师。