

大型泵站高压电机绝缘自恢复系统的研究与推广

罗恒亮¹, 刘钊², 王连强¹, 王超²

1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司维修检测中心, 江苏 扬州 225002

2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司扬州分公司, 江苏 扬州 225002

DOI: 10.61369/SSSD.2026080041

摘 要 : 大型泵站高压电机是水利工程的核心动力设备, 其绝缘性能直接关系到泵站运行的稳定性。当前, 受潮湿环境、绝缘老化及瞬时过电压等因素影响, 部分泵站高压电机绝缘性能频繁下降, 无法满足开机条件, 导致机组停机检修, 严重影响排涝、抗旱、供水等效益。本文结合实际运行情况, 分析高压电机绝缘故障成因, 研究绝缘自恢复系统的工作原理与结构组成, 对比不同方案的优劣, 提出最优配置, 并探讨其推广应用价值与实施路径, 旨在为同类泵站绝缘维护提供技术参考, 推动泵站智能化、高效化运行。

关 键 词 : 大型泵站; 高压电机; 绝缘自恢复系统; 绝缘检测; 推广应用

Research and Promotion of Self-Recovery System for High Voltage Motor Insulation in Large Pump Stations

Luo Hengliang¹, Liu Zhao², Wang Lianqiang¹, Wang Chao²

1. Maintenance and Inspection Center of Jiangsu Water Source Company Limited of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project Maintenance and Testing Center of Jiangsu Water Source Company Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225002

2. Yangzhou Branch of Jiangsu Water Resources Co., Ltd., East Route of the South-to-North Water Diversion Project, Yangzhou, Jiangsu 225002

Abstract : High-voltage motors in large pump stations are the core power equipment of hydraulic engineering, and their insulation performance directly affects the stability of pump station operation. Currently, due to factors such as humid environments, insulation aging, and transient overvoltages, the insulation performance of some pump station high-voltage motors frequently deteriorates, making it impossible to meet the startup conditions, resulting in unit shutdown for maintenance, which seriously affects the benefits of flood drainage, drought relief, and water supply. This article combines actual operating conditions to analyze the causes of insulation failure in high-voltage motors, study the working principle and structural composition of insulation self-recovery systems, compare the advantages and disadvantages of different schemes, propose the optimal configuration, and explore its promotion and application value and implementation path. The aim is to provide technical reference for insulation maintenance in similar pump stations and promote the intelligent and efficient operation of pump stations.

Keywords : large pump station; high-voltage motor; insulation self-recovery system; insulation detection; promotion and application

一、故障案例

(一) 南水北调某大型泵站故障案例

南水北调某大型泵站安装有6台套立式轴流泵, 配套3500kW高压同步电机, 承担区域供水及应急排涝任务。2024年7月汛期, 该泵站1# 高压电机启动前, 绝缘检测装置显示电机绝缘电阻值低于规定标准(10kV 高压电机绝缘电阻应不低于1MΩ/kV), 无法启动运行, 导致泵站供水能力下降30%, 严重影响区域供水保障。

针对此次故障, 现场开展全面排查工作: 经检查, 电机高压柜断路器未发生跳闸, 电气回路无短路、接地故障, 绝缘检测装

置(型号: JSY-8000)各项参数整定正常, 其绝缘检测整定值如表1所示。对电机绕组进行拆解检查, 发现绕组表面因泵站潮湿环境出现轻微凝露, 绝缘层存在局部老化现象, 判断为绝缘受潮、老化导致绝缘电阻下降, 无法达到开机条件。此次故障采用传统烘干处理方式, 耗时24小时完成绝缘恢复, 期间泵站处于低负荷运行状态, 造成较大经济损失。

高压电机绝缘电阻的合格判定需遵循行业规范, 其核心判定公式如下, 用于明确不同额定电压下绝缘电阻的最低阈值:

$$R_{min} \geq \frac{U_N}{1000} (M\Omega)$$

式中: R_{min} 为绝缘电阻最低阈值(MΩ); U_N 为高压电机额

项目信息: 本文系南水北调东线江苏水源有限责任公司单位内部设立课题, 《大型泵站高压电机绝缘自恢复系统的研究与推广》的研究成果。

定电压（V）。对于本文案例中10kV 高压电机，代入公式计算可得 $R_{min} \geq 10M\Omega$ ，与现场检测的不合格绝缘电阻值形成对比，明确故障判定依据。

表1 某泵站高压电机绝缘检测参数

检测类型	装置型号	定值名称	整定值	动作
高压电机 绝缘检测	JSY-8000	绝缘电阻 下限	10M Ω	报警、禁止 启动

（二）某工业园区泵站故障案例

某工业园区配套大型泵站安装4台套卧式离心泵，配套2000kW 高压异步电机，主要承担园区生产废水处理及雨水排涝任务。2024年3月，该泵站2[#]、3[#] 高压电机先后出现绝缘降低故障，经检测为电机绕组绝缘老化、局部破损导致，采用传统检修方式更换绝缘层，单台电机检修耗时36小时，期间园区出现废水淤积、雨水排放不畅等问题，影响园区正常生产秩序。

为解决绝缘故障频发、恢复效率低的问题，该泵站引入简易绝缘自恢复装置，改造后截至目前，未再出现因绝缘降低导致的机组停机故障，绝缘恢复时间缩短至2小时以内，大幅提升了泵站运行可靠性。绝缘恢复效率提升比例可通过以下公式计算：

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \times 100\%$$

式中： η 为绝缘恢复效率提升比例； t_1 为传统检修方式耗时（h）； t_2 为绝缘自恢复装置耗时（h）。代入本案例数据（ $t_1 = 36h$ ， $t_2 = 2h$ ），计算得 $\eta \approx 94.4\%$ ，直观体现自恢复系统的应用优势。

二、高压电机绝缘自恢复系统基本工作原理

依据 GB/T14711-2013《中小型旋转电机通用技术条件》及水利工程高压电机运行规范，高压电机绝缘自恢复系统需实现绝缘状态实时监测、故障诊断、自动恢复等功能，其核心工作原理基于绝缘受潮、老化的可逆性特性，通过科学的加热、驱潮、绝缘修复等方式，使电机绝缘性能恢复至规定标准，具体内容如下。

（一）核心工作机制

系统通过“检测—诊断—恢复”闭环控制实现绝缘修复。绝缘检测仪实时采集绕组绝缘电阻、泄漏电流等参数，由控制系统判断故障类型（受潮、老化、局部破损等）及严重程度，并自动启动相应恢复模块：受潮时通过加热模块驱潮；轻微老化或局部破损时通过绝缘修复模块补充介质。恢复过程中持续监测绝缘参数，待参数达标后自动停止作业并发出可启动信号，全过程实现自动化。

（二）系统组成及功能

高压电机绝缘自恢复系统主要由四大模块组成，各模块协同工作，确保绝缘恢复的高效性与可靠性，系统各模块均集成于专用控制柜内，柜内元件布置需遵循电气安全规范。

结合柜内元件布置，系统四大模块的具体组成及功能如下：

1. 绝缘检测模块：核心设备为绝缘检测仪，与电机高压柜、绕组相连，实时采集绝缘电阻、泄漏电流、绕组温度等参数，精

度不低于 $\pm 2\%$ ，可实现24小时连续监测，当参数低于设定阈值时，立即发出报警信号，并将故障信息传输至控制系统。泄漏电流与绝缘电阻的关系遵循欧姆定律衍生公式，用于辅助诊断绝缘状态：

$$I_L = \frac{U_N}{R(t)}$$

式中： I_L 为泄漏电流（mA）； U_N 为额定电压（V）； $R(t)$ 为 t 时刻绝缘电阻（M Ω ）。当达到 I_{Lmax} （ I_{Lmax} 为泄漏电流上限）时，判定为绝缘异常，触发报警。

2. 控制系统：采用 PLC 可编程控制器，作为系统核心指挥单元，安装于柜内低压电气区域，接收绝缘检测模块的故障信息，诊断故障类型及严重程度，自动触发对应恢复模块启动，同时记录故障数据、恢复过程参数，支持数据上传至泵站集控中心，实现远程监控与管理，契合大型泵站无人值守发展需求。

3. 绝缘恢复模块：包含加热驱潮单元与绝缘修复单元，加热驱潮单元与直流电源模块联动（直流电源布置于柜内中部），通过在电机供电三相线旁接加热三相线，由矩阵控制模块控制每次加热线路中的两相，经加热开关接直流电源，实现精准加热驱潮，避免绕组过热损坏；绝缘修复单元采用高压自密封复合绝缘技术，通过专用绝缘介质补充，修复绕组局部老化、破损部位，提升绝缘性能。加热驱潮的功率计算如下：

$$P = k \cdot P_N$$

式中： P 为加热驱潮单元功率（kW）； k 为功率系数（本文取10%–15%）； P_N 为高压电机额定功率（kW）。

4. 安全保护模块：设置隔离开关、耦合器、互锁开关等设备，集成于柜内互感器区域附近，隔离开关位于矩阵控制模块和电机之间，经耦合器控制，耦合器由绝缘检测仪控制，确保恢复作业时电机与高压回路可靠隔离；绝缘开关与加热开关互锁，防止误操作引发安全事故，保障设备及检修人员安全。

三、大型泵站高压电机绝缘自恢复系统配置方案与利弊分析

（一）方案一：传统检修模式（无绝缘自恢复系统）

优点：初期投入低，无需专用自恢复设备，仅用常规检修工具（如烘干设备、绝缘测试仪）即可完成绝缘修复。适用于小型泵站或绝缘故障频率低的场景，对检修人员技能要求适中。

缺点：绝缘恢复效率低、检修工作量大，且无法实时监测预警。适应性差，在潮湿、多尘等恶劣环境下的大型泵站中，传统检修难以根治绝缘受潮与老化问题，故障复发率高。

（二）方案二：简易绝缘自恢复系统配置

优点：投入成本适中，操作简便且无需复杂专业技能。系统支持半自动控制，具备基本绝缘监测功能，可及时发现绝缘下降并提前预警，降低故障复发率。适用于中型泵站或预算有限的大型泵站改造。

缺点：功能单一，仅能处理受潮类绝缘故障，监测精度低。检测模块只能采集基础参数，缺乏远程监控与数据存储功能，无

法接入集控中心统一管理，难以满足大型泵站智能化运行的发展要求。（三）方案三：智能型绝缘自恢复系统配置

1. 配置智能型绝缘自恢复系统的可行性

该系统能够适配大型泵站高压电机的运行工况，并有效恢复各类绝缘故障。以南水北调某大型泵站3500kW 高压电机为例，其运行环境潮湿，主要存在受潮与轻微老化问题。智能型绝缘自恢复系统通过加热驱潮与绝缘修复单元协同工作，可在2小时内恢复受潮类故障，并通过对轻微老化部位补充绝缘介质，使绝缘电阻恢复至规定标准。

该系统还支持与泵站集控中心联动，实现远程监控、故障诊断与数据统计，契合大型泵站无人值守、智能化管理的发展需求，克服传统检修与简易系统的不足，具有良好的应用可行性。此外，系统采用的高压自密封复合绝缘技术，能够适应40MPa、10kV 等复杂条件，提升绝缘稳定性，有效解决高压电机绝缘易损坏的问题。

2. 配置智能型绝缘自恢复系统的优点

（1）提升运行可靠性：实现绝缘故障的实时监测、提前预警与自动恢复，全程无需人工干预，大幅减少故障停机时间，保障泵站连续稳定运行，尤其适用于汛期、供水高峰期等关键时段。

（2）恢复效率高、效果好：可自动修复受潮、轻微老化、局部破损等常见绝缘故障，恢复时间缩短至1-3小时，无需拆解电机，避免二次损伤，延长电机寿命，降低维护成本。

（3）智能化程度高：支持远程监控、数据存储与故障诊断分析，可将绝缘参数、故障信息及恢复过程数据上传至集控中心，实现多台电机统一管理，契合大型泵站智能化、自动化发展趋势。

（4）安全性能高：配备完善的安全保护模块（如隔离开关、互锁开关等），确保恢复作业安全，防止误操作引发的电气事故，保障设备与人员安全。

综上，智能型绝缘自恢复系统融合了方案一与方案二的优势，同时规避两者缺陷，充分适配大型泵站高压电机运行需求，为最优配置方案。

3. 智能型绝缘自恢复系统参数整定与调试

以南水北调某大型泵站3500kW、10kV 高压同步电机为例，结合电机运行参数、现场环境及国标要求，对智能型绝缘自恢复系统参数进行整定与调试，具体如下：

（1）绝缘检测参数整定

依据 GB/T14711-2013《中小型旋转电机通用技术条件》要求，结合电机额定电压、运行工况，将绝缘电阻整定值设定为不低于10MΩ，泄漏电流整定值设定为不大于5mA，绕组温度监测阈值设定为85℃，当参数超出阈值时，系统立即发出报警信号，并启动故障诊断流程。结合柜内绝缘检测模块的安装位置，参数整定需与互感器协同校准，确保检测精度，校准公式如下：

$$\delta = \left| \frac{R_{cal} - R_{set}}{R_{set}} \right| \times 100\% \leq 2\%$$

式中：δ 为检测精度误差；R_{cal} 为校准后绝缘电阻值（MΩ）；R_{set} 为设定绝缘电阻值（MΩ），确保误差不超过

±2%。

（2）恢复模块参数整定

1）加热驱潮单元：矩阵控制模块设定为交替加热两相线路，加热功率设定为电机额定功率的10%-15%，结合公式 $P = k \cdot P_N$ ，代入 $P_N = 3500kW$ ，计算得加热功率范围为350-525kW，与表2中整定值一致；加热时间根据绝缘湿度自动调节，湿度高于80%时，加热时间设定为2小时；湿度在60%-80%之间时，加热时间设定为1小时，避免加热过度损坏绕组。湿度与加热时间的对应关系可通过以下拟合公式优化：

$$t = 3.5 - 0.035\varphi$$

式中：t 为加热时间（h）；φ 为绕组湿度（%），确保加热时间与湿度精准匹配。

2）绝缘修复单元：绝缘介质补充压力设定为0.3-0.5MPa，修复时间设定为30-60分钟，根据绝缘老化程度自动调整，确保绝缘修复效果，同时采用高压自密封复合绝缘技术，提升绝缘稳定性。

（3）系统调试

系统安装完成后，进行空载调试与负载调试：空载调试时，模拟各类绝缘故障，检测系统故障诊断准确性、恢复模块动作可靠性，确保绝缘恢复后参数达到规定标准；负载调试时，结合电机实际运行工况，检测系统在负载状态下的稳定性，优化参数设置，确保系统与电机协同运行，不影响电机正常工作。调试过程中，需重点检查柜内各元件接线正确性，确保低压电气、直流电源、互感器等模块联动正常，规避线路接触不良导致的系统故障。

表2 某泵站智能型绝缘自恢复系统整定参数

系统模块	装置型号	定值名称	整定值	动作
绝缘检测模块	JSY-8000A	绝缘电阻下限	10MΩ	报警、启动恢复
加热驱潮单元	JRQ-1000	加热功率	350-525kW	自动加热驱潮

四、大型泵站高压电机绝缘自恢复系统推广应用

（一）推广应用价值

1. 经济价值：智能型绝缘自恢复系统可大幅减少高压电机绝缘故障停机时间，降低检修人力、物力投入，延长电机使用寿命，减少设备更换成本，对于大型泵站而言，每年可节省检修成本30%-50%，同时避免因停机导致的供水、排涝损失，经济效益显著。年度节省检修成本可通过以下公式计算：

$$C_{save} = C_{old} - C_{new}$$

式中：C_{save} 为年度节省检修成本（万元）；C_{old} 为传统检修模式年度检修成本（万元）；C_{new} 为智能型系统年度维护成本（万元）。

2、技术价值：填补了大型泵站高压电机绝缘自动修复的技术空白，解决了传统检修模式效率低、可靠性差的弊端，推动泵站高压电机绝缘维护向智能化、自动化方向发展，为同类水利工程设备维护提供技术参考，同时融合高压自密封复合绝缘等先进技术，提升行业绝缘维护技术水平。

3. 社会价值：确保大型泵站连续稳定运行，提升区域供水、

排涝保障能力，避免因泵站停机导致的洪涝灾害、供水短缺等问题，保障人民群众生产生活安全，助力水利工程高质量发展，同时契合无人值守泵站的发展趋势，推动水利行业智能化升级。

（二）推广实施路径

1. 试点应用：在南水北调、沿江排涝等重点大型泵站安装智能型绝缘自恢复系统，开展试点运行，收集数据并优化参数，形成可复制、可推广的经验。重点针对潮湿、多尘等恶劣工况提升系统适配性。试点中需严格按规范布置柜内元件，确保布局合理、联动顺畅。

2. 标准完善：结合试点经验，联合行业主管部门与科研机构，制定系统安装、调试、运行、维护的行业标准，规范配置与应用，并与现有绝缘检测标准衔接，形成完整技术体系。同时明确柜内元件布置的统一标准，规范低压电气、直流电源、互感器等的安装间距与接线要求。

3. 技术培训：针对泵站运维人员开展系统操作、调试、维护等专业培训，重点强化柜内元件识别、参数整定、故障排查等技能，提升运维能力与系统认知水平，确保系统正常运行。

4. 政策扶持：争取水利工程设备改造专项补贴，降低泵站改造成本，鼓励大型泵站实施系统改造。同时推广智能化运维模式，推动泵站集群统一监控与集中管理，提升整体运维效率。

五、结语

通过研究分析与方案对比可知，智能型绝缘自恢复系统能够有效克服传统检修与简易系统的不足，实现高压电机绝缘故障的实时监测、提前预警与自动恢复，显著提升泵站运行可靠性，降低维护成本，契合大型泵站智能化、自动化发展需求。该系统融合加热驱潮、高压自密封复合绝缘等先进技术，适应复杂运行工况，结合规范的柜内元件布置，具备良好的应用前景与推广价值。

同类大型泵站可参照本文提出的配置方案，结合自身电机型号、运行环境及实际需求开展系统改造，精准整定参数、规范元件布置，实现绝缘维护的智能化升级。未来可进一步融合5G、物联网等技术，提升远程监控与故障诊断能力，推动绝缘自恢复技术在水利工程领域的广泛应用，助力水利高质量发展。

参考文献

- [1] 戴健, 刘圣亚, 张瑾, 等. 高压电机绝缘电阻在线监测仪在水利泵站的应用 [J]. 江苏水利, 2024(12): 61-63.
- [2] 袁建华. 高压电机故障的产生原因及处理对策分析 [J]. 光源与照明, 2022(4): 3.
- [3] 朱孟华. 高压电机纯环氧绝缘系统的性能研究 [J]. 电机与控制应用, 2024, 000(8): 8.
- [4] 焦日升, 徐庆. 大型变电站取消站用变压器低压侧主断路器欠压脱扣器分析 [J]. 吉林电力, 2012, 40(02): 1-3.
- [5] 王树国, 朱述友. 基于高灵敏漏电流测量技术的电动机绝缘自动测量系统研究 [J]. 电气应用, 2023, 42(9): 107-113.
- [6] 陈香敏. 高压电机绝缘故障原因分析与对策 [J]. 轻松学电脑, 2021, 000(005): P.1-1.
- [7] 康爱亮, 田慕琴, 李玮, 等. 环境湿度对高压电机主绝缘端部放电分布规律的影响 [J]. 绝缘材料, 2020, 53(2): 7.