DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250519

泵站四象限变频器旁路设计及保护配置整定

刘正军[1],张 勇[1],曹宝华[2],盛维高[2],孙传仓[2],殷振兴[2],曹春泉[2],李 毅[2]

(1. 淮安市淮安区水利局,江苏 淮安 223200;2. 江苏省淮沭新河管理处,江苏 淮安 223001)

摘要:针对淮阴二站同转速反向发电存在的振动超标、噪音过高及效率低下等问题,提出了四象限变频器、旁路系统及保护整定的方案,分析其对反向发电过程的作用机制,四象限变频系统的三级式架构为能量双向流动提供拓扑基础,旁路系统的互锁机制解决多工况切换的安全难题,分层保护体系实现设备全生命周期的风险管控,并利用振动在线监测系统与能效曲线对比验证效果。结果表明,四象限变频降速发电模式下叶轮室振动幅值降幅78.11%,发电效率增幅45.05%,噪音降低10 dB,各项性能提升明显,为低水头泵站反向发电技术的标准化提供理论支撑。

关键词:四象限变频器;旁路系统设计;保护配置整定;泵站反向发电;淮阴二站;能效优化

中图分类号:TV675;TM921.51 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)01-0173-04

Bypass Design and Protection Configuration Setting of Four-quadrant Frequency Converter in Pumping Stations

LIU Zheng-jun[1], ZHANG Yong[1], CAO Bao-hua[2], SHENG Wei-gao[2],
SUN Chuan-cang[2], YIN Zhen-xing[2], CAO Chun-quan[2], LI Yi[2]

(1. Huai'an District Water Conservancy Bureau, Huai'an 223200, China;
2. The New Huaishu River Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

Abstract: Aiming at the problems of excessive vibration, high noise and low efficiency existing in the same-speed reverse power generation of Huaiyin No. 2 Pumping Station, a scheme including a four-quadrant frequency converter, a bypass system and protection setting is proposed, and its mechanism of action in the reverse power generation process is analyzed. The three-stage architecture of the four-quadrant frequency conversion system provides a topological basis for bidirectional energy flow. The interlocking mechanism of the bypass system solves the safety problem of multi-condition switching. The hierarchical protection system realizes the risk control of the whole life cycle of equipment. The vibration online monitoring system and energy efficiency curve comparison are used to verify the effect. The results show that under the four-quadrant frequency conversion speed reduction power generation mode, the vibration amplitude of the impeller chamber is reduced by 78.11%, the power generation efficiency is increased by 45.05%, and the noise is reduced by 10 dB. Various performances are significantly improved, which provides theoretical support for the standardization of reverse power generation technology in low-lift pumping stations.

Key words: four-quadrant frequency converter; bypass system design; protection configuration and setting; reverse power generation in pumping stations; Huaiyin No. 2 pumpping station; energy efficiency optimization

1 工程概况

淮阴二站为南水北调东线工程第三梯级泵站,设计安装3台套3100ZLQ-5型立式全调节轴流泵与TLW2800-40型同步电机,单机额定功率2 800 kW,额定电压10 kV,额定转速150 r/min。泵站采用肘形进水流道、虹吸式出水流道,真空破坏阀断流,设计扬程4.4 m,设计流量100 m^3/s。该泵站在建成后的反向发电试验中出现了振动剧

收稿日期:2025-03-20,**修回日期**:2025-07-27,**接受日期**:2025-07-31

基金项目:江苏省水利科技项目(2014020)

作者简介:刘正军(1973-),男,工程师,研究方向为水利工程建设管理、泵站运行管理,E-mail:80867359@qq.com

通讯作者:曹宝华(1977-),男,高级工程师,研究方向为泵站运行管理、泵站反向发电技术,E-mail:104900029@qq.com

中国知网 https://www.cnki.net

烈、噪音超标及发电效率偏低等问题。低水头泵站在实现反向发电时，面临着流体机械与电力系统动态适配性不足的关键挑战。水泵在非设计工况下运行时，水力特性与电机电气性能难以匹配，导致效率大幅下降；传统并网方式易引发电网电压波动与谐波污染，影响系统稳定性；工况切换过程中产生的机电冲击，加剧了振动与噪音。为此，本文针对淮阴二站同转速反向发电存在的问题，提出四象限变频器、旁路系统及保护整定的方案，分析其对反向发电过程的作用机制，不仅能解决该泵站的实际问题，更为同类工程提供重要的技术参考。

2 四象限变频系统构造与反向发电运作机制

2.1 系统结构设计

选用苏州汇川 HD93 型四象限高压变频器（图 1）对水泵机组反向降速发电进行改造[1-2]，该变频器采用三级式结构设计，输入级配置 ZTSFGH-10 型移相变压器，采用 Y/延边△接法[3]，通过 12°移相角设计使 30 脉波整流电路的特征谐波次数为 $6k\pm1$（k 为整数），将输入电流总谐波畸变率（THD）控制在 5%以下。功率级由 15 只功率单元组成，集成 30 脉波整流与载波移相脉宽调制（PWM）逆变功能，其三电平拓扑通过钳位二极管实现电压阶梯式输出，较两电平结构降低 50%的器件耐压要求，同时减少输出电压的 dv/dt 值；PWM 技术将载波信号依次移相 $2\pi/15$ 弧度，使等效开关频率提升 15 倍，对 30 次以下低次谐波的抵消效果达 90%以上。控制级运用高压矢量控制技术，基于同步旋转坐标系下的电机数学模型，通过磁链闭环控制（SFOC）定子电流的励磁分量与转矩分量的解耦控制，提升电机控制的精准度。

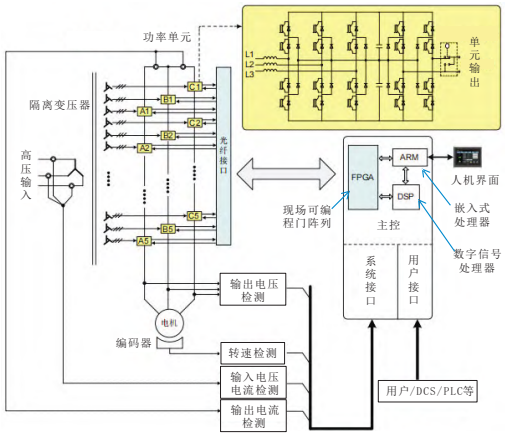


图 1 四象限变频系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of the four-quadrant variable-frequency system

2.2 反向发电的能量转换理论

反向发电是流体动能向电能有序转换的过程，其能量流路径遵循机电能量转换定律，即由水流推动叶轮旋转产生机械功率，通过轴系传递至电机转子转化为电磁功率，最终经变频器并网输出电功率。四象限变频器在此过程中承担能量双向流动的调控者、动态过程的柔性控制器双重角色。

3 旁路系统设计与协同机制

3.1 初始方案（电缆分支箱系统）

初期选用 DF-10 型电缆分支箱，用于首台 500 kVA 变频器在#3 电机改造试验中的模式切换。然而该系统操作繁琐，易造成电缆损坏，存在安全隐患等问题。

3.2 改进方案（一拖一旁路系统）

为解决电缆分支箱的缺陷，研发一拖一旁路系统，选用 HXGN-12 型手动旁路柜。其主接线见图 2 右侧，抽水回路为 QF153→QS9→#3 电机，发电回路为#3 电机→QS8→首台变频器组→QS7→QF153。其中 QS8 与 QS9 机械互锁，QS7 与 QS9 电气互锁，确保发电与抽水两种工况互不干扰。

3.3 升级方案（一拖二旁路系统）

为进一步优化反向发电效果，续建 1 套 900 kVA 变频发电装置，研发一拖二旁路系统。主接线见图 2 左侧，#1 电机抽水回路为 QF151→QS3→#1 电机，发电回路为#1 电机→QS2→续建变频器组→QS1→QF151，#2 电机的控制逻辑

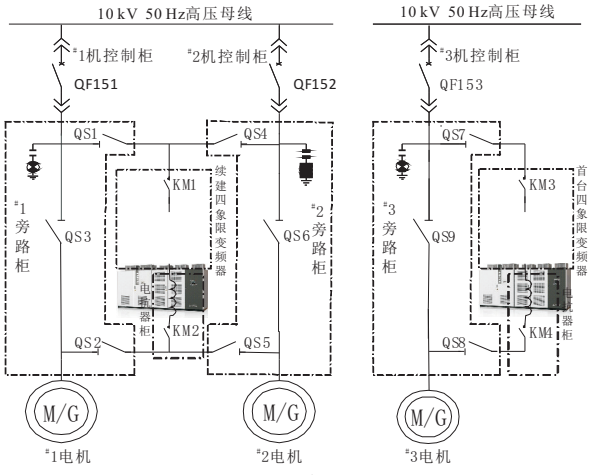


图 2 机组电气主接线图

Fig. 2 Main electrical connection diagram of the unit

中国知网 https://www.cnki.net

与之相同。其中 QS2 与 QS3、QS5 与 QS6 机械互锁,QS1 与 QS4、QS2 与 QS5 电气互锁,保证#1、#2 电机在发电时只能有一台投入运行。

3.4 变频器协同运行规则

满足双机运行条件时(单机功率≤500 kVA),先投入续建的 900 kVA 变频器,再投入首台 500 kVA 变频器,以减小励磁涌流对线路冲击;一拖二旁路优先选择#1 电机发电,一拖一旁路则切换至#3 电机发电,维持冲淤平衡。当功率>500 kVA 且≤900 kVA 时,仅投运 900 kVA 变频器,并优先选择#2 电机。当功率>900 kVA 时,所有设备停机。

4 保护整定方案的制定与实施

4.1 抽水模式下的保护设置

电机采用 Alstom P243 型微机保护装置[4],抽水模式下沿用原有的保护定值:①瞬时电流速断保护(Ⅰ段,短路保护)。为防止电机内部故障(如绕组短路)引发事故,抽水时额定电流 I_e=190 A,Ⅰ段保护取值 $11.5I_e$,立即动作;②短延时过流保护(Ⅱ段,严重过载保护)。作为Ⅰ段保护的后备,按躲过电机启动电流值整定,Ⅱ段保护取值 $7.13I_e$,定时限 1 s;③长延时过流保护(Ⅲ段,轻微过载保护)。防止电机因过负荷损坏,Ⅲ段保护取值 $1.26I_e$,反时限 10 s;④差动保护。电机首尾端电流差值取 2.5 A,时限 0.1 s;⑤欠压保护为 $0.65U_{相}$,时限 0.04 s;⑥过压保护为 $1.6U_{相}$,时限 10 s。

4.2 发电模式下的保护配置

变频器组具备多种保护功能,当设备出现故障时,分别输出跳闸和报警信号,跳闸时先断开变频器前级开关 QF,促使机组停机。

4.2.1 变压器保护整定

针对移相变压器,设置以下主要保护措施:①Ⅰ段保护。用于快速切除移相变压器高压侧的严重短路故障,按躲过变压器高压侧最大三相短路电流和变压器空载投运时励磁涌流整定,取值 $10.0I_{1n}$(一次侧额定电流),动作无延时;速断指令可快速关断 IGBT,停止高压输出,响应时间小于 10 μs。②Ⅱ段保护。用于防止变压器过载损坏,根据产品技术手册,取值 $1.5I_{1n}$,定时限 1 s。③Ⅲ段保护。避免变压器因长期过负荷运行受损,取值 $1.2I_{1n}$,反时限 60 s。④电压保护。过电压取值 1.05/1.1/1.4 倍 U_{1n}(一次侧额定电压)时,允许运行时间为连续/2 h/10 min;欠压保护取 $0.65U_{1n}$,定时限 0.04 s。⑤过热保护。当变压器温度超过 150 ℃时,启动定时限保护。

4.2.2 变频器保护参数设置

变频器的保护措施涵盖过流、电压、过热等方面:①过流保护。发电时变频器设定频率约 30 Hz,功率单元与机端电流(I_{3n})相同。Ⅰ段保护取值 $10.0I_{3n}$,动作无延时;Ⅱ段保护取值 $1.5I_{3n}$,定时限 1 s;Ⅲ段保护取值 $1.2I_{3n}$,反时限 60 s。②电压保护。机端额定电压 5.775 kV,功率单元输入、直流母线的额定电压分别为 1.14、1.75 kV,IGBT 模块额定电压为 1.8 kV。过电压取 1.15 倍,定时限 60 s;欠压保护取 0.65 倍,定时限 0.04 s。③过热保护。当柜内温度超过预设置值时,发报警信号;IGBT 超过 83 ℃时,启动定时限保护。④其他保护。负序保护在输入输出不平衡保护达到 1.05 倍时触发;缺相保护在输入侧、输出侧缺相时,发出报警信号并启动定时限保护。

4.2.3 电机差动保护调整

发电时,电网侧(50 Hz)与电机尾端(约 30 Hz)的电流在频率、相位、幅值上存在较大差异,导致主机控制柜的差动保护信号误动,因此在发电时需退出该保护。为保障电机安全,利用变频器内置的精密电流、电压采样及控制算法,实时监测电机绕组的电流、电压、功率等参数的异常变化,对过流、过载、接地、缺相等故障实现毫秒级检测和跳闸保护。

5 实施成效与验证分析

5.1 振动特性优化效果

试验采用振动在线监测系统采集叶轮室振动数据,传感器为 PCB 603M170,采样频率为 2 560 Hz。试验严格控制变量,在同转速、变频降速发电两种工况下,保持水泵叶片角度固定为 2°(最优发电角度),试验水头 2.8 m。

(1)同转速发电。启动过程中,转速从 30 r/min 升至 150 r/min 时振动较强,采样 9 次平均振动值为 6.3 mm/s;投励并网 30 min 后,稳定运行期采样 12 次(间隔 5 min),平均振动值为 5.62 mm/s(标准差 0.32 mm/s),噪音达 93 dB。图 3 为稳定期振动波形图,振动值为 5.6 mm/s。

(2)变频降速发电。启动过程中,转速从 30 r/min 升至 90 r/min 时振动较大,采样 20 次平均振动值为 3.2 mm/s;投励并网 30 min 后,稳定运行期采样 30 次(间隔 2 h),平均振动值为 1.23 mm/s(标准差 0.15 mm/s),噪音达 83 dB。图 4

中国知网 https://www.cnki.net

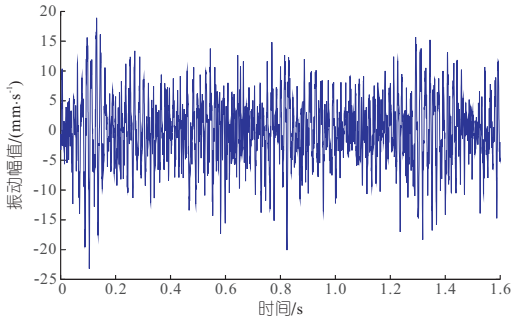


图 3 同转速发电叶轮室振动波形图

Fig. 3 Vibration waveform of the impeller chamber in same-speed power generation mode

为稳定期振动波形图，振动值为 1.21 mm/s。长期跟踪监测显示，水头为 2.0～3.5 m 时，振动超平均值波动较小；水头为 1.8～2.0 m 时，泵轴出现轻微偏心偏磨，振动值略有上升；水头低于 1.8 m 时，泵轴偏心偏磨现象较明显，振动值上升较快。

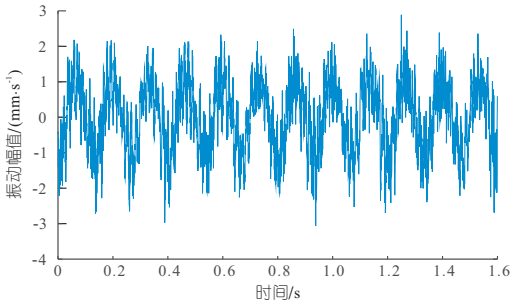


图 4 变频降速发电叶轮室振动波形图

Fig. 4 Vibration waveform of the impeller chamber in variable-frequency reduced-speed power generation mode

(3)振动抑制的理论验证。振动测试结果印证了流体机械的“转速—振动”关联理论，根据转子动力学，振动幅值 A 与转速 n 的平方呈正比($A\propto n^2$)。试验中同转速(150 r/min)发电时的振动值(5.62 mm/s)与变频降速(90 r/min)时的振动值(1.23 mm/s)之比为$(150/90)^2\approx2.78$，与实测的 4.57 倍偏差源于水流激振的附加影响。90 r/min 工况下的转速避开了泵站结构的固有频率(12.5 Hz)，形成共振规避效应，这与结构动力学的模态分析结果完全吻合。

5.2 发电效率提升情况

图 5 为在 30 Hz 发电模式下，水泵在不同叶片角度下的流量、效率、轴功率、水头差之间关系[5]。由图 5 可知，效率最低为 70.4%，最高为 77.5%，平均为 73.95%，与水泵特性曲线相符，性能良好。同转速发电效率最低为 14.8%，最高为 46.9%，平均为 28.9%。发电效率提升 45.05%，证明变频降速发电能有效提高效率。

5.3 保护动作实例

发电期间共发生 3 次保护动作，其中 2 次为

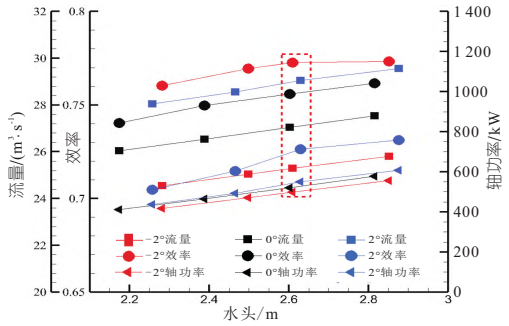


图 5 水泵发电能量性能曲线的比较

Fig. 5 Comparison of energy performance curves for pump power generation

500 kVA 变频器超负荷运行，导致功率模块的直流母线电压过电压保护动作；另外 1 次为线路停电，使 2 台变频器的欠压保护动作。

5.4 经济效益分析

首台变频改造投入 78 万元，年均电费收入 44.97 万元；续建机组投入 100 万元，年均收入 55.91 万元。投资回收期＜2 年的经济指标符合“增量成本－增量收益”的动态平衡理论。

6 结论

a. 构建了低水头泵站反向发电的“变频—旁路—保护”三位一体框架，其中四象限变频系统的三级式架构为能量双向流动提供拓扑基础，旁路系统的互锁机制解决多工况切换的安全难题，分层保护体系实现设备全生命周期的风险管控。

b. 提出了基于磁链闭环控制的转速稳定理论，通过 90 r/min 的优化转速设定，降低了振动和噪音，提升了发电效率，验证了“转速优化—共振规避—效率提升”的协同效应。

c. 本文对既有的变频器、旁路系统方面的研究进行了修正与补充，同时增加了微机保护、振动、噪音方面的内容。

d. 本文局限于水头适应性范围(2.0～3.5 m)约束，未来可基于计算流体动力学(CFD)与机电暂态仿真的耦合模型，拓展至更宽水头范围的理论研究，为低水头泵站反向发电技术的标准化提供理论支撑。

参考文献：

[1] 罗震，钱邦永，孙承祥. 高压四象限变频器在淮阴第二抽水站反向发电中的应用[J]. 小水电，2017(6)：33-36，55.(LUO Z，QIAN B Y，SUN C X. Application of high voltage four-quadrant inverter in reverse power generation of Huaiyin second pumping station[J]. Small hydro power，2017(6)：33-36，55.(in Chinese))

(下转第 172 页)

中国知网 https://www.cnki.net

The influence of Y-shaped diversion pier on inflow pattern in side-intake pumping station[J]. Water resources and power, 2024, 42(10): 144-148. (in Chinese))

[7] 郭楚，郑源，陈会向. 导流锥对低扬程双向轴流泵装置水力性能的影响[J]. 水电能源科学，2017，35(7)：168-171.(GUO C, ZHENG Y, CHEN H X. Influence of guide cone on hydraulic performance of low-head two-way axial pumping system[J]. Water resources and power, 2017, 35(7): 168-171. (in Chinese))

[8] 付小莉，郁片红，李君菡. 城镇排水泵站进水流道水力优化设计试验研究[J]. 中国给水排水，2023，39(1)：99-104.(FU X L, YU P H, LI J H. Hydraulic optimization design of inlet channel of urban drainage pumping station[J]. China water & wastewater, 2023, 39(1): 99-104. (in Chinese))

[9] 施伟，吕复生，于贤磊，等. 大型泵站前池扩散角对进水流态的影响[J]. 扬州大学学报(自然科学版)，2024(4)：37-46.(SHI W, LYU F S, YU X L, et al. The influence of forebay diffusion angle on inflow pattern in large pumping station[J]. Journal of Yangzhou university (natural science edition), 2024(4): 37-46. (in Chinese))

[10] 徐鹏飞，朱波，郭瑞，等. 小型泵站进水池改造为肘形进水流道水力性能研究[J]. 中国农村水利水电，2024(9)：130-136.(XU P F, ZHU B, GUO R, et al. Study on hydraulic characteristics of elbow inlet conduit reconstructed from intake tank in small scale pumping station[J]. China rural water and hydropower, 2024(9): 130-136. (in Chinese))

[11] 高传昌，高余鑫，董旭敏，等. 簸箕形进水流道主要控制参数对水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报，2023，41(11)：1111-1118.(GAO C C, GAO Y X, DONG X M, et al. Influence of main control parameters of skip-shapedwater inlet channel on hydraulic performance[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2023, 41(11): 1111-1118. (in Chinese))

[12] 国家能源局. 发电厂循环水系统进水流道水力模型试验规程：DL/T 286-2012[S]. 北京：中国电力出版社，2012.(National Energy Bureau of the People's Republic of China. Specification for hydraulic model test of pump intake structures of nuclear or fossil fuel power plants: DL/T 286-2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese))

[13] 国家能源局. 火力发电厂循环水泵房进水流道设计规范：DL/T 5489-2014[S]. 北京：中国电力出版社，2014.(National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical code for design of inlet flow passage of circulating water pump house of fossil-fired power plant: DL/T 5489-2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 泵站设计规范：GB 50265-2010[S]. 北京：中国计划出版社，2011.(Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design code for pumping station: GB/T50265-2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese))

[15] 国家能源局. 核电厂水工设计规范：NB/T 25046-2015[S]. 北京：新华出版社，2015.(National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for hydraulic design of nuclear power plants: NB/T 25046-2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015. (in Chinese))

[16] American National Standard. ANSI/HI 9. 8-1998, Pump Intake Design[S]. American National Standard Institute, Inc., 1998.

[17] 陆林广. 高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京：中国水利水电出版社，2013.(LU L G. Optimal hydraulic design of high-performance large-scale low-lift pump device[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))

(上接第 176 页)

[2] 李毅，胡志浪，沈浩，等. 低扬程轴流泵反向发电技术研究与应用[J]. 水电能源科学，2023，41(12)：200-202.(LI Y, HU Z L, SHEN H, et al. Research and application of low-head axial-flow pump reverse power generation technology[J]. Water resources and power, 2023, 41(12): 200-202. (in Chinese))

[3] 王鹏，刘文胜，袁澜，等. 移相变压器应用于高压变频器的研究与设计[J]. 变压器，2009，46(3)：9-12.(WANG P, LIU W S, YUAN L, et al. Research and design of phase-shifting transformer applied to high-voltage frequency converter[J]. Transformer, 2009, 46(03): 9-12. (in Chinese))

[4] 吴玮烨. P243 保护继电器在电动机保护中的应用[J]. 电工技术，2025(9)：180-182.(WU W Y. Application of P243 protection relay in motor protection[J]. Electric engineering, 2025, (9): 180-182. (in Chinese))

[5] ZHU Z H, GU Q, CHEN H X, et al. Investigation and optimization into flow dynamics for an axial flow pump as turbine (PAT) with ultra-low water head [J]. Energy conversion and management, 2024, 314: 118684.

中国知网 https://www.cnki.net