

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230406

# 低扬程轴流泵反向发电技术研究与应用

李毅, 胡志浪, 沈浩, 王敬星

(江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223001)

**摘要:** 为实现大型低扬程立式轴流泵反向发电运行, 利用电子变频技术代替机械变频技术, 将高压四象限变频器应用于淮阴二站反向变频发电, 并分析了并网方案、变频控制策略, 同时对现场进行改造, 实现了水泵发电运行的无级调速, 可根据运行工况自动跟踪水泵机组最优发电转速从而达到最大发电功率, 使效益最大化。

**关键词:** 反向发电; 高压变频器; 电子变频技术; 淮阴二站

**中图分类号:** [TV734. 1]; TV72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0200-03

## 1 概况

淮阴二站位于江苏省淮安市区西南头河与二河堤交汇处的二河东堤脚下, 工程建成于 2002 年, 是南水北调东线水利工程之一<sup>[1]</sup>, 属于江水北调第三梯级泵站, 承担着向洪泽湖和淮北地区补水的任务(表 1)。淮阴二站安装有 3. 1ZLQ-5 型的可逆式全调节立式轴流泵 3 台套, 总装机容量 8 400 kW。设计流量 100 m<sup>3</sup>/s, 设计扬程 4. 4 m。淮阴二站建设初期, 考虑到利用洪泽湖余水发电的情况, 设计单机发电流量 40 m<sup>3</sup>/s, 发电功率 100 kW, 但后期试运行过程中发现震动较大, 遂放弃发电功能。在南水北调东线江苏省河段内, 一般大型泵站发电工况水头要低于抽水运行扬程, 按水轮机理论分析, 当发电水头小于水泵扬程时, 需采用降低水泵倒转转速来获得更大的效率。往往水泵机组倒转发电时, 发电水头是随水情而变化, 需不断地调节水泵发电转速而取得

表 1 淮阴二站水位组合表

Tab. 1 Table of water level of Huaiyin second station m

设计 工况	具体 项目	出水 侧水位	进水 侧水位	净 扬程	备注
设计	抽水(1)	12.00	8.70	3.30	向泗阳站补水
	抽水(1)	13.10	8.70	4.40	向洪泽湖送水
	抽水(1)	10.50	8.70	1.80	出水侧低水位起抽
	抽水(1)	13.60	8.70	4.90	向洪泽湖送水最高扬程
	防洪	14.31	10.80	3.51	二河 3 000 m <sup>3</sup> /s, 总渠 800 m <sup>3</sup> /s
校核(1)	检修	12.00	8.50	3.50	泵站部分抽空, 检修
校核(2)	正向防洪(1)	15.40	10.80	4.60	二河 4 000 m <sup>3</sup> /s, 总渠 800 m <sup>3</sup> /s
	正向防洪(2)	16.43	11.20	5.23	入海水道强迫行洪

最佳的发电效率和发电功率。水泵倒转发电的降低使与之配套的电机发电频率相应降低, 受我国电网工频限制, 需要一种装置将水泵反转发电的电能转换成工频电能。高压交流变频调速技术为一种新型电力传动调速技术, 这种技术应用了先进的电力电子技术、计算机控制技术、高压电气、电机拖动等综合性领域的学科技术, 具有调速效率高、精度准、启动能耗低、调速范围宽、动态响应速度快及能实现无级调速、操作简便、保护功能完善、运行安全可靠、维修维护方便等优点。鉴此, 本文将高压四象限变频器应用于淮阴二站反向变频发电, 并成功完成设备安装调试及并网发电试验。

## 2 低扬程立式轴流泵反向发电技术

### 2.1 淮阴二站机组变频器

目前, 主流的高压变频器主要有电流源型变频器、三电平 PWM 电压源型变频器、功率单元串联多电平 PWM 电压源型变频器 3 种类型。淮阴二站改造的 10 kV 输出电压等级变频器采用三电平功率单元混联型结构, 采用的四象限高压变频器由电抗器柜、功率单元柜、变压器柜、主控制柜 4 部分组成。

### 2.2 四象限工作原理

淮阴二站采用的变频器型号为 HD93-J100/500-RN, 变频器直接 6 kV 输入, 直接 6 kV 输出, 无需任何形式的升压设备。变频器采用的输出结

收稿日期: 2023-02-17, 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2014020)

作者简介: 李毅(1990-), 女, 工程师, 研究方向为泵站运行管理、南水北调东线大型立式轴流泵反向发电技术, E-mail: 947121890@qq.com

构方式为多电平方式,输出电压谐波含量小,未引起电动机附加谐波发热的情况。三电平功率单元结构相对于两电平功率单元结构多输出一个电平,其输出电压也更小,可直接驱动普通高压电机,无需降容使用。

当电机处于电动状态时,有源前端(AFE)将电网的交流电源整流成直流电,再由逆变部分逆变成指定频率、指定电压的交流电源以控制电机。当电机处于发电状态时,逆变部分将完成整流功能,有源前端(AFE)根据电网频率相位进行逆变,将电能高质量地回馈到电网(图 1)。同时,三电平功率单元还具有过压、欠压、均压、过流、缺相、过温等故障保护功能。

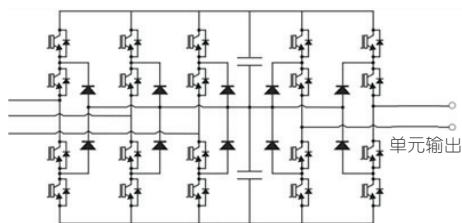


图 1 四象限功率单元拓扑结构图

Fig. 1 Four-quadrant power unit topology diagram

### 2.3 淮阴二站机组变频器技术再拓展

2022 年淮阴二站管理所新增 1 台套四象限变频器及旁路柜,采用二拖一手动切换方案,为了确保方案稳定可靠,方便设备技术管理,部分设备互通互用,建议新增的四象限变频器与现有设备技术性能特性相同;由于受现有变频器 500 kVA 容量限制,<sup>#</sup>3 机组未能充分利用水能资源,将新增的变频器容量提高至 900 kVA。根据现场情况,<sup>#</sup>1、<sup>#</sup>2 电机新增 1 台 800 kW 变频器,采用一拖二方式。

结合现场实际情况,主回路配置示意图见图 2,用户进线柜和电机为原有设备,新增 1 套 HD93 四象限变频设备和 1 套一拖二自动旁路柜。

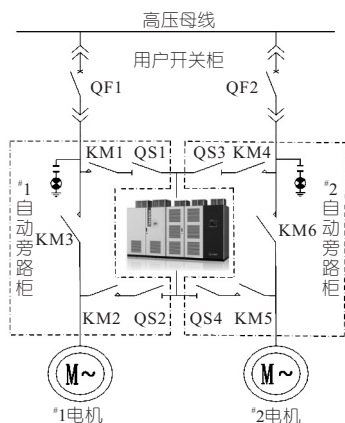


图 2 主回路配置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the main loop configuration

以<sup>#</sup>1 电机为例,正常抽水状况下,10 kV 电源经 QF1 进线开关及旁路柜接触器 KM3 直接给电机供电,电机运行在工频状态。当泄水发电时,10 kV 电源经 QF1 进线开关及变频器进出线刀闸(QS1、QS2)、真空接触器(KM1、KM2)来驱动电机运行,此时变频设备运行在四象限模式,发电电量全部经由变频装置回馈到电网。手动旁路柜可用于电动和发电两种模式切换。此方案可用于一用一备方案,当两台电机中的任意一台发生故障,可切换到另一台运行发电。

### 2.4 淮阴二站机组变频器技术问题及解决方案

#### 2.4.1 淮阴二站机组反向倒转振动问题

淮阴二站建成后进行了反向发电试验,出现倒转初期机组振动较大的问题。在机组抽水运行停机时控制真空破坏阀不打开,发现机组反转到额定转速时未出现振动问题,研究得出淮阴二站配置的真空泵排气量过小,在倒转初期水流夹杂着空气冲击叶片导致机组振动,重新选用大功率真空泵解决了机组倒转初期振动的问题。

#### 2.4.2 一二次线路改造方案

淮阴二站单台机组容量为 2 800 kW,受经费限制,高压四象限变频器容量仅能满足于泵站反向发电,经分析水头、流量等资料,根据现场推演计算得出高压四象限变频器容量为 600 kW,机组正向运行时还是采用工频运行。进而提出了现场一二次线路改造方案,满足抽水发电工况的转换。

#### 2.4.3 机组及变频器同步运行

淮阴二站断流设施选用真空破坏阀方式进行,在机组抽真空倒转时没有办法控制机组转速,经现场测试机组转速从零加速到额定转速时间约为 6 s;且淮阴二站选用无刷励磁方式,机端建压时间需 3 s,这就要求在机组初步转动时变频器就要投入运行,并控制机组静态励磁柜投励<sup>[2]</sup>,实现机组并网发电,从而确保机组安全运行。经现场试验,机组均顺利并网发电运行。

#### 2.4.4 采用功率单元串联多电平结构

高压四象限变频器采用功率单元的串联多电平结构,配置有 15 个功率单元模块,分属三相,每相 5 个功率单元串联。当轴流泵工作在发电的运行工况时,电机产生的电能通过逆变反向送至功率单元中间储能电容,储能电容电压抬升,有源前端控制直流母线电容电压为 1 750 V(该电压值可根据工艺需求进行调整),功率单元内部 DSP 执行整流控制算法,输出与当前工频电源同频同相同幅值电压,实现电能反送至电网及机组反向发电上网<sup>[3]</sup>。

## 2.4.5 实现对励磁的控制

高压四象限变频器采用同步机磁链矢量控制方式,对电机磁链进行闭环控制;实时观测电机内部磁场大小并控制;将转子励磁电流加入矢量算法中进行闭环控制,能实现对单位功率因数的控制。

## 3 效益测算及实施效果

### 3.1 效益测算

#### 3.1.1 社会效益

淮阴二站反向发电运行可引洪泽湖清水改善淮安市区里运河水环境,对淮安市着力打造“水清、岸绿、生态、靓丽”的里运河城区水环境有重要意义。

#### 3.1.2 经济效益

经济效益额的计算依据是对淮阴站多年水情水文分析<sup>[4]</sup>,淮阴二站发电水头大于 2.5 m 时,多年可发电天数为 120 d,在 2.5 m 时机组出力达 400 kW,电价为 0.38 元/(kW·h),按运行 10 年计算得出经济效益为 437 万元。

### 3.2 实施效果

本次改造深入研究水泵倒转并网控制、变频器的选择及控制策略、泵站电气接线改造、控制方式等<sup>[3]</sup>,实现了高压四象限变频器在水泵机组发电工况的并网和调速,利用高压四象限变频器可实现水泵发电运行的无级调速,可根据运行工况自动跟踪水泵机组最优发电转速从而达到最大发电功率,使效益最大化。

对 2016~2022 年淮阴二站反向发电运行情况进行跟踪统计,发现高压四象限变频器能根据实际工况自主调节水泵机组发电频率,可实现最大发电功率(表 2)。将高压四象限变频器用于大型泵站反向发电运行,比相同工况下同转速发电效率提高 1.6 倍;相比于机械变频发电,具有根据实际工况自主调节发电频率<sup>[5]</sup>,可实现机组最大发电功率的特点,同时对现场改造较少,经济效益

表 2 运行情况统计

Tab. 2 Performance statistics

年份	运行 天数/d	运行 台时/h	翻水量 /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	发电量 /(10 <sup>4</sup> kW·h)	发电收益 /万元
2016	30	1 062	1.26	58.30	22.20
2017	16	900	0.97		
2018	26	624	0.74		
2019	153	8 198	10.00		
2020	66	3 792	4.50		
2021	191	4 365	4.95(用水量)	148.67	34.88
2022	174	1 717	2.04	85.75	20.11

较高。

2022 年,对淮阴二站另外 2 台机组进行加装改造,目前已实现 3 台机组正向<sup>[6]</sup>工频向洪泽湖、淮北地区、南水北调第四梯级站补水,2 台反向变频运行向里运河生态调水,改善了淮安市城区水质。

## 4 结论

a. 采用高压电子变频技术,实现水泵机组倒转发电工况的自动平滑并网和无级调速。

b. 优化电子变频器控制策略和谐波抑制,实现水泵发电运行最大功率及时跟踪,保证了水泵机组发电的最大功率。

c. 按不同的运行工况自动调节励磁,改善供电质量,并实现励磁启停。

### 参考文献:

- [1] 李毅,殷振兴,陈超群. 泵站反向发电运行工况下拦污方案探讨[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(5): 69-70,85.
- [2] 江苏省水利厅. 泵站反向发电技术规范:DB32/T 3983-2021[S]. 南京:河海大学出版社,2021.
- [3] 江苏省淮沭新河管理处. 江苏省水利科技项目汇编[R]. 2017.
- [4] 中华人民共和国水利部. 2011 年中国水资源公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [5] 李培松. 基于高-高方式高压变频器系统应用的研究[D]. 济南:山东大学,2008.
- [6] 王向龙,赵雨梦,王洪亮,等. 阿海水电站水轮机振动对机组效率的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 156-160.

## Research and Application of Low-head Axial-flow Pump Reverse Power Generation Technology

LI Yi, HU Zhi-lang, SHEN Hao, WANG Jing-xing

(The New Huaishu River Management Division of Jiangsu Province, Huaian 223001, China)

**Abstract:** In order to realize the reverse power generation operation of large-scale low-lift vertical axial flow pump, using electronic frequency conversion technology instead of mechanical frequency conversion technology, the high voltage four-quadrant frequency converter was applied to Huaiyin second station reverse frequency conversion power generation, and the grid-connected scheme and variable frequency control strategy were analyzed. At the same time, the on-site transformation was carried out to realize the stepless speed regulation of the pump power generation operation. The pump unit can be automatically tracked according to the operating conditions of optimal generating speed to achieve the maximum generating power and maximize the benefit.

**Key words:** reverse power generation; high voltage frequency converter; electronic frequency conversion technology; Huaiyin second station