

# 水务泵站电气系统谐波分析与治理策略研究

侯 川

台州市滨海水务有限公司 浙江 台州 318000

**摘要:** 随着现代水务系统自动化、智能化水平的不断提升,变频调速技术、软启动装置、电力电子设备等非线性负载在水务泵站中得到广泛应用。这些设备在提升运行效率的同时,也向电网注入大量谐波电流,导致电气系统出现电压畸变、设备过热、保护误动、电能质量下降等一系列问题,严重威胁泵站的安全稳定运行。本文以水务泵站为研究对象,系统分析其电气系统中谐波的产生机理、主要来源及危害特性;通过现场实测与仿真建模相结合的方法,对谐波含量进行定量评估;在此基础上,对比分析无源滤波、有源滤波及混合滤波等主流谐波治理技术的适用性与经济性;最后,提出一套适用于水务泵站的谐波综合治理策略,研究成果可为水务行业电能质量治理提供理论依据与技术参考。

**关键词:** 水务泵站;谐波分析;电能质量;变频器;有源滤波器;谐波治理

## 引言

水务泵站作为城市供排水系统的核心节点,承担着原水输送、污水提升、雨水排涝等关键任务,其运行的可靠性与效率直接关系到城市公共安全与居民生活质量。近年来,为响应国家节能减排政策,提升泵站运行能效,变频调速技术被广泛应用于水泵电机控制中。变频器作为典型的非线性负载,其整流环节(通常为二极管不控整流或晶闸管相控整流)在工作过程中会产生大量谐波电流,注入公共电网,造成系统电压波形畸变。谐波不仅会降低电能质量,还可能引发一系列连锁故障:如导致变压器、电缆过热老化,缩短设备寿命;干扰继电保护装置正常动作,造成误跳闸或拒动;影响精密仪表测量精度;甚至在特定条件下引发并联或串联谐振,造成设备损坏。因此,对水务泵站电气系统中的谐波问题进行深入研究,并制定科学有效的治理策略,已成为保障泵站安全、高效、绿色运行的迫切需求。

## 1 水务泵站谐波来源与特性分析

### 1.1 谐波基本概念

根据国际电工委员会(IEC)标准,谐波是指频率为基波频率(通常为50Hz)整数倍的正弦波分量。在理想正弦供电系统中,电压与电流均为单一频率的正弦波;然而,当系统中存在非线性负载时,电流波形将发生畸变,可分解为基波与一系列高次谐波的叠加<sup>[1]</sup>。总谐波畸变率(THD)是衡量电能质量的重要指标,定义为各次谐波有效值的平方和的平方根与基波有效值之比。该指标直观反映了波形偏离理想正弦的程度,是评估谐波污染水平的核心参数。

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

其中,  $I_h$  为第  $h$  次谐波电流有效值,  $I_1$  为基波电流有效值。

### 1.2 主要谐波源分析

(1) 变频调速装置(VFD): 这是最主要的谐波源。目前绝大多数泵站采用电压源型变频器(VSI),其前端通常为三相桥式不控整流电路。该电路在理想情况下,主要产生  $6n \pm 1$  次谐波( $n$  为正整数),即5次、7次、11次、13次等。其中,5次和7次谐波幅值最大,通常占总谐波电流的80%以上。谐波含量与变频器的负载率、直流侧电容大小、电网短路容量等因素密切相关。(2) 软启动器: 部分泵站采用晶闸管软启动器控制大功率电机启动。其通过控制晶闸管导通角来调节输出电压,在启动过程中会产生丰富的奇次谐波,尤其是3次、5次、7次谐波。虽然软启动过程时间较短,但在频繁启停的泵站中,其累积影响不容忽视。(3) UPS不间断电源与开关电源: 泵站控制室、监控系统、通信设备等通常配备UPS及各类开关电源。这些设备输入端多为单相整流电路,主要产生3次、5次、7次等奇次谐波,其中3次谐波在三相系统中会形成零序电流,在中性线上叠加,可能导致中性线过载。(4) 其他非线性负载: 如LED照明、变频空调等辅助设施,虽单台容量小,但数量众多,其谐波叠加效应亦需考虑。

### 1.3 谐波危害分析

谐波对水务泵站电气系统的危害是多方面且深远的。首先,谐波电流在导体中流动时会产生额外的焦耳热损耗,这种损耗因集肤效应和邻近效应而进一步加剧,导致变压器绕组、电缆绝缘层及电机定子温度异常升高,长期运

行将加速设备绝缘老化,显著缩短其使用寿命。其次,谐波会干扰继电保护与自动化系统的正常工作。例如,谐波可能使电流互感器铁芯饱和,造成二次侧电流波形失真,进而导致基于电流采样的保护装置误判,出现非故障跳闸或故障拒动,严重威胁泵站连续供水的安全性<sup>[2]</sup>。再者,泵站普遍配置的无功补偿电容器组在谐波环境下存在谐振风险。当系统某次谐波频率接近电容器与系统电感构成的并联或串联谐振点时,将引发谐振放大效应,使电容器承受数倍于额定值的电流与电压,轻则过热损坏,重则发生爆炸。此外,谐波还会导致电能计量装置产生误差,影响电费结算的公平性,并可能通过电磁干扰影响PLC、DCS等控制系统的逻辑判断与通信稳定性,为泵站的智能化运行埋下隐患。

## 2 谐波治理技术对比分析

### 2.1 无源滤波器 (PF)

无源滤波器由电感、电容和电阻等无源元件构成,通过将其调谐至特定的谐波频率(如5次或7次),在该频率下呈现极低的阻抗,从而为谐波电流提供一条低阻抗的旁路通道,将其从主电网中分流吸收。这种技术方案结构简单、成本低廉、运行维护方便,并且在滤除谐波的同时还能提供基波无功功率,具有较高的综合性价比。然而,无源滤波器的性能高度依赖于电网的系统阻抗,一旦系统结构或运行方式发生变化,其滤波效果将大打折扣。更严重的是,无源滤波器与系统电感之间可能在某些频率下形成并联谐振,反而会放大该次谐波,带来灾难性后果。此外,由于其参数固定,无源滤波器只能针对预设的几次特征谐波进行治理,对于非特征谐波或频谱变化的谐波源无能为力,且在轻载时容易造成基波无功过补偿,导致电压抬升。

### 2.2 有源滤波器 (APF)

有源滤波器代表了谐波治理技术的先进方向。它基于高速数字信号处理器(DSP)和大功率电力电子逆变器,通过实时采样负载电流,精确分离出其中的谐波分量,并立即生成一个幅值相等、相位相反的补偿电流注入电网,从而实现谐波电流的动态、主动抵消。有源滤波器的最大优势在于其卓越的动态性能和广泛的适应性。它能在20毫秒内响应负荷的突变,有效滤除2至50次甚至更高次的全频谱谐波,且其工作效果不受系统阻抗变化的影响,从根本上杜绝了谐振风险<sup>[3]</sup>。同时,现代有源滤波器通常具备多功能集成能力,可在治理谐波的同时,动态补偿无功功率、校正三相电流不平衡,全面提升电能质量。当然,这种高性能也伴随着较高的初始投资成本和一定的自身功耗,对安装环境的散热和电磁兼

容性也提出了更高要求。

### 2.3 混合滤波器 (HAPF)

混合滤波器旨在融合无源与有源滤波技术的优点,以期在治理效果与经济成本之间取得最佳平衡。典型的混合方案由一组或多组针对主要特征谐波(如5次、7次)设计的单调谐无源滤波器,与一台容量相对较小的有源滤波器并联组成。无源部分承担了大部分谐波电流的滤除任务,有效降低了有源部分的容量需求和成本;而有源部分则负责滤除剩余的非特征谐波、动态跟踪负荷变化,并对无源部分可能存在的谐振风险进行主动阻尼。这种协同工作模式使得混合滤波器既具备了无源滤波器的高性价比,又拥有了有源滤波器的灵活性与安全性,特别适用于谐波含量高、频谱相对固定但又要求高可靠性的中大型泵站。

### 2.4 其他措施

除了上述主流滤波技术外,还可从系统设计和设备选型层面采取预防性措施。例如,采用12脉波或18脉波整流的变频器,通过移相变压器将多个整流桥的谐波相互抵消,可将5次、7次等主要谐波大幅抑制,但其成本高、体积大,多用于超大功率场合。在现有变频器输入端加装3%至5%的交流电抗器,是一种经济实用的初级治理手段,能有效抑制约30%至50%的谐波电流。此外,优化无功补偿策略也至关重要,应避免使用纯电容器组,转而采用静止无功发生器(SVG)等动态补偿装置,或在电容器支路中串联电抗器(调谐频率高于250Hz,即高于5次谐波的125Hz),构成失谐滤波器,既能提供无功,又能有效规避5次及以下谐波的谐振风险。

## 3 水务泵站谐波综合治理策略

### 3.1 源头抑制

谐波治理的根本在于从源头上减少谐波的产生。在泵站的新建或改造项目中,应优先选用具备低谐波特性的变频设备。例如,选择内置直流电抗器的变频器,或采用采用PWM整流技术(即四象限变频器)的产品,后者能实现单位功率因数运行,并将网侧电流畸变率控制在极低水平。对于已投运的泵站,为现有变频器加装输入交流电抗器是最为经济有效的初级治理措施。此外,在电气系统设计阶段,应合理规划负荷分配,避免将多台大功率变频器集中连接在同一段低压母线上,通过分散谐波源的方式,可以有效降低谐波的叠加效应,减轻对电网的冲击。

### 3.2 过程控制

在系统运行过程中,应加强对谐波的动态监控与管理。传统的固定式电容器无功补偿方式在谐波环境下风

险极高,应逐步替换为基于电力电子技术的静止无功发生器(SVG)。SVG不仅能提供毫秒级响应的动态无功支撑,稳定系统电压,更重要的是其呈电流源特性,完全不存在与系统发生谐振的可能性<sup>[4]</sup>。同时,应建立一套完善的电能质量在线监测系统,对关键节点的谐波水平进行7×24小时不间断监测,并设置多级预警阈值。一旦谐波指标接近或超过安全限值,系统可自动报警,提示运维人员及时介入,实现从“事后处理”到“事前预防”的转变。

### 3.3 末端治理

对于已经存在严重谐波污染的泵站,必须采取有效的末端治理措施。治理方案的选择应遵循“因地制宜、经济高效”的原则。对于总装机容量小于500kW的小型泵站,谐波问题相对简单,可优先考虑“输入电抗器+带调谐电抗器的无功补偿”方案,以最低的成本解决主要矛盾。对于装机容量在500kW至2000kW之间的中型泵站,推荐采用混合滤波方案,即利用无源滤波器处理5次、7次等主要谐波,再辅以小容量有源滤波器处理剩余谐波并提供动态补偿,兼顾效果与成本。而对于大型泵站或对供电连续性、电能质量有极高要求的关键泵站,则应直接采用有源滤波器(APF)方案,以确保治理效果的全面性与可靠性。在具体实施中,APF的容量通常按系统可能出现的最大谐波电流的1.2至1.3倍进行选型,并应将其安装在谐波源与无功补偿装置之间的母线上,尽可能靠近谐波源,以最大化其治理效能。

### 3.4 运维管理

再先进的治理设备也离不开科学的运维管理。泵站应建立健全的谐波治理设备台账,详细记录设备型号、参数、投运时间及维护历史。制定定期巡检与专业检测计划,利用便携式电能质量分析仪对治理效果进行周期性验证,确保设备始终处于最佳工作状态。同时,加强对运行维护人员的专业培训,使其充分理解谐波的危害、治理原理及设备操作规范,提升其对电能质量问题的识别与处置能力,从而形成一套从技术到管理的完整闭环。

## 4 工程应用案例

某市污水处理厂泵站采用多台变频器驱动潜污泵,运行中出现电容器频繁烧毁、继电保护误动作等问题。经电能质量测试发现,系统5次、7次谐波电流畸变率分别达18%和12%,总谐波畸变率(THDi)超过25%,远超国标GB/T 14549-1993限值。分析表明,变频器作为典型非线性负载,是主要谐波源。谐波在系统阻抗上产生谐振,放大了特定次数谐波,导致无功补偿电容器过载损坏,并干扰保护装置正常工作。治理方案采用“滤波+隔离”策略:一是在变频器输入侧加装5%电抗率的串联电抗器,抑制5次及以上谐波;二是在低压母线侧配置有源电力滤波器(APF),动态补偿2~25次谐波,使THDi降至5%以下;三是将无功补偿柜改造为抗谐波型,提升系统稳定性。实施后,电能质量显著改善,设备故障率下降,维护成本降低,验证了综合治理策略的有效性与经济性。

## 5 结语

水务泵站电气系统谐波问题已成为制约其安全高效运行的重要因素。本文通过理论分析、实测与仿真,明确了变频器是主要谐波源,5次、7次谐波危害突出。针对不同规模与需求的泵站,应采取差异化的治理策略:小型站以经济性为主,采用无源方案;中大型站推荐混合或有源滤波技术。实施“源头—过程—末端”综合治理,结合智能监测与规范运维,可有效提升泵站电能质量,保障城市水务系统安全稳定运行。未来,随着宽禁带半导体器件(如SiC、GaN)的应用,低谐波变频器成本将进一步降低,从源头解决谐波问题将成为主流趋势。

## 参考文献

- [1]GB/T14549-1993.电能质量公用电网谐波[S].
- [2]张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [3]李建林,等.有源电力滤波器在供配电系统中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):156-162.
- [4]刘志刚,等.城市供水泵站谐波特性及治理方案研究[J].给水排水,2020,46(5):112-117.