

30%；在推进后期，在上部钻孔结束 0.4MPa 的最后灌注，保证泥浆由下至上的凝固支持。将此技术用于某轨道交通工程，根据盾构施工过程中的管片变形观测资料，提出新的注浆灌注量的动力校正方程：

$$Q=1.2 \times V \times (1+0.05 \times S)$$

即：V 是理论空隙容积；S 是实际的上浮速率（mm），目的是将灌注率提高到 98%，24 小时后将沉降控制在 1mm 以内。

### 5.3 高精度误差修正技术

技术基于三层结构的空间位置、智能组装、错误补偿体系，在管片进场检验时，利用 3D 激光雷达对每块管片进行 0.1mm 的模型构建，并着重对止水条的沟槽深度等关键技术进行检验，实现不符合要求的管片剔除比例小于 3%。安装前，利用盾构机上安装的全站仪和棱镜装置，构建出相对坐标系，保证环面的设计轴与盾构机轴的吻合程度在 1mm 以内。

装配阶段，使用六轴机器人手臂，在机器人端部装有力控制传感器，抓取的同时，对机器人重心进行辨识，并利用 PID 控制方法对其进行控制，以防止其发生塑性变形。在环形断面上布设 32 个参考点，采用机器人臂末端安装的激光测距装置，实现与参考点之间的精确定位，并上传到 BIM 模型中进行对比，若发现半径误差大于 1.5mm，环形误差大于 0.8mm，则会产生校正轨迹<sup>[4]</sup>。在某跨河隧道施工中应用该技术，采用预偏动力补偿方法，利用前 5 环管片的上浮规律，在目前环组装机时预先设定 -0.5‰ 的倾斜角，并利用机器人手臂的微动调节，将累计误差降至 3mm。

为消除管片位姿累计误差，每安装 10 个管片进行姿态复校：采用埋入式 FBG 传感装置，实时监测周边应力变化，对监测结果进行分析，发现异常部位有可能出现错台现象，采用特殊的液压千斤顶进行精确调节，每次调节次数不大于 0.5mm，以防止出现二次破坏，使整个隧道的整体稳定性能得到明显提高。

### 5.4 地质适应性预处理

针对软土层空间展布特点，采取分区施策的方法进行地质前处理。针对 5 米以上的粉砂层，以二次管式高压喷射注浆作为加固措施，设计 800 m 的直径和 200mm 的宽度，构成 6 米宽的圆柱形补强区域。施工过程中，通过调节喷孔压力、举升速率，可实现 28d 灌注桩的无侧限抗压强度大于 2MPa，而渗透性降低到  $1 \times 10^{-7}$  cm/s 以内。以某滨海新区隧道工程为例，通过真空预压、塑胶排水板复合加固技术，将土体孔隙率由 1.8 下降到 1.2，模量提高到 8MPa，从而减小施工对土体的影响<sup>[6]</sup>。

采用实时监控、分层反应、迅速补强技术，构建动态支护系统，在盾构机刀盘前端布设地质雷达，超前 10m 进行监测，监测到沙层厚度增大大于 1m，即主动触发一阶反应：打开圆顶周向注浆口，灌注速凝泥浆，生成 50cm 厚止

水环；当发现管片上浮速度大于 2mm/h 时，进行二次反应：利用水玻璃、水泥双液泥浆进行放射状灌浆，浆液容积比率为 1:1.5，浆液注入压力为 0.5-0.6MPa，单个钻孔注浆量按上浮量的变化进行动态估算。通过前期工作与动态支护技术结合，实现复杂地层条件下隧道管片稳定度提高 70%，为隧道工程建设提供科学依据。

## 6 案例分析

以某软土层隧道工程为例，长度 2.5km 左右。建设前期，盾构推进过程中，管片发生明显上浮，最大浮移量可达 12mm，造成盾构施工的轴向位移超出设计标准，并且发生多个节段的错位等问题。针对这种情况，相关部门提出以上的控制方法。针对盾构机掘进过程中的参数实时调整，实现掘进速率由 35mm/min 调节到 25-30mm/min，同时合理减小掘进压力 8%。通过对水泥浆的配比进行优选，选用新功能泥浆，该泥浆初凝时间不超过 3.5h，28d 抗压强度不低于 16MPa，并进行多点的均匀灌浆。还采用高精度拼接方法，实现对管片的高质量拼接。同时采用高压旋喷法对隧道所过的粉土地层进行预处理，以达到对地基进行加固的目的。通过采取一系列的施工技术，使管片浮量逐步降低到 3mm 以下，并且隧洞的轴线偏离达到设计标准，有效排除渗漏水等问题，确保施工的顺利进行。

## 7 结语

综上，通过针对软土层中盾构机施工中出现管片上浮原因进行探讨，进而采取有效的控制策略，并取得显著效果。动态调整参数自适应调整技术，能够对管片运行状况进行及时反映，从而防止因不合理设计而引起上浮现象。通过对功能浆料配方的优选，提高对泥浆的阻流性能，减小上浮空间；采用高精度装配技术，实现对管片装配的精确控制，保证质量和稳定性；采用自适应地质条件的预处理和动力支护，使地层力学性能得到较好的提高，为管片的安全稳定提供保障。不同措施具备不同优势，技术协同可以实现对管片上浮的整体控制。未来，深度融合智能技术，为管片在复杂地质条件下的安全稳定运行提供保障，旨在促进隧道项目的优质发展。

### 参考文献

- [1] 张强,高志勇,吕晨熙.双模盾构在全断面硬岩施工中管片定位桩技术研究[J].江苏建筑,2024,(02):73-76.
- [2] 李振军.浅析大直径土压平衡盾构泥岩地层施工技术[J].科技创新,2022,(16):85-88.
- [3] 董衍飞.地铁盾构法下穿粉砂层质量安全控制研究[J].江苏建筑,2022,(02):94-97.
- [4] 阙宝存,赵洪岩,李森,杜凤超.软土地层盾构机施工管片上浮原因及控制措施[J].建筑技术,2021,52(08):960-962.
- [5] 杜强.地铁隧道盾构下穿富水粉土层时地层及管片变形规律[J].铁道建筑,2021,61(05):54-59+79.

# Research on diagnosis and suppression of radiation noise in distributed photovoltaic inverters

Hui Wu

Southwest Business Department, Fujian Electric Power Co., Ltd. State Power Investment Corporation, Nanning, Guangxi, 530025, China

## Abstract

The global demand for clean energy is continuously increasing, and distributed photovoltaic power generation has gained widespread application due to its flexibility, efficiency, and the ability to consume power locally. This paper focuses on the radiation noise issues of distributed photovoltaic inverters, systematically examining their mechanisms, diagnostic techniques, and suppression methods. It first delves into the causes of noise, such as the switching actions of power electronic devices, electromagnetic coupling, and heat dissipation systems. It then details diagnostic techniques, including spectral analysis, time-domain analysis, near-field scanning, and fault tree analysis. Finally, it proposes a series of noise suppression methods, including optimizing circuit topology, improving shielding and grounding, and optimizing PCB layout and wiring.

## Keywords

distributed photovoltaic inverter; radiation noise; noise diagnosis; noise suppression; electromagnetic compatibility

# 分布式光伏逆变器辐射噪声诊断与抑制方法研究

吴琿

国家电投集团福建电力有限公司西南事业部, 中国·广西 南宁 530025

## 摘要

现阶段全球对于清洁能源的需求在不断地增长, 分布式光伏发电以其灵活高效、就近消纳等优势则得到了广泛地应用。本文聚焦于分布式光伏逆变器的辐射噪声问题, 系统地研究了其产生机理、诊断技术与抑制方法。首先深入地剖析了电力电子器件开关动作、电磁耦合、散热系统等引发噪声的原因, 再详细地阐述了基于频谱分析、时域分析、近场扫描及故障树分析等诊断技术, 随后提出了优化电路拓扑结构、改进屏蔽接地、优化PCB布局布线等一系列的噪声抑制方法。

## 关键词

分布式光伏逆变器; 辐射噪声; 噪声诊断; 噪声抑制; 电磁兼容性

## 1 引言

分布式光伏逆变器是光伏发电系统中的核心设备, 其主要负责将光伏电池产生的直流电转换为交流电再并入电网。但在实际运行的过程中, 分布式光伏逆变器会产生一定的辐射噪声, 如此一来不仅影响了周边电子设备的正常运行, 还可能会对通信系统造成干扰, 进而降低电力系统的电磁兼容性。同时过高的辐射噪声也可能预示逆变器存在着潜在的故障, 极易影响设备的可靠性与使用寿命。可是传统的噪声处理方法缺乏了系统性, 其难以从根源上解决相关的问题。所以需要深入地研究分布式光伏逆变器辐射噪声的诊断与抑制方法。此次研究旨在为有效地降低分布式光伏逆变器辐射噪声、提升设备电磁兼容性与运行稳定性提供理论依据

和实践指导。

## 2 分布式光伏逆变器辐射噪声产生机理

### 2.1 电力电子器件开关动作引发的噪声

分布式光伏逆变器涉及到了大量使用功率的半导体器件, 如 IGBT (绝缘栅双极型晶体管)、MOSFET (金属-氧化物半导体场效应晶体管) 等等。而这些器件在高频开关地过程中, 其电流和电压会发生急剧的变化, 进而产生陡峭的电压和电流上升/下降沿。根据麦克斯韦电磁理论可知, 快速变化的电流和电压会在其周围空间激发电磁场, 从而产生电磁辐射噪声。例如 IGBT 在开关的瞬间, 集电极-发射极电压 ( $V_{ce}$ ) 和集电极电流 ( $I_c$ ) 的变化率 ( $dv/dt$  和  $di/dt$ ) 非常大, 因此会产生丰富的谐波成分, 并且这些谐波会以电磁辐射的形式向周围进行传播, 最终成为了逆变器辐射噪声的主要来源之一。而且开关频率越高, 它产生的电磁辐射噪声强度就会越大, 频段也变得越宽<sup>[1]</sup>。

【作者简介】吴琿 (1988-), 男, 中国陕西渭南人, 本科, 工程师, 从事新能源电力工程项目管理研究。

## 2.2 电磁耦合导致的噪声传播

在分布式光伏逆变器的内部,存在着多种电磁耦合途径,使得噪声会在不同部件之间传播。一方面电路中的导线、PCB(印刷电路板)走线等可以作为天线,将电力电子器件产生的噪声辐射到周围空间。如较长的电源线和信号线就比较容易接收和发射电磁干扰信号,以此形成共模和差模噪声。另一方面变压器、电感等磁性元件的磁场耦合,依然会导致噪声地传播。具体落实:当变压器的原边和副边绕组之间存在寄生电容和互感,原边的噪声信号则会通过电磁耦合传递到副边,从而进一步扩大噪声的影响范围。此外逆变器内部不同电路模块之间的电磁感应和电容耦合,也会使得噪声在系统内相互干扰,进而加剧了辐射噪声的问题。

## 2.3 散热系统产生的附加噪声

为了保证逆变器内电力电子器件在正常温度范围内的工作,通常会配备散热系统,如散热风扇、散热片等。其中散热风扇在运行的过程中,扇叶与空气的摩擦、电机的振动等会产生机械噪声。而且风扇电机的电刷与换向器之间的电火花放电,以及电机绕组的电磁振动,均会产生电磁噪声。上述这些噪声与电力电子器件产生的电磁辐射噪声相互叠加,便进一步增加了逆变器的总辐射噪声水平。同时散热系统的不合理设计,如散热片布局不当、风道不畅等,也可能导致空气流动的不均匀,进而产生额外的气动噪声,甚至还会恶化逆变器的噪声环境。

# 3 分布式光伏逆变器辐射噪声诊断技术

## 3.1 基于频谱分析的诊断方法

频谱分析是当前相关人员诊断分布式光伏逆变器辐射噪声的常用方法之一。该方式主要使用了频谱分析仪,借此采集逆变器周围空间的电磁辐射信号,并将其从时域转换到频域进行分析。因为不同的噪声源产生的噪声具有特定的频谱特征,像电力电子器件开关动作产生的噪声通常集中在开关频率及其整数倍频处,会呈现出明显的谐波特性。所以分析频谱图中各频率成分的幅值、分布,就可以判断出噪声的主要来源和频率范围。此时,一齐对比正常运行状态和故障状态下的频谱差异,便能够及时地发现噪声的异常情况,为相关人员进一步的故障诊断提供依据。另外频谱分析还可以结合傅里叶变换、小波变换等数学方法,旨在对噪声信号进行更加深入的分析,从中提取出有用的特征信息。

## 3.2 时域分析诊断方法

时域分析诊断方法的原理是观察噪声信号在时间域内的波形特征,以此判断逆变器的工作状态。一般情况下,相关人员可以利用示波器等设备,来采集逆变器输出电压、电流以及辐射噪声的时域波形。因为在正常情况下,这些波形都具有一定的规律性和稳定性,但当存在噪声问题或者是设备故障时,其波形就会出现畸变、振荡等异常现象。例如,若发现逆变器输出电压波形出现尖峰、毛刺等等,则可能是电力电子器件开关过程中的电压过冲或电磁干扰而引起的。

基于此,再对时域波形的上升时间、下降时间、振荡周期等参数进行测量和分析,就可以进一步确定噪声的性质和产生原因。

## 3.3 基于近场扫描的噪声源定位方法

近场扫描技术的优势在于能够精确地定位分布式光伏逆变器的噪声源。其原理是使用近场探头,在逆变器表面或附近区域进行扫描,进而采集不同位置的电磁辐射信号。再通过对采集到的信号强度和相位信息进行处理和分析,并利用电磁场理论和算法,重建逆变器表面的电磁场分布,从而确定出噪声源的具体位置。比如,在扫描的过程中,如果发现某一区域的电磁辐射强度明显高于其他区域,则该区域很可能是噪声源所在位置。目前近场扫描技术不仅可以帮助准确地识别噪声源,还能直观地展示出噪声的传播路径和分布特性,该技术为后续采取针对性的噪声抑制措施提供重要的参考<sup>[2]</sup>。

## 3.4 故障树分析与诊断专家系统

故障树分析(FTA)是一种基于逻辑推理的可靠性分析方法,现下主要被应用于诊断分布式光伏逆变器辐射噪声问题。即建立以辐射噪声超标为顶事件的故障树,然后分析导致顶事件发生的各种可能的中间事件和底事件,如电力电子器件故障、电路参数异常、电磁干扰等,并且确定各个事件之间的逻辑关系。接着通过对故障树的定性和定量分析,就可以找出引发辐射噪声问题的关键因素和薄弱环节。同时结合诊断专家系统,也就是将专家的经验知识和故障诊断规则融入到系统之中,如此当逆变器出现辐射噪声异常时,系统就可以根据采集到的数据和故障树模型,快速地推理出可能的故障原因,还能给出相应的诊断结论和处理建议,此举直接提高了故障诊断的效率和准确性。

# 4 分布式光伏逆变器辐射噪声抑制方法

## 4.1 优化电路拓扑结构

如果相关人员能够采用合理的电路拓扑结构,在实践中就可以有效地降低分布式光伏逆变器的辐射噪声。如采用多电平逆变拓扑结构,该结构相比传统的两电平拓扑,能够减少输出电压的谐波含量,达到降低 $dv/dt$ 和 $di/dt$ 的效果,从而减小电磁辐射的强度。此外优化滤波电路设计,即增加合适的共模和差模滤波器,就能够有效地抑制噪声在电路中的传播。而共模滤波器可以抑制通过接地回路传播的共模噪声,差模滤波器则用于抑制电源线和信号线中的差模噪声。总之,通过调整滤波器的参数,如电感值、电容值等,使其在噪声频率范围内具有良好的滤波效果,即可减少噪声向外部环境的辐射。

## 4.2 改进屏蔽与接地技术

实践当中,良好的屏蔽和接地措施是抑制辐射噪声的重要手段之一。因为对逆变器的外壳进行屏蔽处理,即采用铝合金、不锈钢等导电性能良好的金属材料,就能形成一个封闭的屏蔽体,达到阻止内部电磁辐射泄漏到外部空间的效