

风电机组轴电流腐蚀风险 与源头治理解决方案

Bearing Current Corrosion Risk & Source-Level Mitigation

70%+

变频驱动电机轴承非机械失效占比

Source: IEC 60034-25 / Muetze 2004

5–15 V

轴电压击穿油膜阈值

EDM 放电触发点 / Bearing Voltage

3 个月

搓板纹失效可在 3 个月内发生

Pitting → Frosting → Fluting

本次汇报的主要内容

01

行业现状

高频变频驱动正在重塑风电可靠性边界

02

技术机理

轴电流是如何产生并破坏轴承的

03

经济损失

一次非计划停机意味着什么

04

权威佐证

IEC、IEEE、Siemens、ABB、SKF 的共识

05

传统方案局限

为什么碳刷、绝缘轴承、屏蔽电缆不够

06

PRADO 方案

从源头降低共模电流的最佳路径

07

工程案例

国电投、中广核、宝武、上海石化

08

实施建议

评估、试点、规模化部署

风电行业正面临一个被低估的可靠性挑战

变频器从“辅助设备”变成了“轴承杀手”

近 15 年，风电机组从直驱、双馈到半直驱大规模演进。无论何种拓扑，变流器都已成为系统标配，开关频率从 1 kHz 提升到 2-16 kHz，电压上升率 dv/dt 可达 数 $kV/\mu s$ 。

高频共模电压通过电机寄生电容耦合到转轴，在轴承上建立轴电压。当油膜被击穿，电火花放电（EDM）在轴承上烧蚀微坑，最终演变为搓板纹失效。

IEC 60034-25 明确指出：

“当电机功率超过 440 kW、由变频器供电时，应预期出现轴电流，并采取专门防护措施

。”

为什么风电首当其冲

大功率

单机功率持续提升至 6-15 MW，轴承尺寸大、寄生电容高

高 dv/dt

新一代 SiC / 高频 IGBT 模块， dv/dt 超过传统 5-10 倍

长寿命

设计寿命 20-25 年，远超普通工业电机使用周期

难维护

塔筒内空间狭小、海上风机维护窗口受天气限制

高停机损失

单台 5 MW 风机日发电收入约 2-4 万元

无论双馈还是半直驱，轴电流腐蚀都在普遍发生

双馈式 DFIG 机组

Doubly-Fed Induction Generator

≈ **65%** 国内陆上风电存量占比

主要风险点:

- 转子侧变流器 (RSC) 直接挂在转子绕组上，共模电压通过滑环、轴承耦合至转轴；
- 实测 发电机 DE/NDE 端、齿轮箱输出端轴承普遍出现 fluting；
- 1.5 / 2.0 / 2.5 MW 机型均有现场实证案例；
- 塔筒内变流器与机舱共地，回路阻抗低，电流路径明确。

半直驱 Semi-Direct 机组

Permanent-Magnet Semi-Direct Drive

≈ **40%+** 海上 & 大兆瓦机型主流方案

主要风险点:

- 全功率变流器 (FPC) 直接驱动发电机定子，共模电压暴露完全；
- 永磁同步发电机转子-轴耦合电容更大，BVR 通常 6-10%；
- 6 / 8 / 10 / 15 MW 海风机型主流配置，单台损失高；
- 齿轮箱（一级行星）与发电机轴承均处于电流通路上。

结论：两类机型均不能幸免；带变频器即有风险，差异只是“早发现 或 晚发现”。

PWM 共模电压 → 寄生电容 → 轴电压 → EDM 放电



四种典型轴电流形态 · Four Types of Bearing Currents

容性放电电流

*Capacitive
(EDM)*

C_b 油膜击穿瞬间放电
是 fluting 损伤的主因

环流型电流

Circulating

定子 → 机壳 → 轴承外圈 →
→ 转子 → 轴承环流

转子接地电流

Rotor-Ground

经由耦合下游设备
轴承入地

dv/dt 电流

dv/dt-induced

高频脉冲沿激发
短促电流尖峰

关键判据 $BVR = U_b / U_{CM} \approx 3 - 10 \%$

轴电流密度 $J_b > 0.1 \text{ A/mm}^2$ 即视为高风险, $> 1 \text{ A/mm}^2$ 必然导致 fluting

轴承一旦“电气性老化”，3个月内可演化为灾难性失效



典型时间窗 · Typical Time Window

从首次微凹坑到完全失效，**最快 3 个月、平均 12-24 个月**。其速率取决于：

- ① 共模电压幅值
- ② 开关频率
- ③ 轴电压幅值
- ④ 轴承负荷与温度
- ⑤ 润滑脂介电状态

一次轴承非计划停机意味着什么

A	材料成本 轴承、润滑脂、电刷反复更换	5-30 万元/次
B	工时成本 高空作业、吊装、塔筒拆装人月费用	10-25 万元/次
C	停产损失 5 MW 机组日发电收入 2-4 万元	30-120 万元/次
D	次生损失 齿轮箱受波及、绝缘老化、电控告警频发	难以量化

单次轴承失效 · 综合损失估算

50 - 175

万元人民币 · 每台 · 每次

若按 100 台机组、年化 5% 出险率：

年风险敞口 \approx **250 - 875 万元**

—— 这还不包括对齿轮箱、机舱设备的次生影响，以及业主对运维 SLA、可利用
率考核带来的隐性压力。

全球电机与变频器主要厂商和学术机构的一致共识

国际与行业标准 · International & Industry Standards

IEC 60034-25

变频器供电交流电机设计与运行：
>440 kW 普遍存在轴电流

IEC 60034-17

推荐使用具有共模分量抑制功能的
变频器、dv/dt 滤波或绝缘轴承

IEC TS 60034-27-2

轴电压与轴承电流的标准化
测量方法

NEMA MG-1 Part 31

美国变频供电电机标准；
轴电流防护必须配置

全球电机与变频器厂商共识 · Industry Players

SIEMENS

Sinamics 系列变频器
标配 dv/dt 与共模滤波选项

ABB

ACS 系列与 NDE 端绝缘轴
承
推荐组合方案

SKF

INSOCOAT 系列陶瓷涂层
+ 混合陶瓷轴承

Schaeffler

Insutect 绝缘轴承
FAG 创新奖授予 Muetze
教授

Yaskawa

三电平逆变器拓扑
降低共模电压阶跃

AEGIS

Bearing Protection
Handbook
行业事实参考手册

学术权威 · Annette Muetze 教授 (TU Graz)

全球公认的轴电流研究权威。其 2004 年博士论文《Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors》(TU Darmstadt) 至今仍是行业引用基础；曾获 FAG 创新奖、NSF Career Award、IEEE IAS 最佳论文奖、永守奖等顶级奖项。

您的同行已经开始系统性应对，部分项目进入规模化部署



现场实拍 · PRADO 共模滤波器在风机机舱内的安装

已经在做的事情 · Industry Actions

国电投

沽源风场、长清风场已批量加装共模滤波器；现场实测轴电流显著下降，振动数据回归正常区间。

中广核·瓜州

1.5 MW 双馈机型：共模电流 42 A → 19.6 A，降幅 53%，配合定期介电状态检测。

国内主机厂

整机厂家（金风、远景、明阳等）在新机型设计阶段开始增加 dv/dt 滤波器或共模磁环空间预留。

欧洲海上项目

DNV、ABS 等船级社开始要求大兆瓦海上机型出具轴电流评估报告。

第三方运维

运维公司开始在 PHM 系统中加入轴电压实时监测通道（5 V 阈值告警）。

为什么单纯的“碳刷 / 绝缘轴承 / 屏蔽电缆”不够

方案	原理	局限性	适用阶段
碳刷 / 轴接地环	为轴电流提供低阻抗旁路通道	碳刷磨损快 (6-12 个月) ; 高频下阻抗上升; 仅“引流”不“减流”	末端补救
绝缘轴承 / 陶瓷球	切断电流回路	成本高 3-8 倍; 只阻断不消除, 电流转移至下游齿轮箱轴承; NDE 单端加装效果有限	电机厂内置
屏蔽电缆 + 等电位	降低共模电流向系统外泄漏	改善 EMI 但对电机内部轴承电流影响有限; 现场施工复杂、成本上升	EMC 合规
dv/dt / sinus 滤波器	改善电压上升率或波形	改善了 dv/dt, 但共模分量仍然存在; 体积大、损耗高	驱动柜侧
PWM 调制策略优化	AZSPWM / RSPWM 降低共模电压	依赖变频器固件可改性; 多电平方案成本高; 对存量设备难以改造	新机型设计

本质问题：上述方案都是“先有电流、再去补救”，共模电流并未在源头被削减，损伤仍在持续发生。

共模滤波器：在源头削减共模电流，从根本上保护轴承

工作原理



共模滤波器由高磁导率纳米晶 / 铁基非晶磁芯构成，三相动力电缆作为一次匝穿过磁芯。在差模电流方向磁通相互抵消、对正常工作无任何影响；而在共模方向上磁通叠加，在 MHz 频段呈现极高阻抗，将共模电流在源头削减 50-80%。

≥ 50%

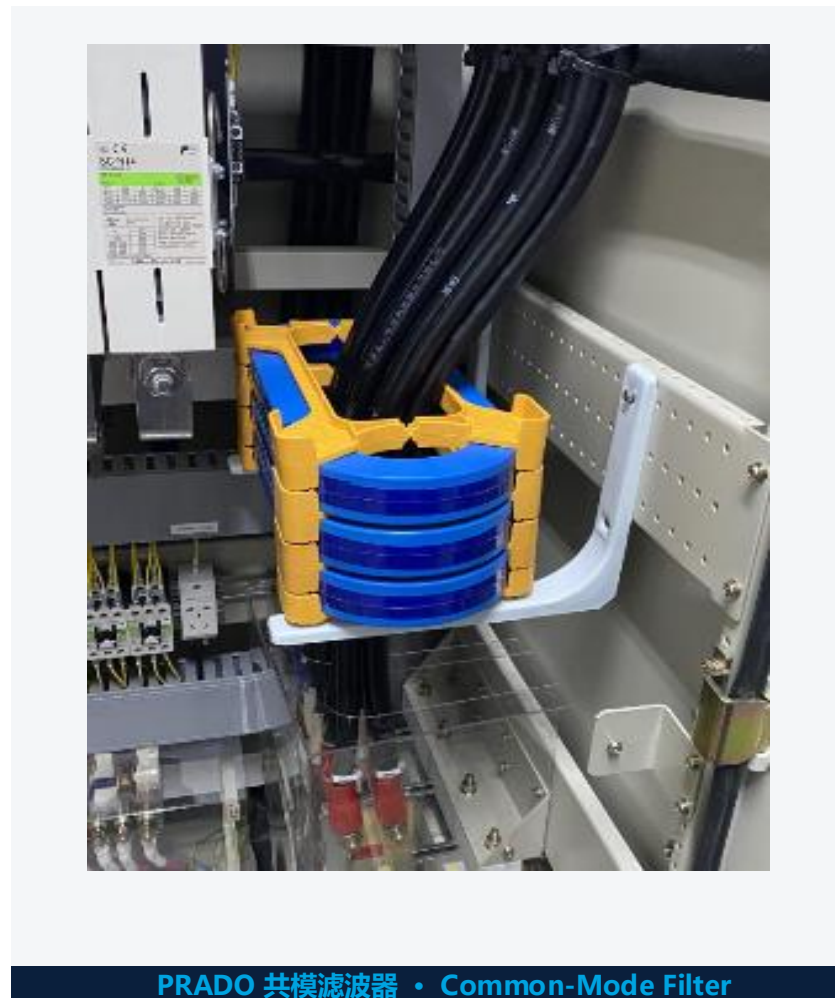
共模电流削减

MHz

高频阻抗有效

0

增加机械故障点



PRADO 共模滤波器 · Common-Mode Filter

“源头治理” 相比 “末端补救” 的根本优势

传统末端补救 · Reactive Mitigation

电流通路	已经形成 → 引流或隔离
电流幅值	几乎不变，只是路径不同
下游受影响	齿轮箱、外接设备轴承仍承压
EMI / 谐振	高频 EMI 仍然存在
维护周期	碳刷 6-12 个月更换
综合成本	多种部件叠加，备件复杂

PRADO 源头治理 · Source-Level Filtering

电流通路	在变频器侧抑制 → 不再传导
电流幅值	削减 50-80% (已有实测)
下游受影响	齿轮箱、电缆、传感器一并受益
EMI / 谐振	高频 EMI 同步降低，跳闸减少
维护周期	免维护、寿命 ≥ 风机寿命周期
综合成本	单一组件、安装简单、ROI 显著

源头治理是唯一同时保护“发电机轴承 + 齿轮箱 + 电缆 + EMC”的方案。

PRADO 共模滤波器的七大核心优势

01

源头降流

在变频器侧削减共模电流 50-80%，从根本上消除轴电流形成条件。

02

宽频有效

在 100 kHz - 30 MHz 频段呈高阻抗，对 SiC/IGBT 高频系统同样有效。

03

安装简便

三相电缆穿心式安装，无需断开主回路，停机窗口仅需数小时。

04

免维护

纯无源器件，无电刷、无机械磨损，寿命与风机生命周期匹配。

05

兼容性强

与轴接地环、绝缘轴承等可叠加使用，构成多重防护体系。

06

节能附加

实测案例中变流器输出有功提升、电机温升下降，节能 5-10%。

07

经济性高

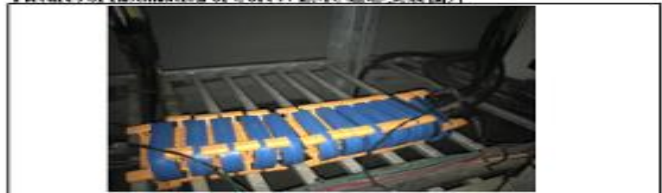
单台投入显著低于单次轴承失效损失，1 年内回收。

国电投 · 沽源风场 / 长清风场

S/N	MODEL	Position	QTY	Unit
1	10010302		10	Pcs
2	10010986		2	Pcs

Totally 12 Pcs

Pictures of Installation of Cores / EMC磁芯安装图片



S/N	MODEL	Position	QTY	Unit
1	10010302		8	Pcs
2	10010986		4	Pcs

Totally 12 Pcs

Pictures of Installation of Cores / EMC磁芯安装图片



现场加装共模滤波器测温记录

项目概况 · Project Overview

业主 国家电力投资集团

风场 沽源风场、长清风场

问题 发电机轴承 EDM 腐蚀，振动告警频发

方案 传动链关键节点加装共模滤波器

范围 多台机组示范应用 → 推广

结果

加装共模滤波器后轴电流显著下降，
轴承温度、振动回到正常区间；
现场已纳入运维标配。

关键指标变化

轴承温度 Bearing T

高位告警 → 回归正常

振动 RMS Vibration

≈ 40% 下降

运维干预

5年内 0 次轴承更换

—— 国内首批将共模滤波器纳入风电场标配的项目之一。

中广核 · 瓜州风场 1.5 MW 双馈机型

实测结果 · Measured On Site

改造前 共模电流 (峰值)

改造后 共模电流 (峰值)

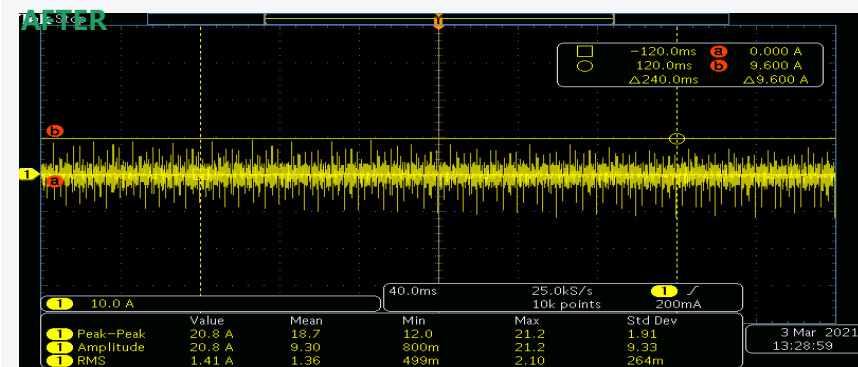
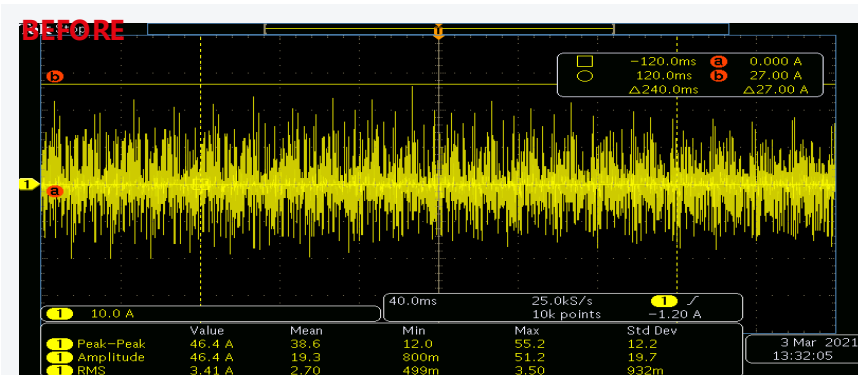
42_A → 19.6_A

降幅

53%

- 现场用罗氏线圈实测：共模电流峰-峰值从 46.4 A 降至 22.7 A；
- RMS 值同步下降，高频谐波成分明显减弱；
- 电机轴承温度告警次数由月均 3-5 次降为 0；
- 本案例已纳入 PRADO 风电行业标准案例库。

示波器实测波形对比



同一方案，在更严苛工况下已经验证有效

石化

上海石化·碳纤维项目

80%

监控继电器跳闸；共模电流 51.2 A → 10.2 A

石化

上海石化·延迟焦化

79%

160 kW 变频器；共模电流 20.4 A → 4.3 A

钢铁

宝武集团·高线项目

多方案效果验证，共模滤波器综合表现最佳

石油工程

炼油 75 kW 变流器

7%

电机工况一致，节能 7% (45.5 / 49 kW)

空压机

400 kW 空压机项目

71%

共模电流降幅 71%，电机温升下降 10 °C

港口

上海洋山港·岸桥项目

54%

共模电流 60 A → 27.6 A，EMC 跳闸消除

横向能力佐证 · Across Industries

石化、钢铁、港口、空压机、炼油等高干扰、长周期、严工况场景下，PRADO 共模滤波器均实现 50%+ 的共模电流削减；风电机组的工况复杂度处于这些行业的同一量级，方案完全可迁移。

从现状评估到规模化部署 · 4 步路线图

1 现状评估 1-2 周

选取 1-3 台代表性机组，实测共模电压 / 电流 / 轴电压 / 轴承温度；建立基线数据。

2 试点部署 2-4 周

在评估出风险等级最高的机型上加装 PRADO 共模滤波器；对比改造前后 4-8 周运行数据。

3 数据验证 1-3 个月

结合 SCADA、CMS 振动监测、油液分析、红外测温多源数据，定量验证轴承健康度提升。

4 规模推广 6-12 个月

纳入风场技改与新建机组采购规范；与轴接地环 / 绝缘轴承形成多重防护；搭建可视化保护体系。

快速启动建议： 我方提供首批 1-3 台机组的免费现场实测与方案评估，客户仅需配合提供机组登塔与停机窗口。

投入 vs. 风险敞口 · 典型 100 台风场测算

场景 · 100 台 1.5–6 MW 机组风场

年化轴承故障率 (行业均值)	3% – 8%
单次故障综合损失 (含停机)	50 – 175 万元
不治理 · 年化风险敞口	150 – 1,400 万元
PRADO 方案总投入 (100 台)	约 100 – 200 万元
投资回收周期	通常 < 12 个月
剩余生命周期净收益	≥ 数千万元 (25 年寿命)

保守 ROI 估算 · Return on Investment

10 × +

首年净收益 / 总投入

并叠加以下隐性收益:

- 降低齿轮箱、绝缘、传感器次生失效
- 可利用率 ↑、SLA 合同性能提升
- 运维人力与高空作业风险下降
- 对碳排、绿电认证有正向作用

下一步行动 · Next Steps

在风险演变为成本之前， 先从源头治理。

建议立即推进的三项工作

01 现场实测

选定 1-3 台代表性机组，PRADO 工程师 1 周内到场，出具评估报告。

02 示范改造

完成 5-10 台试点改造，建立完整的对比数据集，形成可复制方案。

03 纳入标准

评估纳入风场技改与新机型采购规范，构建长期保护体系。