

# 风力发电机组受共模电流的影响分析

王晓峰<sup>✉</sup>

(广州综合能源有限公司, 广东 广州 510623)

**摘要:** [目的]为解决共模干扰电流对风机设备造成的伤害与破坏,避免风力发电机组长期带病运行和伤害风电机组大部件,从而导致风场风电机组可利用率下降、弃风现象产生和发电量损失。[方法]文章通过阐述我国南方某风电场风电机组存在的共模电流干扰信号现象,现场机组设备损坏,误动作信号故障,故障引起的风力发电机组电流输出电缆过热、变压器过热,设备误动作保护以及发电机组振动异常等现象,以风场#11风机为检测点,进行实地机位实验检测,结合现场测量数据和图片,对问题进行系统理论分析。[结果]确认由于该发电变频系统产生的共模干扰电流的存在,引发了风力发电机组电流输出电缆过热、变压器过热、保护设备的误动作、发电机组振动异常等一系列问题。由于该风场项目为已投产多年的在线发电项目,设备及电缆布置均已就位固定,难以改动或拆卸,为了不影响机组正常运行发电,在不影响原有线路现状的前提下,采用在发电机组发电母线上加装抗干扰线圈CoolBLUE®系列的解决方案。[结论]实践表明:此改善方案有效可行,为以后出现此类故障预防与改善提供建议和思路,避免风机再次发生同类故障,增加风电发电机组的可利用率,并可以推广应用。

**关键词:** 共模电流; 电缆过热; 变压器过热; 抗干扰线圈 CoolBLUE; 故障

中图分类号: TK89; TP207

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0158-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Analysis of the Influence of Common Mode Current on Wind Turbine

WANG Xiaofeng<sup>✉</sup>

(Guangzhou Comprehensive Energy Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The objective is to solve the injury and destruction of the wind turbine equipment caused by the common mode interference current and avoid the long-term operation of the wind turbine with faults and the damage to the large components of the wind turbine, which will lead to the decrease of the availability of wind turbines, wind abandonment phenomenon and loss of power generation. [Method] The article elaborated on the interference signal phenomenon from common mode current, on-site equipment damage, misoperation signal fault, overheating of the current output cable and transformer of the wind turbine caused by faults, equipment misoperation protection, abnormal vibration of the generator set, and other phenomena of a wind turbine in a certain wind farm in southern China. Taking the # 11 wind turbine in the wind farm as the detection point, on-site machine position experiment detection was conducted, and a systematic theoretical analysis of the problem was conducted combined with on-site measurement data and pictures. [Result] The existence of common mode interference current generated by the conversion system is confirmed, which causes a series of problems such as overheating of current output cable, overheating of transformer, misoperation of protective equipment and abnormal vibration of generator set. As the wind farm project is an online power generation project that has been put into operation for many years, the equipment and cable layout have been in place and fixed, which is difficult to change or disassemble. In order to avoid affecting the normal operation of the generator set, the solution of installing anti-interference coil CoolBLUE® series on the generating busbar of the generator set is adopted without affecting the current situation of the original line. [Conclusion] The practice shows that this improvement scheme is effective and feasible, it can provide suggestions and ideas for the prevention and improvement of such faults in the future, avoid the similar faults of the wind turbine again, increase the availability of wind power generator sets, and it can be popularized and applied.

**Key words:** common mode current; cable overheating; transformer overheating; anti-interference coil CoolBLUE; fault

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

我国规划 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和, 政策陆续出台明确碳达峰碳中和目标及工作路线<sup>[1]</sup>。大力推进新能源发展, 适应不断变化的能源供需格局和能源改革趋势<sup>[2]</sup>, 向提高能源利用效率, 减少碳排放, 满足各方能源需求的方向努力<sup>[3]</sup>。风力发电能源这种可再生清洁能源有着广阔的发展前景<sup>[4]</sup>, 随着风电单机容量不断提高, 对风力发电机组主要部件的可靠性和安全性有了更高的要求<sup>[5]</sup>。我国南方沿海海岛上某风力发电场处在海岛山尖上, 全场由 22 台机组型号为明阳 MY1.5s-77/65 双馈异步滑环陆上发电机组成, 发电机定子直接与电网连接, 转子功率通过逆变器输入到电网。通讯光纤网络和电线电缆沿山脉敷设, 此机型主要零部件结构图如图 1 所示<sup>[6]</sup>。此风场全场风机到 2014 年初陆续完成正常网发电的, 而文中描述的试验机组#11 风机于 2013 年 12 月 27 日通过试运行, 正常投入运行并网发电, 截止 2020 年 11 月份对#11 机组进行抽检测试时此风机运行约满 7 a。风力发电机组主设备安全问题一直以来都是风力发电技术的重要研究对象<sup>[7]</sup>。本文对一起风力发电机组发生共模电流信号干扰破坏进行了原因分析<sup>[8]</sup>, 提出了改善方案, 为以后减少此类故障提供解决方法和思路<sup>[9-10]</sup>。

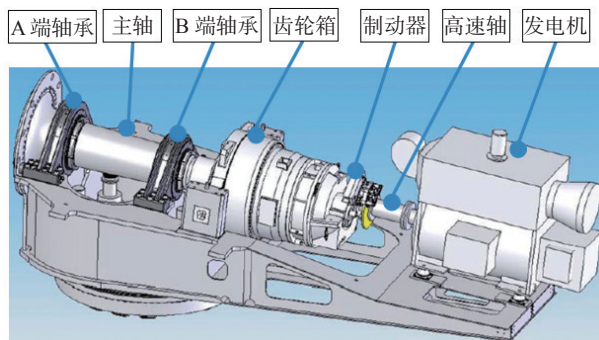


图 1 明阳 MY1.5s-77/65 风机主要部件结构图

Fig. 1 Main component structure diagram of mingyang MY1.5s-77/65 wind turbine

## 1 现存问题

本风电场由 22 台风机组组成, 此风机主要部件厂

家/型号具体如表 1 所示, 通过历史运行数据和现场实测发现此风电场发电机组存在高共模电流破坏设备问题<sup>[11-12]</sup>。根据以往经验, 若系统长期运行可能导致以下问题, 如输电电缆过热、用电转换变压器过热、保护检测设备的误动作/误报警及风电发电机组电机振动异常等。“高共模电流”是电力行业设备中存在的一种共性问题, 只是干扰电流破坏设备的程度大与小的问题。

表 1 风机主要部件厂家/型号

Tab. 1 Manufacturers/models of main component of wind turbine

名称	厂家/型号
装机容量/MW	330
机组型号	MY1.5s-77/65
风机整机厂家	明阳
叶片	明阳
变桨系统	OAT
主轴	江阴振宏/平湖中州/江阴南工
齿轮箱	南高齿/FD1160E-01-00R13
发电机	南汽轮/DASAA 5023-4UFB
变频器	艾默生/MYFvert-SH 1.5/A
主控系统	倍福
液压站	敏泰11FD004

## 2 基于现存问题描述的初步分析

### 2.1 线缆过热

高频共模电流通过发电线路缆时, 产生了“集肤效应”现象, 流过电缆表面的无序、不规则的电流趋向于导电体的表面, 并不是均匀分布在导电体内芯<sup>[13-14]</sup>。若此电流频率越高, 这种电流信号趋向于导体表层分布的现象越显著, 而电流密度沿导体截面分布又不均匀, 导致导体的有效截面积减少, 电阻值增大<sup>[15]</sup>, 产生过热, 又长时间通流下, 从而导致线缆容易老化, 绝缘层损坏, 造成线缆绝缘等级不合格, 会引起不可估量的事故损失<sup>[16]</sup>。

### 2.2 变压器过热

高变压器发热主要由两方面导致: 绕组铜损和

变压器磁芯的铁损<sup>[17]</sup>。

1) 铜损: 由 2.1 的分析可知, 当高频电流流过变压器绕组时, 绕组发热加剧, 会导致变压器铜绕组绝缘层老化, 绝缘层损坏, 造成变压器绝缘等级不合格, 会引起事故故障。

2) 铁损: 当变压器中存在高频电流, 磁芯产生涡流损耗, 导致变压器发热增加, 同样导致变压器铁磁芯绝缘层老化, 绝缘层损坏, 造成变压器绝缘等级不合格等, 也会引起事故故障。

综上所述, 若变压系统长期存在高频共模电流, 则会导致变压器寿命缩短, 降低变压器的有效容量, 同时存在事故隐患。

### 2.3 保护设备的误动作/误报警

为保证风机机组发电系统正常工作, 变频器设有监控及保护模块<sup>[18]</sup>。而变频器在变频过程中产生的高频干扰电流(共模电流)在传输过程中, 若耦合到监控或者保护线路中, 则会导致系统报警或误动作。

### 2.4 电机异常震动

发电机异常震动可能由高共模电流导致的局部熔化和波列纹理所引起。

1) 局部熔化: 轴承局部熔化来源于电火花放电。风力发电机轴承滚动运转时, 其滚动体与滚道之间存在感应电动势, 而且产生了电势差, 随着电动势的电势积累, 电势差将自动寻找释放能量空间位置, 当这电势差超过轴承表面润滑油膜固有击穿电压时候, 产生放电现象, 并对轴承表面产生了电洛现象如图 2 所示。由于放电效应的增强, 并且电动势无法通过

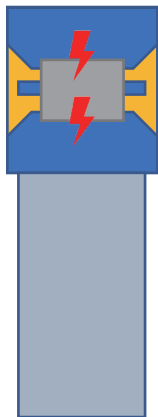


图 2 电火花形成机理

Fig. 2 Formation of electric spark

金属导体有效的释放, 必将以火花的形式对轴承放电如图 3 所示。由于雪崩效应原理, 当弧电压下降时候, 弧电流并未能够有效消失或减少, 依然不断的增加, 不断形成了 1 个负阻抗特性。当轴承周围局部电场电流强度逐渐减小时候放电将停止, 而储藏在电容里的残余电能量也会慢慢被消耗掉, 这就是常见的“放电加工”效应<sup>[19]</sup>。

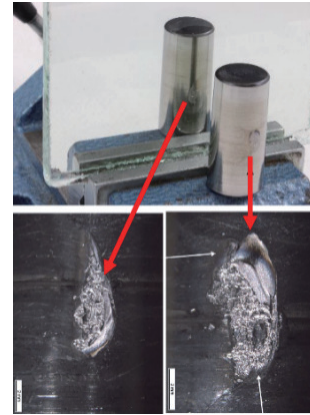


图 3 电火花熔融痕迹

Fig. 3 Spark melting trace

润滑油膜的击穿电压与击穿电场电流强度、设备局部状态有着密切关联。该“放电加工”现象是 1 个局部的无规则可循的短期现象, 风力发电机的长期运行, 轴承一直处于运转状态, 必将频繁发生放电现象, 而且这种放电现象与轴承大小、形状、钢强度无关, 重点是取决于局部电场的大小以及集聚电能量传输条件。轴承在静电放电(EDM)的作用下, 总能量的转换有一部分(EEDM)会以放电形式消耗掉或被转化为热量<sup>[20]</sup>。一般情况下单个能量 EEDM 释放的时间持续 30 ns 左右, 而这种能量释放是导致滚动体和滚道表面层润滑剂退化及局部熔融的基本原因, 从而导致轴承整体结构的物理损坏, 例如轴承保持架散架。

2) 波列纹理: 造成波列纹理的原因是通过轴承的持续过电流, 导致各部件温度升高并使润滑脂加速劣化。过电流的频率会造成滚道上会出现规则的波浪纹理, 导致滚道出现疲劳, 表面失去硬度, 润滑剂退化, 滚动体损坏, 如图 4 和图 5 所示, 最终造成轴承失效。

根据以上 2 个现象可以确认, 高共模电流导致的局部熔化和波列纹理可能导致电机异常震动, 会

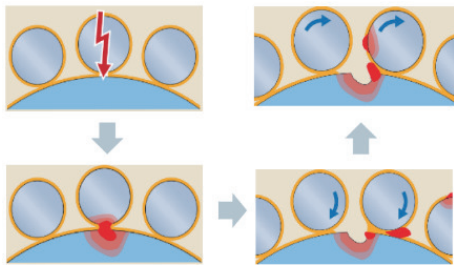


图 4 电腐蚀形成机理

Fig. 4 Electrocorrosion formation mechanism



图 5 电腐蚀熔融痕迹(非现场图片)

Fig. 5 Electrocorrosion melting trace (off-site picture)



图 6 轴承滚子电火花熔融痕迹

Fig. 6 Bearing roller spark melting trace



图 7 轴承保持架断裂碎片

Fig. 7 Fracture of bearing cage

让轴承保持架断裂,从而会破坏主机轴承的使用寿命,如图 6 和图 7 所示。

### 3 现场测量情况

1)测试示意图如图 8 所示。

2)于 2020 年 11 月,对现场机位地势比较高、具有代表性的#11 机组进行抽检测试,结果如表 2 所示。

3)现场仪器测量截图如图 9 所示。

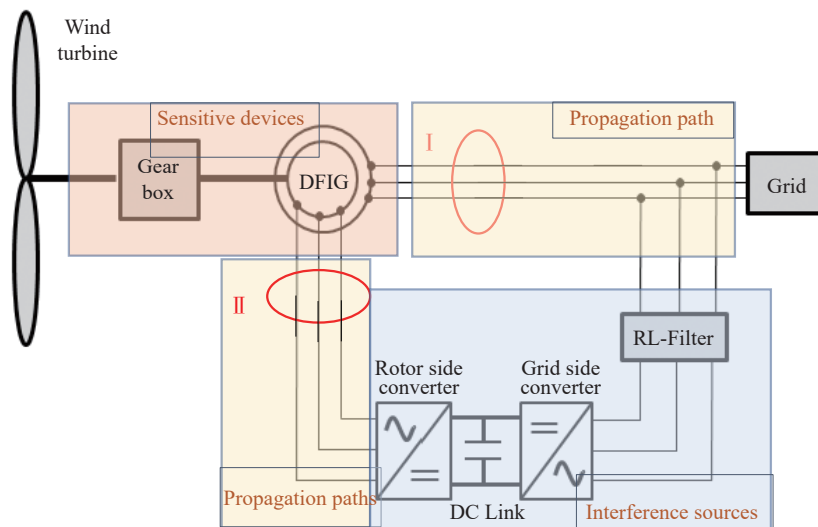


图 8 发电机组电路示意图

Fig. 8 Circuit diagram of generator set

表 2 #11 风机测量结果

Tab. 2 Measurement result of #11 wind turbine

设备	测试点	共模电流 $I_{peak}/A$	分析
#11 风机(4.3 m/s)	I	10.404	基于测量结果,系统中存在较大的共模电流,且共模电流随着风速的增加(功率增加)而增大。若风速达到10 m/s或以上,预计定子的控制系统中共模电流超过20 A,而控制转子的系统共模电流则超过30 A。长期运行较大概率出现以下问题: (1)电缆过热;(2)变压器过热;(3)保护设备的误动作/误报警;(4)发电机异常振动。
#11 风机(5.3 m/s)	I	12.024	
#11 风机(4.3 m/s)	II	16.624	
#11 风机(5.3 m/s)	II	19.180	

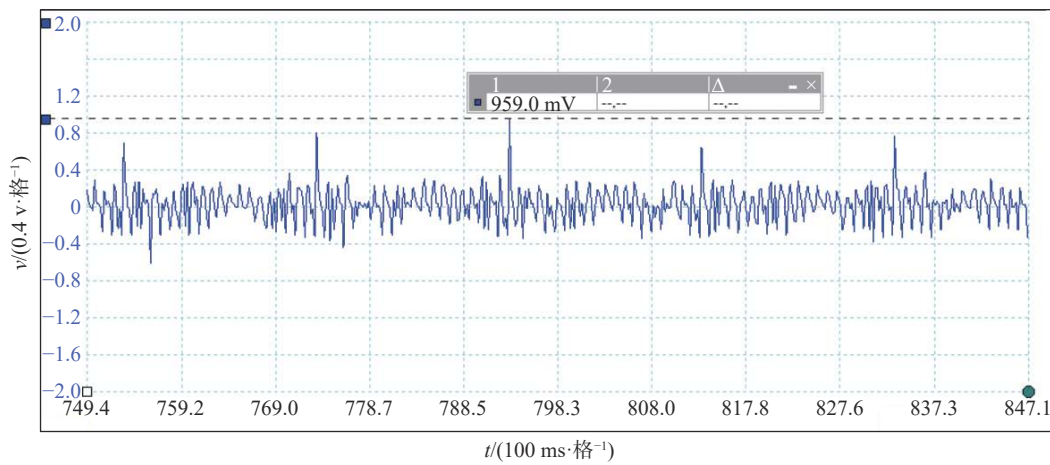


图 9 实测波形图

Fig. 9 Measured waveform diagram

#### 4 技改方案

1) 经过现场测量,确认由该变频系统产生的共模干扰电流过大,该问题可导致电缆过热、变压器过热、保护设备的误动作/误报警、电机异常震动问题。

2) 由于该项目为已投产项目,设备及电缆布置均已固定,难以改动,因此,建议采用在母线上加装抗干扰线圈 CoolBLUE®系列的解决方案<sup>[21]</sup>。该方案的优点在于:

(1) 无需改变原有设备及线路,不需接入系统,对系统可靠性无任何影响。

(2) 利用材料高频阻抗特性将高频干扰在源头转化为热量,对工作电流无影响,不会造成其他处的杂散电流。

(3) 本技术改造可免维护维修,并可长期有效使用。

3) 本次安装,应将 CoolBlue®安装在变频器出口,电缆无屏蔽层处。将三相电缆穿过 CoolBlue®,接地线不可穿过 CoolBlue®。安装示意图如图 10 所示。

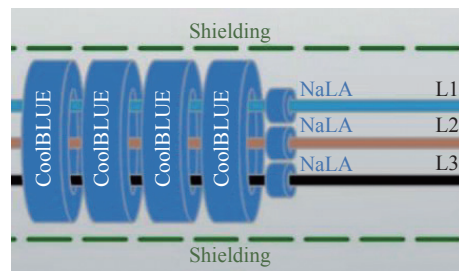


图 10 现场安装示意图

Fig. 10 Site installation diagram

#### 5 “CoolBlue®”装置能扼制高共模电流的原理

风力发电设备发生高共模电流时产生的磁通量大小和方向均相同,两者相互叠加,使“CoolBlue®”装置产生较大的共模阻抗,因此共模电感对共模干扰信号具有很好的滤除作用,而差模电流通过“CoolBlue®”共模线圈时磁力线方向相反,感应磁场削弱,共模电流通过共模线圈,磁力线方向相同,感应磁场加强。对于共模电感,当共模电流流过线圈时,由于磁力线方向相同,在不考虑漏感的情况下

磁通量叠加,当磁通量翻倍时匝数和电流均没有发生变化,意味着电感量增加为原来的2倍,所以在互感模式下等效电感量与共模感抗均成倍增加,因而对共模信号有良好的滤除的作用,即将共模信号用大阻抗阻挡,不使其通过共模电感,也就是不让此信号传输到电路的下一级,从而起到遏止和解决高共模电流的作用。

## 6 改善效果

通过本次采用在试验机组#11 风机母线上加装

抗干扰线圈 CoolBlue®系列的解决方案后现场测试结果如表3和图11所示。

由此可见,在#11 风机母线上加装抗干扰线圈 CoolBlue®系列前的实测波形图扰动频繁,干扰电压最高值为 959.0 mv(如图9所示),而加装抗干扰线圈后实测波形图扰动稀少,干扰电压低至 520.2 mv(如图11所示),风机主轴温度和 Y轴振动值也都在正常范围内,因此,本次测试整改安装前后效果对比明显可见。

表3 #11 风机整改后测量结果

Tab. 3 Measurement result after rectification of #11 wind turbine

风机/时间	主轴轴承B温度/°C	次数/次	最高温度/°C	占比/%	Y向振动实时值/mm	次数/次	最大值/mm
#11风机 11月21日~12月21日	<40	5 108	39	100.0	<0.8	4 936	—
	≤40<50	0	—	0.0	<0.8<1	139	—
	≤50<60	0	—	0.0	<1<1.2	29	—
	≤60<65	0	—	0.0	>1.2	4	1.53
	≥65	0	—	0.0	—	—	—

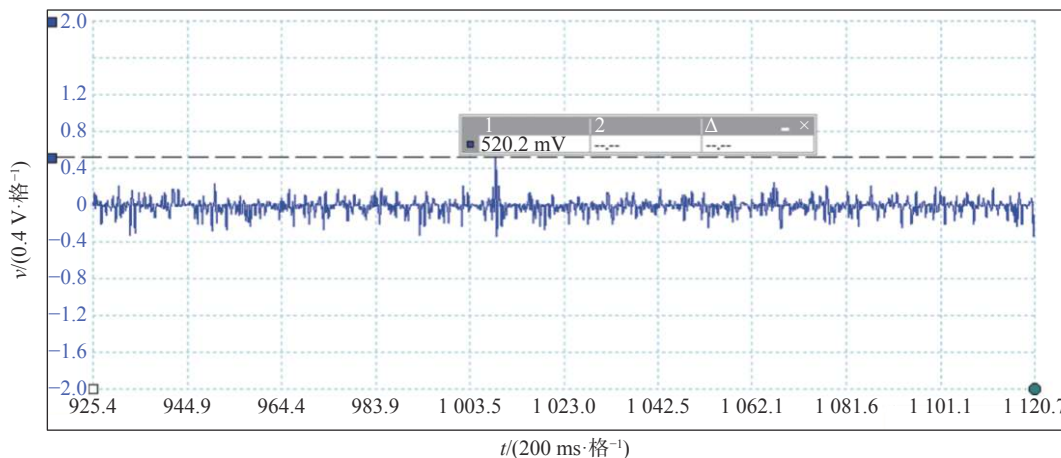


图11 安装“CoolBlue®”后实测波形图

Fig. 11 Measured waveform after installation of "CoolBlue®"

## 7 结论

随着风力发电技术的大力发展,新能源发电领域的电量需求不断提升。本文通过对一起风电机组发电系统中存在高共模电流,从而引起的一系列问题进行系统分析,现场检测,找出了根本原因,并提出改善方案和实践验证,技术整改后效果明显。为日后类似故障提供参考思路与解决方法,并可避免类似故障重复出现,提高风力发电机组的安全性,极

大降低设备机器损耗与运维人员的工作量,提高了风场发电效益。该设备对风力发电机组起到一定的抗干扰作用,可以推广到其他陆上风电机组和海上风电项目使用,目前还没有其他风力发电场的应用场景及业绩,值得推广应用。

### 参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-

- 8676.2021.03.002.
- CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002).
- [2] 李汪繁, 吴何来. 双碳目标下我国碳市场发展分析及建议 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015).
- LI W F, WU H L. Analysis and suggestions for the development of carbon emissions trading markets in China under carbon peak and neutrality goals [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015).
- [3] 李俊超. 风电场风机主轴轴承保持架失效原因分析 [J]. *设备管理与维修*, 2021(9): 48-50. DOI: [10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2021.05.21](https://doi.org/10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2021.05.21).
- LI J C. Failure cause analysis of main shaft bearing cage of wind farm fan [J]. *Plant maintenance engineering*, 2021(9): 48-50. DOI: [10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2021.05.21](https://doi.org/10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2021.05.21).
- [4] 李剑. 我国风能发电发展前景研究 [J]. *中国设备工程*, 2019(14): 184-185. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2019.14.110](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2019.14.110).
- LI J. Our country wind power development prospect research [J]. *China plant engineering*, 2019(14): 184-185. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2019.14.110](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2019.14.110).
- [5] 任仰成, 郭建军. 引风机前后烟道气流扰动问题研究 [J]. *山西电力*, 2020(3): 62-66. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9904.2019.11.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9904.2019.11.015).
- REN Y C, GUO J J. Study of the airflow disturbance problem of the front and back flues of the induced draft fan [J]. *Shanxi electric power*, 2020(3): 62-66. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9904.2019.11.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9904.2019.11.015).
- [6] 崔慧茹, 王浩, 赵彦博, 等. 明阳MY1.5Se型风机SCADA监控系统能量平台机组负荷控制分析 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2017(12): 95-96. DOI: [10.3969/j.issn.1007-6921.2017.12.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-6921.2017.12.046).
- CUI H R, WANG H, ZHAO Y B, et al. Load control analysis of energy platform unit of mingyang MY1.5Se fan SCADA monitoring system [J]. *Inner Mongolia science technology and economy*, 2017(12): 95-96. DOI: [10.3969/j.issn.1007-6921.2017.12.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-6921.2017.12.046).
- [7] 秦永军. 新能源风力发电技术及其发展趋势分析 [J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(19): 162-165. DOI: [10.19981/j.cn23-1581/G3.2022.19.038](https://doi.org/10.19981/j.cn23-1581/G3.2022.19.038).
- QIN Y J. New energy wind power generation technology and its development trend analysis [J]. *Technology innovation and application*, 2022, 12(19): 162-165. DOI: [10.19981/j.cn23-1581/G3.2022.19.038](https://doi.org/10.19981/j.cn23-1581/G3.2022.19.038).
- [8] 许林冲, 徐君, 刘威. 共模干扰的建模分析及处理方法 [J]. *电力电子技术*, 2022, 56(11): 33-36,44. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2022.11.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2022.11.010).
- XU L C, XU J, LIU W. Modeling analysis and processing method of common mode interference [J]. *Power electronics*, 2022, 56(11): 33-36,44. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2022.11.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2022.11.010).
- [9] 章勇高, 柴成凯, 刘鹏. 基于驱动信号自调整的磁铁电源共模抑制 [J]. *电力电子技术*, 2021, 55(10): 121-124. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2021.10.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2021.10.031).
- ZHANG Y G, CHAI C K, LIU P. Magnet power supply with common-mode rejection based on automatic calibration of drive pulse [J]. *Power electronics*, 2021, 55(10): 121-124. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2021.10.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2021.10.031).
- [10] 范高, 李力超. 用于LLC谐振变换器的低共模噪声混叠变压器 [J]. *电子技术*, 2021, 50(9): 6-9.
- FAN G, LI L C. Study on low common mode noise aliasing transformer for LLC resonant converter [J]. *Electronic technology*, 2021, 50(9): 6-9.
- [11] 张三锋. 低功耗生物信号采集前端研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022: 128. DOI: [10.27005/d.cnki.gdzu.2021.000005](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzu.2021.000005).
- ZHANG S F. Circuit design techniques for integrated bio-signal acquisition front-ends [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022: 128. DOI: [10.27005/d.cnki.gdzu.2021.000005](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzu.2021.000005).
- [12] 郑煜铭, 漆一宏, 黎福海, 等. 共模电流对多探头天线测量系统影响的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 140-150. DOI: [10.19650/j.cnki.cjsi.J2006758](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2006758).
- ZHENG Y M, QI Y H, LI F H, et al. Research on common mode current aspect of multi-probe antenna measurement system [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2020, 41(9): 140-150. DOI: [10.19650/j.cnki.cjsi.J2006758](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2006758).
- [13] 黄建文, 于淼. 探讨10 kV电缆故障分析及运行维护技术 [J]. *电子测试*, 2021(18): 98-100. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8519.2021.18.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8519.2021.18.036).
- HUANG J W, YU M. Discussion on 10 kV cable fault analysis and operation and maintenance technology [J]. *Electronic test*, 2021(18): 98-100. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8519.2021.18.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8519.2021.18.036).
- [14] 朱亮, 苏娟, 马振祺, 等. 10 kV电缆中间接头故障解体分析 [J]. *电工技术*, 2021(23): 96-97. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.031](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.031).
- ZHU L, SU J, MA Z Q, et al. Disassembly analysis of a 10 kV cable intermediate joint fault [J]. *Electric engineering*, 2021(23):

- 96-97. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.031](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.031).
- [15] 王兆新, 任建华, 姚传慧, 等. 硫酸铜浓度及电流密度的变化对游离微珠辅助磨电铸铜的影响 [J]. *表面技术*, 2023, 52(1): 401-409,420. DOI: [10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.041](https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.041).  
WANG Z X, REN J H, YAO C H, et al. Effects of copper sulfate concentration and current density on free microbeads assisted grinding electroformed copper [J]. *Surface technology*, 2023, 52(1): 401-409,420. DOI: [10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.041](https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.041).
- [16] 陈炜. 高温超导线缆局部特性对交流损耗的影响研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 163. DOI: [10.27414/d.cnki.gxnju.2021.000031](https://doi.org/10.27414/d.cnki.gxnju.2021.000031).  
CHEN W. Influence of local characteristics of high-temperature superconducting tape or wire and cable on AC loss [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 163. DOI: [10.27414/d.cnki.gxnju.2021.000031](https://doi.org/10.27414/d.cnki.gxnju.2021.000031).
- [17] 唐永胜. 电力电缆的运行维护管理研究 [J]. *科技风*, 2012(21): 72-73. DOI: [10.19392/j.cnki.1671-7341.2012.21.057](https://doi.org/10.19392/j.cnki.1671-7341.2012.21.057).  
TANG Y S. Research on operation and maintenance management of power cable [J]. *Technology wind*, 2012(21): 72-73. DOI: [10.19392/j.cnki.1671-7341.2012.21.057](https://doi.org/10.19392/j.cnki.1671-7341.2012.21.057).
- [18] 房伟, 常缝源. 电力电缆的运行维护及管理探讨 [J]. *通讯世界*, 2017(7): 113-114. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4222.2017.07.087](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2017.07.087).  
FANG W, CHANG F Y. Discussion on operation maintenance and management of power cable [J]. *Telecom world*, 2017(7): 113-114. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4222.2017.07.087](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2017.07.087).
- [19] 陈建光. 电力电缆施工中的常见问题及防范措施分析 [J]. *中国高新技术企业*, 2016(2): 116-117. DOI: [10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.02.056](https://doi.org/10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.02.056).  
CHEN J G. Analysis of common problems and preventive measures in power cable construction [J]. *China high-tech enterprises*, 2016(2): 116-117. DOI: [10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.02.056](https://doi.org/10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.02.056).
- [20] 蔡绍宽. 新型电力系统下的储能解决方案探讨 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(增刊1): 17-23. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003).  
CAI S K. Discussion on energy storage solutions under the new power system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl. 1): 17-23. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003).
- [21] 黄华, 谢静媛, 汪正玲, 等. 基于时频分析法的开关柜避雷器泄漏电流检测 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 150-158. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.019).  
HUANG H, XIE J Y, WANG Z L, et al. Leakage current detection for surge arrester in switchgear based on time-frequency analysis method [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 150-158. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.019).

## 作者简介:



王晓峰

王晓峰(通信作者)

1980-, 男, 工程师, 中山大学本科, 主要从事电力生产管理、清洁能源运维技术和综合能源智慧控制系统技术研究工作 (e-mail) 295435380@qq.com.

(编辑 孙舒)

## 广 告

- “海上风电技术专刊”封面图片-----封一
- 南方能源建设订阅号彩图-----封二
- “海上风电技术专刊”特约主编寄语-----A1
- “海上风电技术专刊”封面故事-----A2
- 广东能源集团阳江青洲一、二海上风电场项目风机基础-----A3
- 广东能源集团阳江青洲一、二海上风电场项目升压站吊装-----封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司-----封底