

BECKHOFF

PCcontrol

The New Automation Technology Magazine

2022 风力发电应用案例合集

www.pc-control.net

基于 PC 的风力发电机组控制 解决方案



编者的话

- 4 | Nils Johannsen: 风力发电 — 装机容量增幅创新高与技术创新共振

产品



- 6 | TwinCAT 3 Wind Framework 应用于风力发电机组控制
- 16 | 应用于风电场的实时网络监控，响应时间小于 1 ms

全球应用

- 20 | Pulse, 英国: EtherCAT 测量端子模块在风电场监测中的应用
- 24 | cms@wind, 德国: 可再生能源 — 无缝集成的精密测量和控制技术提供移动式早期故障检测



- 26 | IEH at KIT, 德国: 可再生能源 — 面向未来电网的电网友好型控制方法



- 28 | Leine & Linde, 德国: 数字应变测量 — 状态监测直接集成到控制技术中 (人物专访)

风力发电行业成功应用案例

《2022 风力发电行业应用案例合集》是我们特别推出的一期《PC Control》特刊，我们精心挑选了一些最近四年内使用倍福技术完成的风力发电项目相关的一些优秀案例。复杂程度各不相同的各种应用可以让您了解如何使用倍福基于 PC 和以太网的开发、通用的控制技术实施各种解决方案以及它可以为客户带来哪些好处。



30 | fos4X, aerodyn, 德国: 基于 PC 的控制技术, 结合传感器和风力发电专业知识延长风力发电机组的使用寿命

34 | 金风科技, 中国: 在线故障诊断功能可大大提升风力发电机组的可利用率



38 | 林都海洋可再生能源中心 (LORC) 和 R&D Test Systems, 丹麦: 风力发电 HALT 试验台实现严格测试



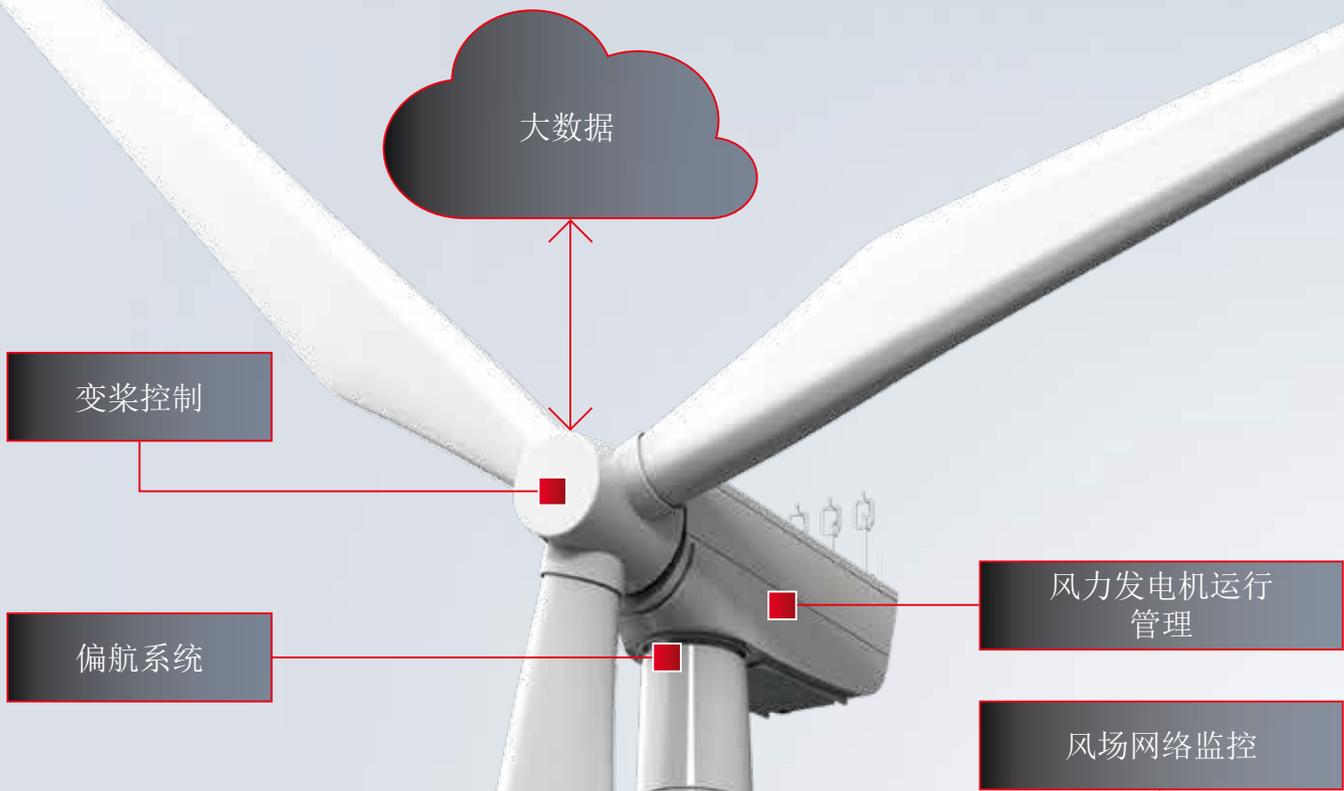
40 | 德国弗劳恩霍夫风能及能源系统技术研究院 (IWES): 基于 PC 和 EtherCAT 的控制技术在多功能风力发电机组试验台中的应用

44 | GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH, 德国: 风力发电机组的高级振动分析

46 | ee technik GmbH, 德国: 基于 PC 的控制技术在分布式风力发电系统中的应用



50 | Alstom, 西班牙: 实时通信使风电场应用实现快速响应



基于 PC 的控制解决方案：通用的风力发电机组控制平台



Nils Johannsen,
Beckhoff Automation
风电技术经理

风力发电 — 装机容量增幅 创新高与技术创新共振

亮眼的数字：全球风能理事会（GWEC）发布的《2022 全球海上风电报告》显示：2021 年全球海上风电新增并网容量 21.1 GW，为 2020 年的三倍多，创历史最高纪录。截至 2021 年底，全球海上风电累计装机容量达到 56 GW，海上风电在全球风电总装机中的占比上升到约 7%。据 GWEC 预计，到 2031 年，全球海上风电新增装机容量将超过 315 GW，考虑到乌克兰战争和日益明显的气候变化，增幅甚至可能会更高。因此，风力发电（包括海上和陆上风电）的重要性和地位将继续攀升，而确保可靠、高效发电的控制技术也同样重要。

基于 PC 的控制技术已在全球 100,000 多台风力发电机中得到验证

倍福通过其基于 PC 和 EtherCAT 的控制技术，在全球范围内实施成熟的、久经时间验证的风力发电机组控制解决方案：全球有超过 100,000 台风力发电机组使用了基于 PC 的控制技术，单台风力发电机的容量最大可达 14 兆瓦。这种控制架构非常适合用于满足风电行业的要求：开放性和可扩展性，控制器设计上的灵活性以及高集成度。从风力发电机运行管理、变桨控制、变流控制、偏航控制和制动控制直到风场网络监控等所有过程都通过工业 PC 上的软件实现。安全技术和状态监测通过相应的 I/O 模块无缝集成到原有的端子模块中。倍福在全新的 TwinCAT 3 Wind Framework 中创建了一个软件工具，它可为风机制造商提供合适的系统编程帮助和支持，并支持将工业 4.0 方案应用到风电行业中。专门为风力发电行业开发的软件库和硬件组件进一步完善了倍福的控制解决方案系列。

基于 PC 的控制技术蕴藏着巨大的技术创新潜力。例如用于监控叶片、轴承、齿轮箱和发电机以及塔筒基础等结构件的系统集成状态监测功能。在改进错误检测和整体系统分析功能方面，这种解决方案优于传统的基于硬件的状态监测解决方案。与传统的以太网解决方案相比，基于 EtherCAT 的风场网络监控系统不仅处理速度更快，而且由于无需使用昂贵的交换机和集线器，具有巨大的成本效益。此外，通过集成在自动化系统中的 EtherCAT 电力测量端子模块 EL3783 可以在公共接入点以高达 20,000 个采样点/秒的速度测量瞬时电流和电压值。通过 EtherCAT 分布式时钟功能，所有风力发电机组的测量值和风电场公共连接点处的测量值可以实现小于 1 微秒的时间同步。另一个创新是机舱调节用分布式伺服驱动系统：传统的偏航系统通常是基于由市电供电不带软启动功能的异步电机在施加液压刹车的情况下驱动。但为了在弱供电网络中实现安全的起转矩，所使用的电机和上游供电器件选型通常都留有特别大余量。这就会导致出现体积和重量过大，以及机械零件疲劳荷载过高的问题。AMP8000 驱动系统可解决这一问题，它将分布式伺服功能集成到电机中，设计紧凑，效率更高，并为安全功能提供足够的扭矩。由于运行期间无需施加抱闸，并且消除了背隙，所以负载是均衡的，机械应力更小。

更多信息：

www.gwec.net

www.beckhoff.com.cn/wind

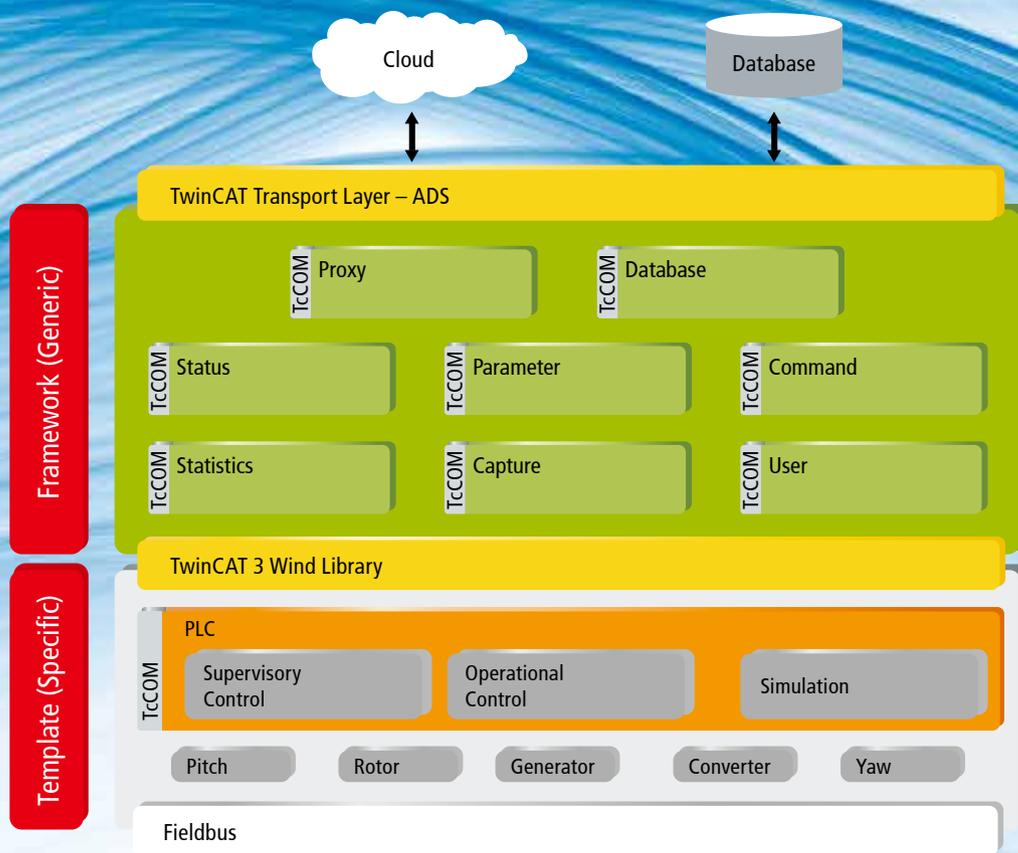


TwinCAT 3 Wind Framework 应用于风力发电机组控制

1 个框架 + 20 年 100,000 台风机运行专业知识的 积淀

全新的 TwinCAT 3 Wind Framework 将使风力发电机制造商能够快速、方便地实现自主程序开发。所有功能都集成到一个通用的软件包中：从事件管理到数据库链接，甚至如状态机和液压等基本功能都包含在内。预制应用模板大大简化了编程过程，让开发人员能够专注于最重要的系统功能。其结果将是：高效的工程开发、更短的产品上市时间，以及工业 4.0 能为风电产业带来的所有优势。





应用模板和封装模块使得模块化软件架构功能更强大

倍福提供先进的风电行业解决方案已有 16 年历史。TwinCAT 2 风电库已经非常成熟并在各种应用中得到验证，为开发风力发电机组控制管理软件奠定了坚实的基础。

当前，规模越来越大的风力发电机组以及日益加快的发展速度带来了新的挑战：配备复杂传感器和执行机构的更智能的系统将进一步提高系统的复杂性。这使得故障分析更加复杂，且稳定运行越来越困难。为了迎接这些挑战，我们将现有的方案和技术结合于一体，开发了全新的 TwinCAT 3 Wind Framework。

TwinCAT 3 Wind Framework 将丰富的功能封装成 TwinCAT 模块，然后集成到 TwinCAT 3 架构中。通过使用模块化架构模板和成熟简洁的

TwinCAT 模块及功能块，可以确保实现高效的软件开发。灵活的配置使满足用户的个性化需求变得非常简单。借助数据库中的海量数据存储，系统诊断功能也将更加缜密和准确。这些特点都非常有利于满足新的应用需求、实现高效调试和风机控制软件的升级优化。

TwinCAT 3 可以将 IEC 61131-3、C++ 和 MATLAB®/Simulink® 模块装载到不同的 CPU 核中，并在不同的实时核中独立运行这些模块，同时确保它们相互间可以可靠地交互。这一切的基础是 TwinCAT 模块语言，它描述了 TwinCAT 模块的特性，例如过程参数或方法。

基于风电项目模板和风电功能库的风力发电机运行管理软件开发

基于 TwinCAT 3 Wind Framework 的风力发电机运行控制管理软件开发，是通过一个风电功能库和一个风电项目模板实现的。风电功能库将 Wind Framework 的所有功能以 PLC 功能块的形式实现，而风电项目模板则以 PLC 工程的形式为风力发电机运行管理软件的开发生提供了一整套模块化架构，通过它可以轻松实现 TwinCAT 模块中的所有功能。

图 1 是风电项目应用模板示意图。风力发电机的每个子系统（如：变桨控制、变流器控制）由一个独立对象表示。这样，每个子系统（如变桨，变流等）的开发、使用和测试都是相互独立的。正如在机械系统组件可以实现互换一样，现在软件的子系统也可以实现模块化互换了。采用模块化结构能够实现并行开发，这样程序员就能够更加专注于专用功能模块的开发。这就大大提高了软件的质量、灵活性和可复用性，同时也缩短开发时间，降低了工程成本。

风机启动和停止的不同运行模式，以及系统的状态机，都融合进应用模板中的监督控制功能组中，并以 PLC 功能块的形式简洁地实现。这样，就能通过高层发出系统操作指令，实现控制目标。

风力发电机的常规控制功能，如变桨控制、转矩控制等，在模板中出现在运行控制功能组中。这一部分的控制，需要结合其它模块的信息，如考虑载荷计算的算法。

当然，这些模块可能是 MATLAB®/Simulink® 自动生成的 TwinCAT 模块，或者是通过 C/C++ 编程实现的控制算法。这样，同一个控制器既可以实现载荷算法计算，也可以实现一般的控制功能。于是，控制器将不再需要进行二次编程，算法也不必进行易出错的第二次实现。

TE1400 — 面向 MATLAB®/Simulink® 的 TwinCAT 3 Target 组件

面向 MATLAB®/Simulink® 的 TwinCAT 3 Target 组件能够通过一个 MATLAB®/Simulink® 模型生成具有实时运行能力的 TwinCAT 模块。然后这些模块可以在 TwinCAT 3 Runtime 中被执行、多次实例化、参数化和调试，而无需使用 MATLAB®/Simulink®。整个框图可以从 Simulink® 传输到 TwinCAT 模块中，这有助于分析和优化控制器，而且，优化工作可以在现场并直接在系统中进行，因为只需要借助 TwinCAT 3 Engineering 软件就能够完成。

运行控制所需要的值被传送给各个子系统。每个子系统以 PLC 功能块的形式实现，每个功能块包含 5 个方法和 4 个数据结构体类型。图 2 是子系统的结构示意图。Input/Output 数据结构体链接至硬件的输入和输出，以及传感器、执行机构和现场总线的数据。Input 结构体中

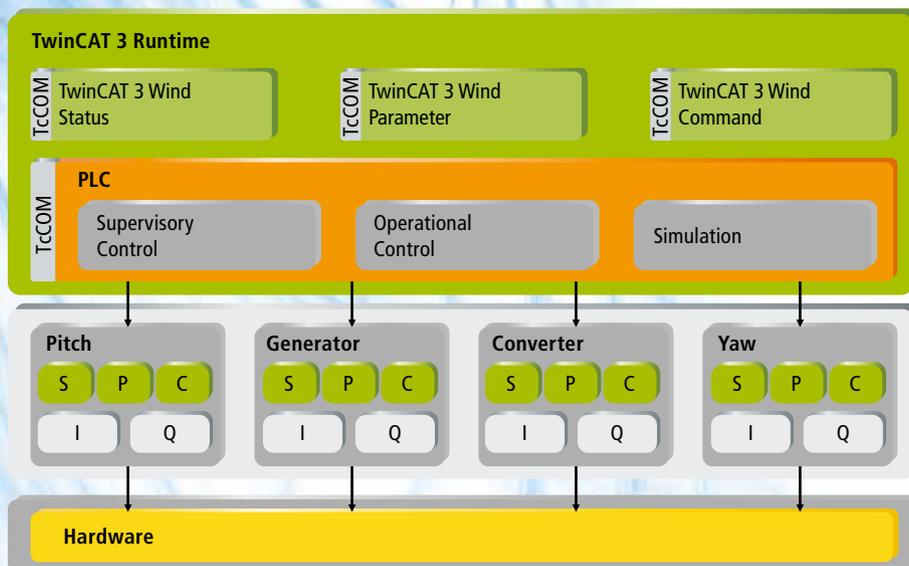


图 1：风力发电机运行管理作为一个独立的 TwinCAT 模块实现，且子系统作为独立的对象实现

的数据在 `InputUpdate` 方法中进行预处理，并传输给 `Inbox` 数据结构。然后，通过调用 `ActualUpdate`、`MonitorUpdate` 和 `ControlUpdate` 方法实现对子系统的监测和控制。它们直接从 `Inbox` 存取物理值。子系统新近刷新的量直接写入到 `Outbox` 数据结构中。`Outbox` 数据结构再通过 `OutputUpdate` 方法进行处理后，向硬件或总线提供输出量。与监督控制功能组的数据交换在数据结构 `Actual` 和 `Demand` 中实现。此外，借助 `Inbox` 和 `Outbox` 数据结构可以轻松实现仿真。这样，每个子系统都能将其独立的仿真结果引入到整个系统中。

此外，一台基于（美国）国家可再生能源实验室（NREAL）配置设计的 5 MW 海上风力发电机自适应仿真模型已经集成到应用模板中，并且这个模型可以进行调整和配置，这就使得在开发环境中测试整个风力发电机运行管理程序成为可能。该模型以 `TwinCAT` 模块的形式提供，当然，用户也可以根据需要通过 `MATLAB®/Simulink®` 或 `C/C++` 生成自己专用的风机模型将其替换。

应用模板中所集成的仿真模型可用于再现或评估整个控制系统、不同的运行模式和各子系统。每个子系统可以独立地选择采用仿真或与实物连接的方式运行。例如，可以单独激活机舱组件与实物的连接，在工厂车间中进行机舱测试。另外，可以直接使用原始的控制软件进行软件在环或硬件在环仿真，甚至可以直接将其应用于培训试验台。仅通过更改参数，同一版软件就能实现样机的快速控制和虚拟调试。

基于 `TwinCAT 3 Wind Framework` 的执行管理和子系统控制都是以 `TwinCAT` 模块的形式实现的。各对象（Object）通过 `PLC` 软件库中的 `PLC` 功能块创建和配置。`Wind Framework` 提供了必要的服务和功能，帮助这些对象自动集成到上位 `TwinCAT` 模块中。通过这种方式，每个子系统都可以定义一个单独的对象组，用于向执行管理功能组提供信息和配置。

`TwinCAT` 模块和子系统统一架构创建了一个应用标准。这样，即使源代码是由其它程序员实现的，也可以快速熟悉。

通用模块的上位服务

通用的 `TwinCAT` 模块提供上位服务，使每个模块都能够集成到 `TwinCAT 3` 中直接作为 `TcCOM` 模块使用。各模块也可以单独和相互独立地使用或组合，以便于进行交互和数据交换。图 3 突出显示了可用的通用模块。

各个 `TwinCAT` 模块中的所有信息被持续实时地传送到 `Database` 模块。这些数据通过 `TwinCAT 3 Database Server` 在数据库中进行管理：`Database` 模块根据需要进行数据准备，通过 `SQL` 指令添加到数据库中或从数据库检索。`Database` 模块实现了与 `Micsoft SQL` 服务器的完全接口。`Wind`

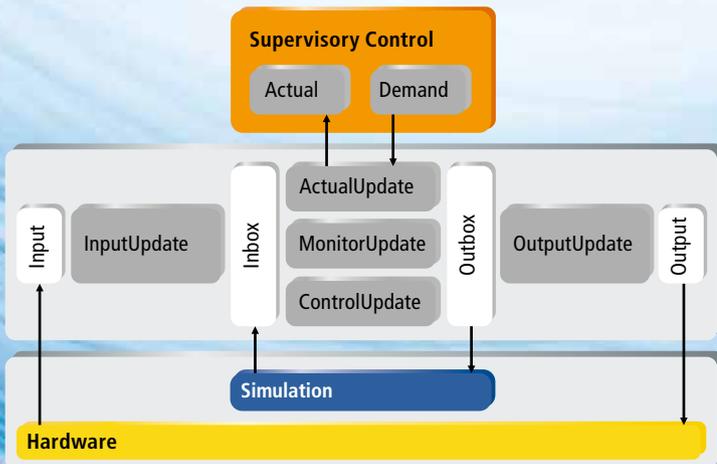


图 2：子系统的统一架构为应用程序开发创建了一个标准，使得程序员能够快速熟悉

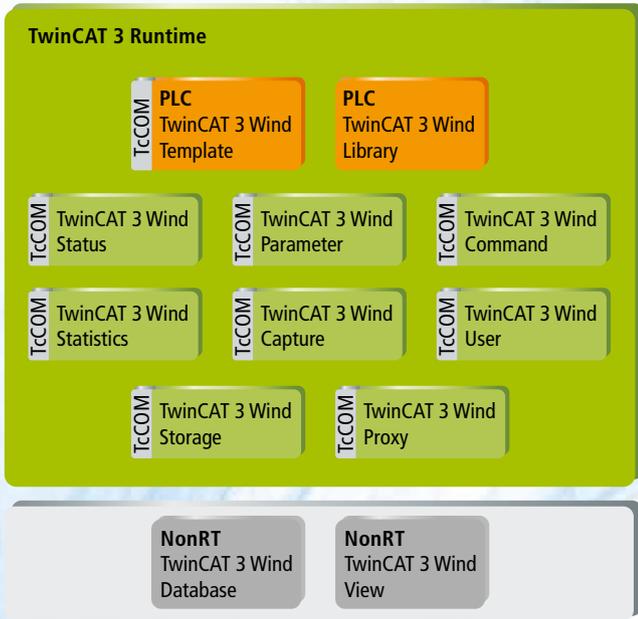


图 3: TwinCAT 3 Wind Framework 包括 TwinCAT 模块、PLC 功能库、数据库接口和可视化界面

Framework 提供相应的数据库结构，包括 Microsoft SQL 服务器所需的表格和程序等。其用途在下文将详述。

TF6420 – TwinCAT 3 Database Server

TwinCAT 3 Database Server 能够在 TwinCAT 实时环境与不同数据库之间进行数据交换。可以使用诸如 Insert 或 Select 以及 Stored Procedures 等 SQL 指令。目前支持 11 种数据库，包括 Microsoft SQL、MySQL、PostgreSQL 及 Oracle。此外，PLC 功能库中包含了一个用于参数查看设置的配置程序，它提供用于运行 SQL 指令的功能块。

在自动化应用中，用户管理通常在外部可视化系统或 SCADA 系统中进行。用户管理集成到 TwinCAT 3 Wind Framework 的功能中，通过 User 模块可以查看、管理和记录所有交互信息。这样可以在编程期间指定每个功能的使用权限。在应用程序中对这些用户权限进行检查，使风力发电机运行控制管理软件自动确保正确的用户访问权限，从而不再依仗外部用户管理。

数据库中的加密功能 (hashes) 保障了账号的安全保存。通过验证用户名和密码，可以激活数据库中的访问权限。本地用户一般将具有更高的权限，可以通过控制柜的维护开关触发激活。

Proxy 模块能够直接访问所有模块和对象的实时数据。通过 TwinCAT ADS 协议，可以直接对某一个对象的信息和记录进行检索。当然通过 TwinCAT 3 的其它功能，如 OPC UA 或 IEC 61400-25 中符合标准的通信协议，也可以与控制器实现安全的通信。

TF6100 – TwinCAT 3 OPC UA Server

TwinCAT OPC UA Server 根据 OPC 统一架构 (UA) (IEC 62541) 规范进行通信。作为工业 4.0 和物联网的先决条件，OPC UA 确保将原始数据安全、可靠且独立地从生产层中的传感器传输到 IT 层和 ERP 系统。通过这种方式，控制系统能够根据当前和历史数据、报警和服务 (方法) 进行面向对象的数据通信，并在一个面向服务的体系架构 (SOA) 中提供。

TF6510 – TwinCAT 3 IEC 61850/IEC 61400-25

TwinCAT3 IEC 61400-25 功能可以根据 IEC 61850 与用于风力发电机的 IEC 61400-25 指定的对象进行数据交换。MMS 是实现主站控制站点和风力发电机之间分层式数据对象通信的协议。其中包括 TwinCAT Telecontrol Configurator，它在数据模型配置期间提供支持，并生成相应的 PLC 代码。



图 4: 可视化界面用于显示当前状态、数值和设置

TwinCAT 3 Wind Framework 同时提供一个简单的工程可视化界面。它从 Proxy 模块检索数据并充分利用 User 模块中集成的用户管理功能。可以显示所有对象的当前状态、值和设置。可以进行简单的报告和数据数据库分析，并且显示数据历史记录。图 4 显示的是基于数据库中记录数据的显示示例。

Status 模块还提供了另外一项功能，它可以监测所有风力发电机组的状态，实现故障检测、事件管理、故障处理和报告。每一个创建的状态对象代表一个事件，并且这些对象可用于显示各个消息、报警或故障。比如，可以产生传感器断线、统一的设备故障消息等。

Status 对象拥有各种可配置的属性。为了便于识别，每个对象都被分配在一个对应于具体系统组件的组中，并且这个组有一个纯文本名

称。状态的触发或复位延迟，以及手动或自动模式都是可以设置的。例如，可以通过设置 Status 对象的访问权限，将故障的复位操作权限限制给一个特殊的用户组。一个具体的例子是可以将某个状态的手动复位操作限制在仅当技术人员到达现场并位于机舱时才能够进行。

其它的一些功能包括：通过对状态触发系统停机、高分辨率录波或发送通知等。这种灵活的事件配置由 Status 模块统一管理，并从所有对象的当前状态中产生适当的响应。例如，变桨或变流器故障，可以被评估为引起系统停机响应。风力发电机组的安全运行通过所有事件的上位监控保证。一个列出所有当前活动事件和最近事件历史的列表由 Status 模块管理，通过该模块可以随时检索事件。每个事件都被记录在数据库中，并配有一个时间戳，指示事件何时发生，它何时被重置。这让用户可以确定每个事件的频率和持续时间，并得出关于风力

发电机组运行和可用性的结论。此外，可以使用事件的统计分析来确定造成停机最常见故障的原因，为系统优化提供了基础。

Parameter 和 **Command** 模块提供配置和交互功能。**Parameter** 对象可以接受符合 IEC 61131-3 标准的所有数据类型，同时也能支持查表的方式。例如，温控系统可以使用两个 **Parameter** 对象作为最高和最低温度的判断条件，用于打开或关闭加热器。**Parameter** 对象的属性中有对参数设置范围的限制，同时也能够限制更改参数的用户权限。另外，每个参数都设定有默认值，需要时，也可以复位。

这样，整个风机的配置表就可以通过参数表进行复制和修改。所有参数的修改记录、参数的当前状态以及配置加载都可以借助 **Database** 模块通过与数据库连接实现。风力发电机的整体配置存储在数据库中，可以方便的应用到其它风力发电机中。

Command 对象可以用来触发或使能程序中的动作。例如，控制柜门上的开关或可视化界面中的一个按钮可以通过 **Command** 对象实现。与实际情况一样，**Command** 对象提供了多种开关模式如按压开关、拨动开关、DMS 开关等。操作这些 **Command** 对象也需要授权，并且所有的操作都将被记录到数据库中。为了更好地进行诊断和可视化，每个 **Command** 对象都有一个状态确认量和状态反馈量。通过简单的数据库操作，就能够随时确认哪个操作员何时触发了一个系统停止或事件复位，以及对那些参数做了修改。

信号记录以及统计分析功能通过 **Capture** 和 **Mean** 模块实现。**Capture** 对象可以灵活的记录原始数据，并且每个对象记录的信号类型（数字量或模拟量）以及采样速率都是可以独立设置的。初步的数据分析可以在实时系统中进行。对于数字量信号，其变化次数及有效状态持续时间将被记录和统计。通过这种方式可以监测一个单元及其动作，并统计出动作频率和运行时间。当更换一个新的单元后，技术人员可以手动复位这些统计量。模拟量信号的记录可以用于计算诸如流量、发电量或消耗量等值。

如果这些计算不在实时系统中进行，那么由于非确定性的记录信息和分析，将很有可能造成与实际结果的严重偏差。在风电项目模板中，这些数据在数据库中进行永久保存的同时，也可以作为实时值被控制器检索到。

Mean 模块可以进行连续平均值计算；**Mean** 对象可以以任意时间间隔对采集的模拟量进行平均值计算。算法包括：算术平均值、RMS 值、标准偏差、基于风向的平均值计算、最小和最大值、湍流强度等。将平均值存储到数据库中的时间间隔也是可以自由配置的。风机控制中

典型的计算和存储值是 30 秒或 10 分钟的平均值。一般通过这些量可以生成统计数据，如功率曲线、风向玫瑰图，或者随时根据需要从数据库中获取采集量矩阵。

对于一些重要事件，当相应的 **Status** 对象触发时，**Trace** 模块将被触发，并开始对系统数据进行高分辨率录波。

这些系统数据由 **Capture** 对象提供，并通过 **Trace** 模块以 PLC 周期的时间间隔速率进行记录。录波功能会根据配置时的设置，记录事件被触发前后的特定事件的数据。事件触发之前数秒的数据可以被高速录波，这将非常有益于故障排除。事件触发后数秒的录波数据将为分析系统如何应对事件提供帮助。

每一个记录值和每个事件都配有一个时间戳。时间戳可以由本地系统获得，也可以从一个同步时间源获得。**Time** 模块可用于实现这一目的。它采用 **EtherCAT** 分布式时钟，以便通过 **IEEE 1588** 或 **PTPv2** 访问全球同步的时间源。通过 **Capture** 或 **Mean** 对象记录信号的周期也在这一时间基础上同步。10 分钟的平均值在固定的 10 分钟间隔时间内记录，例如在 11:00、11:10 等时间点记录（而不是在 11:03 或 11:13 等时间点记录）。这确保了来自不同的源和系统的数据具有真正可比性，因为所有值是在同一时间并以相同的间隔测定的。

对接数据库实现深度分析

Database 模块通过 **TwinCAT 3 Database Server** 与 **SQL** 数据库实现连接，从而提供统一、高效、紧凑的数据管理。所有信号和事件的记录，加之全部对象配置的存储和载入，可以很好得支持深度的数据分析。所需进行的任何预处理都在 **TwinCAT** 模块中实时完成，**Mean** 模块在每个设定的时间间隔内持续地进行平均值计算，并且每个周期的值都被加入计算中。**Capture** 模块每个周期都对记录量进行扫描并对有效值进行记录，以便使计算尽可能准确。

实时记录和预处理数据是第一步，紧随其后的是与数据库间的可靠传输，这些为非实时系统中的数据分析和评估打下了坚实的基础。有了大量历史数据，就可以检测状态变化和故障原因，计算详细的统计结果，并优化系统。风电数据库结构可以将相互独立的多个系统中的数据整合存储进入一个表格中，这些数据可以通过预制的程序被快速方便的进行整合，以便进行更高等级的分析和比较。数据合并如图 5 所示。

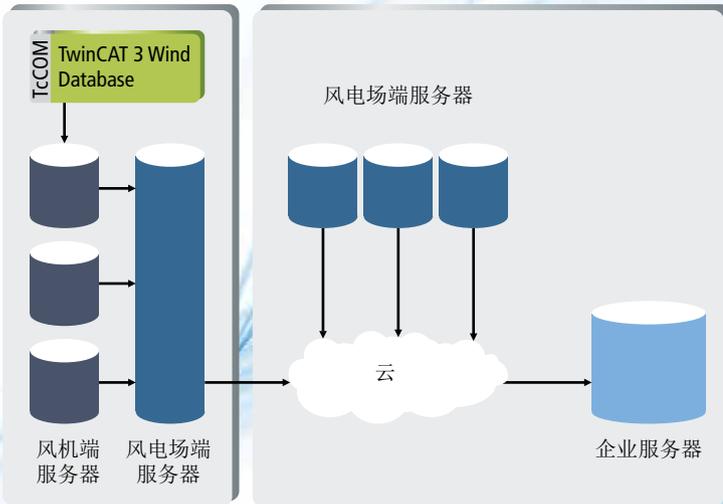


图 5: 数据可以在中央服务器上合并, 以进行更高级别的分析

如果所有系统中的数据在公司中央服务器上合并, 或在云中合并, 将形成一个数据仓库, 这将在系统的整个生命周期实现数据永久保存。这种来自任意数量系统、实时生成并在中央服务器上累加的数据量一般可以被称为大数据。大数据为驱动制造业迈向工业 4.0 进一步添砖加瓦, 并支持选择性的整合风电场管理系统数据、监视系统数据和测量系统数据等。

标准化的访问方式使这些数据能够应用于更加广泛的自动化评估中。它们可以被用来检测故障或缺陷、计算统计结果并优化风力发电机运行管理系统, 以及实现基于状态的监测和预测系统维护。数据挖掘可以获得关于系统运行的新视点。例如, 可以确定组件磨损与它们的开关频率和工作周期之间的关系, 从而能够在它们出现故障之前进行更换。

结论

先进的软件工程开发界面和面向服务的体系架构 (SOA) 概念在

TwinCAT 3 Wind Framework 中得到了充分的体现。因此, 借助风电 TwinCAT 3 功能库, 倍福广泛的产品线在风电中的应用进一步得到提升。通过模块化架构、统一通信接口、关联数据库, 集中数据存储, 工业 4.0 的诸多诉求在风力发电机组得以实现。

TwinCAT 模块提供了丰富的功能, 通过它们已经实现了必要的风力发电机运行管理、用户管理、日志记录和数据管理。程序员可以通过 PLC 功能块轻松地使用这些功能, 并专注于他们自己的实际任务。

风电项目模板提供了一个现成的、模块化软件架构, 为扩展和适应特定系统做好了准备。由于 TwinCAT 3 架构具有很高的灵活性, 可以将 MATLAB®/Simulink® 或 C/C++ 仿真轻松集成到控制器中。

所有系统信息都由数据库提供, 并且所有用于数据库整合的配置都已完成, 每个单独的数据库和中央数据库都能够实现对风力发电机组的运行模式和状态的深度监测和评估。

更多信息:

www.beckhoff.com.cn/twincat-wind

大数据
在实时系统中为系统运营商和制造商进行所有相关数据的预处理、可用性分析和整理

- 数据整合和数据存储
- 数据分析和数据挖掘
- 电力和状态监测

运营商

云
大数据

制造商



开发环境

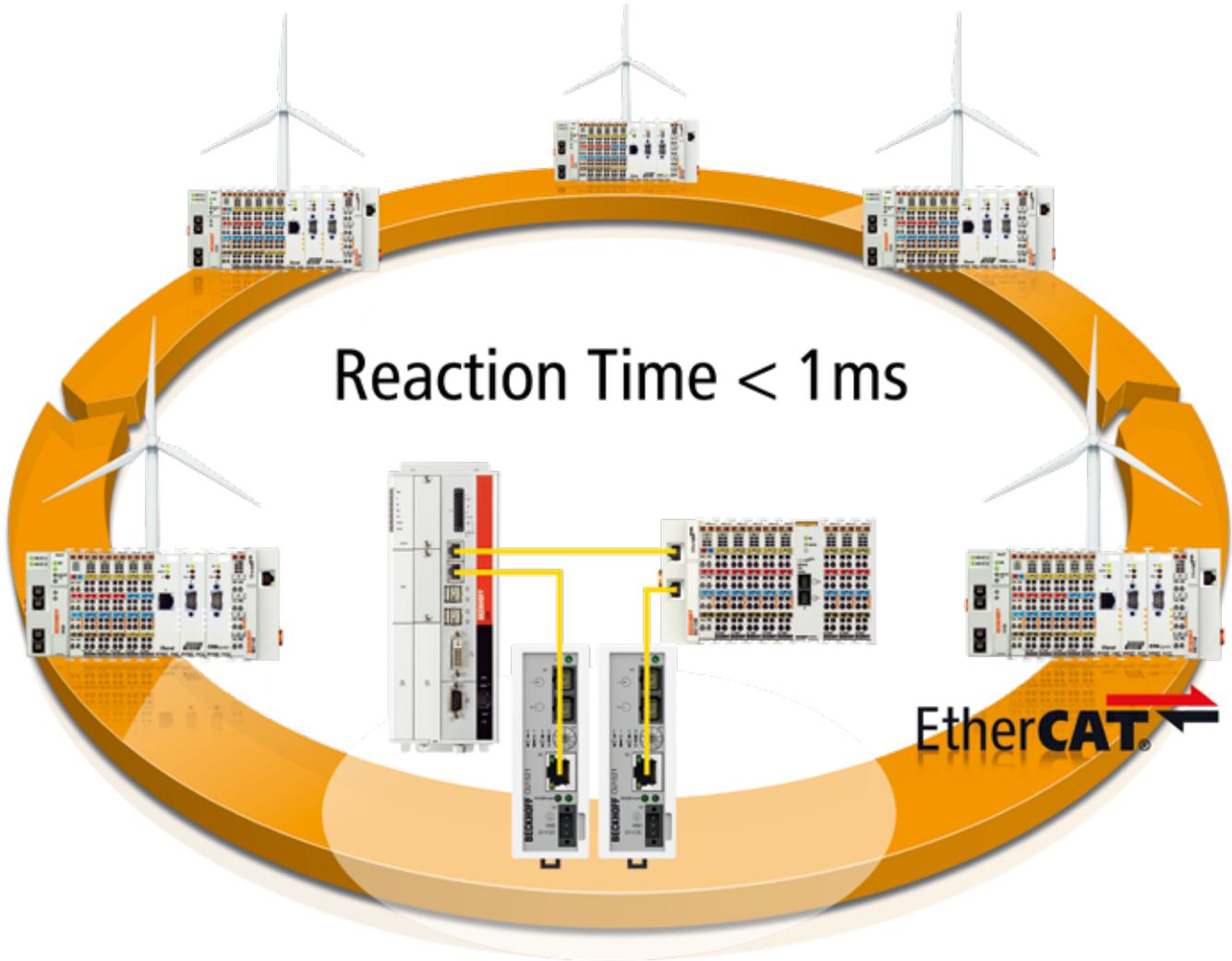
装机整个生命周期中全面的集成式开发环境

- IEC 61131-3 编程语言, C/C++, MATLAB®/Simulink®
- 面向对象, 模块化
- 工程工具之间的数据交换
- 自动完成工程设计

通信

垂直安全和水平通信

- 支持所有相关的总线系统 (EtherCAT, Ethernet, PROFIBUS 等)
- 全面的消息/链接功能 (ADS, OPC UA, 现场诊断等)



极速风电场网络监控优化了电网兼容性

应用于风电场的实时网络监控， 响应时间小于 1 ms

可再生能源在全世界范围内的扩展速度越来越快。降低 CO₂ 排放量的需求以及核能不断下降的接受度是这次发展的两大主要因素。然而，由于风能和日光不是随时都可以得以使用，因此，将再生能源馈入电网会导致很大的问题。倍福基于 EtherCAT 的高速自动化解决方案实现了小于 1 ms 的响应时间。电压跌落的早期诊断增加了电网兼容性。除了风力发电机组外，该技术还适用于在太阳能发电厂中使用。

我们已朝着这个方向前进：许多国际电网并网条例——所谓的电网准则——现在规定了每台风力发电机组的 LVRT 性能（低电压穿越技术）。这就意味着，如果电网电压突然改变，例如由于短路而导致的电压突然改变，设备必须继续与电网保持规定时间的连接并且必须馈入规定的无功电流以利于故障定位和维持电压。而后，其必须在几秒钟的时间内恢复到全有功功率馈入。所需的无功电流取决于电压跌落的深度且必须取决于风里发电机组或电网并网点的要求。

在这个基础上，每台现代风力发电机组如今都能够对电网中的电压跌落做出适当的反应。风电场正变得日益大型且高达 500 MW 的装置也不再是什么新鲜事了。考虑到风电场内部电力网的大小，根据电网并网点的条件在风力发电机组级起运行的 LVRT 调节常常不能产生电网运营商想要的效果。由于风力发电机组与电网并网点之间存在的阻抗，所以它们之间的电压会有差异。也就是说各个风力发电机组对电网中的变化会做出不同的反应。同样，馈入风力发电机组级的无功电流与电网并网点的最终无功电流也是不一致的。

倍福解决方案用于解决这个问题，且其能够让整个风电场对电网中的电压跌落做出协同反应。这样，解决方案即可实现整个风电场在电网并网点的确定的行为。

迄今为止，准则已对风力发电机组或风电场馈入的下列值做了规定：

- LVRT 及本地电压限值（控制时间的要求：< 10 ... 20 ms）
- 有功功率及无功功率或电压（控制时间的要求：1 s – 60 s）

由于这些时间要求，在发生 LVRT 情况时，需要通过风力发电机组级的变频器的响应得以实现。由于风电场控制器的集中调节而产生的控制回路延迟会阻碍所需动态性的实现。

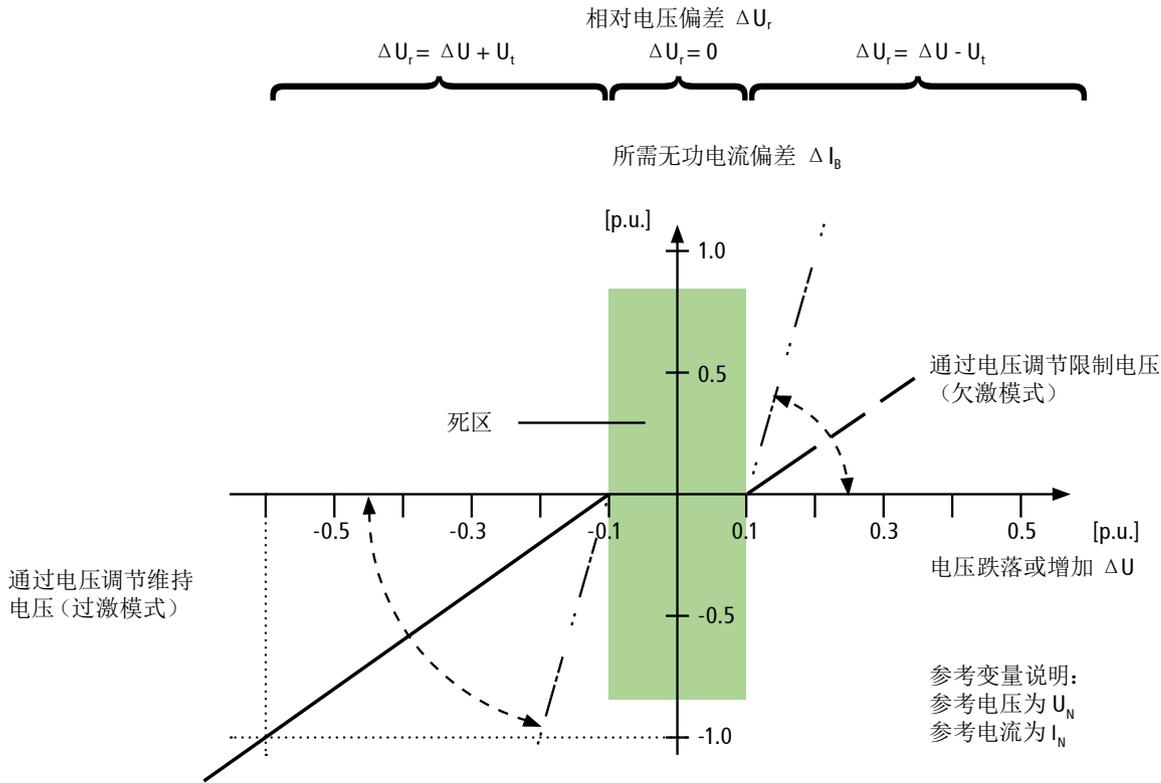
电压/无功功率级在风电场级得以实现；只有这样才能达到电网并网点规定的设定值。结合弱电网并网和 Q(U) 特性，所需的高动态性（控制时间为 1 s）有时会带来了一场挑战。

EtherCAT 助力实现风电场网络监控

Melanie Hau 和 Martin Shan^[1]在其于 2011 年发表的主题为“风电场并网控制”的演讲中（见第 30 页的论文）说道，风电场网络监控速度以及风力发电机组自动化现场总线的速度对风电场电压或无功功率控制可实现的动态性产生了显著影响。

而这恰恰就是倍福解决方案的重点，它采用基于 EtherCAT 的风电场网络监控。迄今为止，风电场网络监控都是使用以太网实现的。以太网光缆用于将单独的风力发电机组连接到主计算机。因为 EtherCAT 基于以太网，所以其与以太网完全兼容。当使用 EtherCAT 时，也可应用相同的物理性。此外，EtherCAT 还完全实现了电缆冗余。风电场中的光缆环网在风电场主机处闭合。所需的 TCP/IP 通信通过 EtherCAT I/O 系统中的交换端口端子模块进行。亮点就在于，与目前使用的支持冗余的交换机相比，使用 EtherCAT 不仅可以显著提高传输速度，而且还可以产生显著的成本效益。

[1] Hau, Melanie and Shan, Martin. Windparkregelung zur Netzintegration. 第 16 届卡塞尔能源系统技术研讨会，2011



SDLWindV 规定的电网故障情况下，无功电流馈入（来源：SDLWindV）

电力测量速率可达 10,000 采样点/秒

EtherCAT 明显增加了系统速度：一个包含 1500 字节的 EtherCAT 报文可由主机在 77 μ s 的时间内完成发送和再次接收。假设每台风力发电机组的过程映像区为 50 输入字节和 50 输出字节，那么具有 150 台风力发电机组的风电场的过程映像区可以在小于一毫秒的时间内刷新。如果速度要求或风力发电机组数量明显增加，那么可在一台主机上实现多个 EtherCAT 环。

此外，通过 EtherCAT 还实现了其它新技术：例如，超采样功能使得频率高达 100 kHz 的信号测量或输出成为可能。例如，借助于 EtherCAT 功率测量端子模块 EL3773，超采样技术可用于测量电网并网点的电流和电压。采样频率可达 10 KHz。

EtherCAT 设备的分布式时钟功能的分辨率为 1 ns 且精确度为 10 ns，使得测量值和控制值的同步时间窗口能小于 1 μ s，因为 EtherCAT 拓扑中的所有分布式时钟可通过传输延迟的测量进行同步。在这项功能的基础上，风电场内的测量值可以很好地被同步。使用这项技术甚至还可以实现风电场内的各风机变流器的 IGBT 同步。鉴于此，风力发电机组制造商和变流器供应商都必须参与进来。

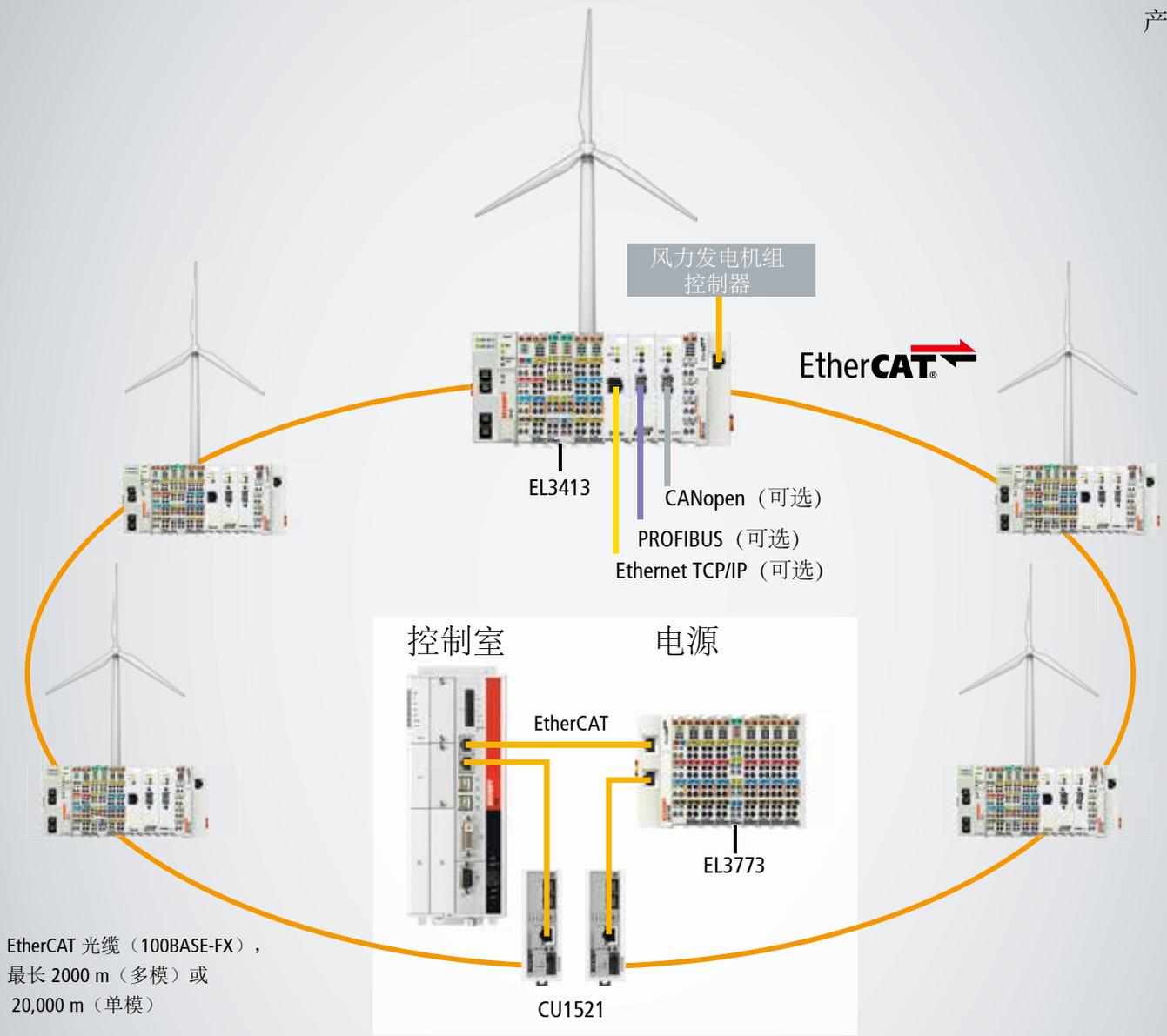
开放性控制技术进一步拓宽了应用范围

总之，这意味着，通过使用现有的标准元件，风电场控制器能够让整个风电场在电网并网点对电网电压下降做出既定反应。除故障情况外，也可在风电场中实施高动态电压或无功功率控制器，应用于弱电并网。

由于 EtherCAT 系统的开放性，该解决方案也可与第三方供应商的控制器一起使用：用于所有常见现场总线系统（例如 PROFIBUS、PROFINET 和 CANopen）的主站和从站接口可用于 EtherCAT 端子模块系统。串行协议可用于大多数接口；通信也可使用并行线路完成。

可与 690 伏电压直接连接的 EtherCAT 电力测量端子模块 EL3413 可在任何风力发电机组上使用于检查控制器。通过拓扑还可以收集到例如气象数据的其它信号，既简单又便宜。

作者：Dirk Kordtmeikel，倍福全球风电行业经理



EtherCAT 光缆 (100BASE-FX),
最长 2000 m (多模) 或
20,000 m (单模)

与传统的 IP 解决方案相比，基于 EtherCAT 的风电场网络监控系统响应速度更快且成本优势更高。风电场网络监控系统的速度越快，能量供应商对于电压下降或不断变化的电网要求做出的反应就越有效。集成到自动化系统中的 EtherCAT 功率测量端子模块会记录馈入点的瞬时电流和电压值，高达 10,000 采样点/秒。因此，确保了电压跌落的早期诊断。

与当前的方案不同，它可以让整个风电场实现低电压穿越 (LVRT)。因此，如果在馈入点诊断出有电压跌落，它可以在 1 ms 的时间内将信号传输给整个风电场的所有风力发电机组。通过 EtherCAT 分布式时钟，所有风力发电机组的测量值和风电场公共接入点测量值的同步时间小于 1 μs。有了这些数据，电流、电压和频率可以得到相应控制且电网可以得到最优的支持。现有的光纤以太网结构也可以使用。

更多详细信息:

www.beckhoff.com.cn/ethercat

www.beckhoff.com.cn/el3773

www.beckhoff.com.cn/el3413

EtherCAT 测量端子模块在风电场监测中的应用

高速、高精度的数据传输是实现风电场同步的关键

英国推出“2030 年全民风电”计划，即到 2030 年用海上风电为全英所有家庭供电。根据英国的电网数据显示，一月份某一天风电场的发电量达到了 19,835 兆瓦，足以满足英格兰一半以上的供电需求，充分证明了风力发电的巨大潜力。加大可再生能源的投资力度对全球实现 2050 年“净零排放”目标至关重要。Acteon 集团旗下的 Pulse Structural Monitoring 公司受委托为新风电场中所选的风机基础提供监测解决方案，整个解决方案，尤其是在整个设计过程中，使用了大量倍福基于 PC 的控制产品和 EtherCAT 测量端子模块。

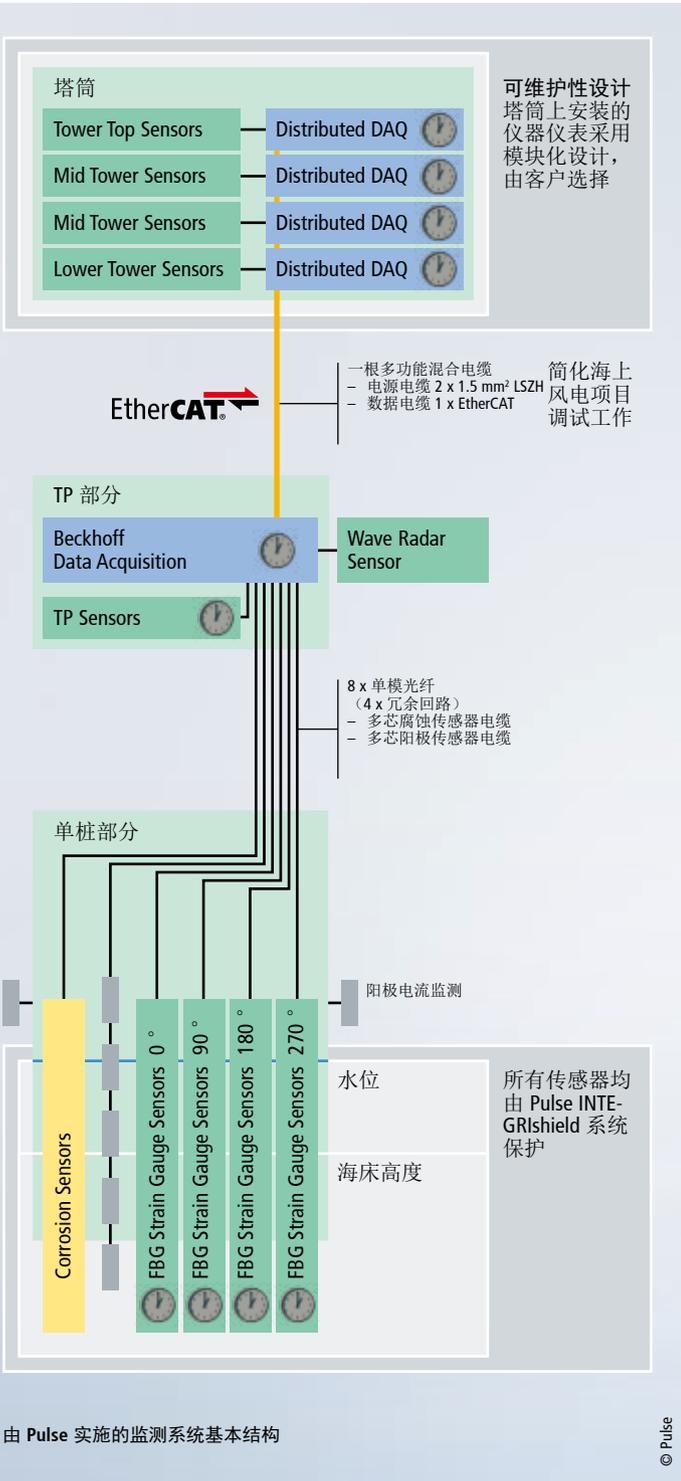
据 Pulse 称，英国在海上电力领域处于世界领先地位，其装机容量超过其他任何国家。但由于海上风电场风力发电机组运行环境恶劣，因此需要持续监测整个风力发电机组的运行状态。通过持续监测风机、叶片和基础结构承载性能，例如，这可以为计划内维护和设计验证决策提供数据支撑，避免意外停工或发生故障进行昂贵的修理。

测量端子模块适用于恶劣环境

风机的环境负荷和运行负荷会影响动态负载的结构的所有部分。塔基部分的作用是支持风轮发电机（WTG）的载荷，提供稳定性并吸收额外的载荷。塔基的结构健康被认为是自塔顶往下的结构中对风电机组的性能和支持至关重要的部分。海上风机结构的结构健康监测（SHM）系统可以监测风机基础的腐蚀与动态疲劳应力。腐蚀监测虽然是一个重要的测量参数，但其性质决定了它对时间的要求并不高。相比之下，疲劳状态和模态特性监测是风力发电机组结构最重要的 SHM 技术之一。

Pulse Structural Monitoring 为全球可再生能源行业客户提供配备倍福技术的基础 SHM 系统。Pulse 使用倍福的各种 I/O 端子模块集成传感器，因而能够确保在整个结构中进行带时间戳的数据采集。例如，Pulse 采用的 ELM370x 模块是一款 EtherCAT 模拟量输入测量端子模块。这些 ELM 模块具有较高的灵敏度和测量能力，通常用于实验室，也可以集成到工业环境中。此款端子模块可以测量 30 多种不同的电气信号，是一款异常灵活的测量模块，适用于各种传感器。若要精确确定整个结构高度的结构整体性，确保风力发电机组的运行效率，需要在塔筒自身的四个层面上都布置测量点。这意味着需要分布式布署 I/O，使其可以靠近加速计和全桥应变计的安装位置。在塔顶部分，每一层都需要两个 ELM3704 模块采集不同的信号，一个用于通信的 EK1100 EtherCAT 耦合器和一个用于供电的 PS1011 电源。它们都是全封闭的，并在规定的高度上通过磁力吸附在塔壁上，以获取整个塔筒的精确数据。





在温度数据采集方面，Pulse 使用的是倍福标准的模拟量输入 RTD EtherCAT 端子模块 EL3202，它提供的数据可以运行补偿算法。Pulse 在其风力发电机组基础上使用 EtherCAT 及其分布式时钟功能，表明他们致力于实现高精度监测，并由此实现同步数据。这种同步是分析整体结构重要数据的关键，能够以精确时序从沿着结构长边、塔顶以及单桩基础布署的高精度加速计、应变计和温度传感器中采集数据。

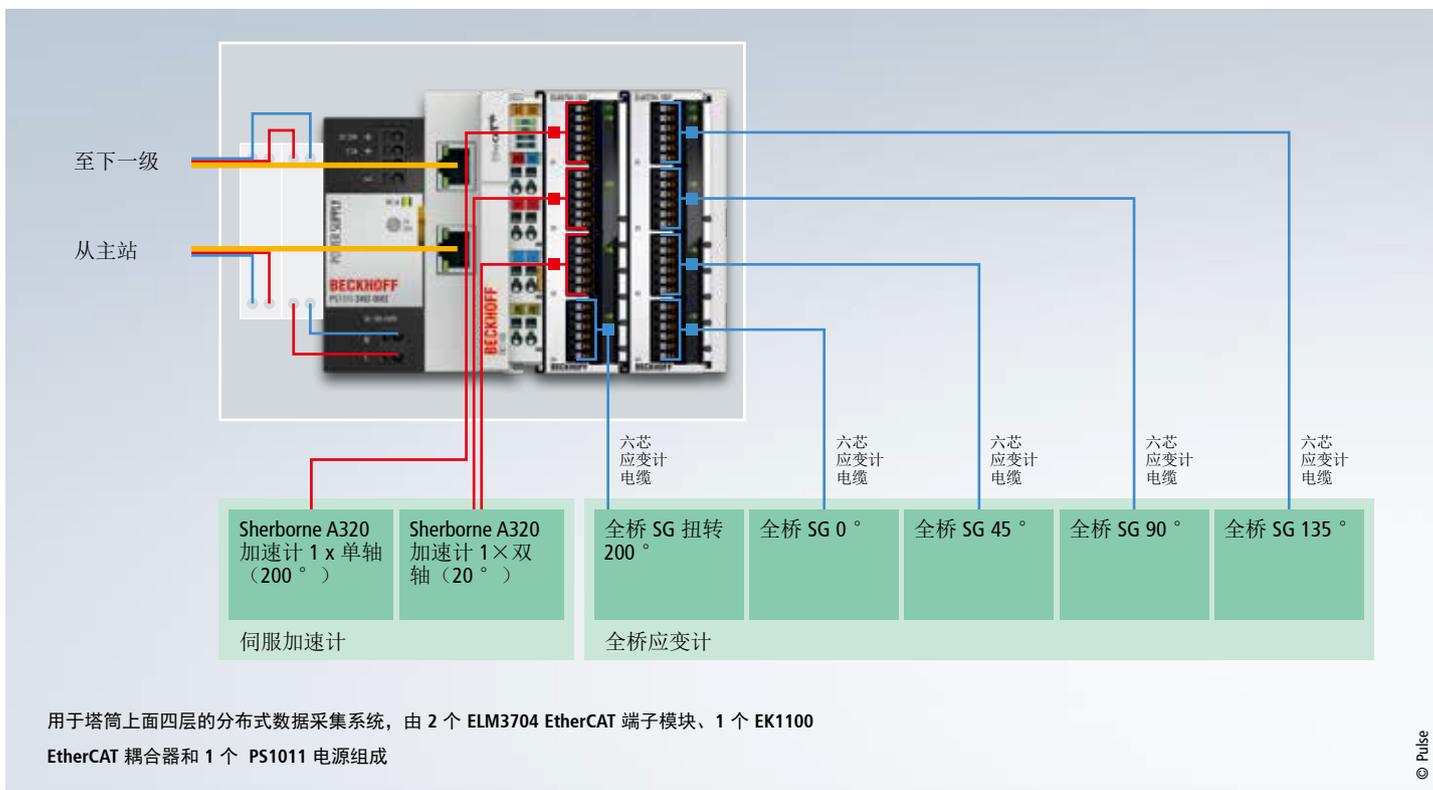
同步数据通信

在通信方面，Pulse 采用了倍福的 EtherCAT 现场总线，并布署了通过一根电缆实现供电和通信的 EtherCAT P 技术。EtherCAT P 和 EtherCAT/Ethernet 供电 (ENP) 有助于规避向塔顶的传感器和分布式 I/O 供电困难的普遍问题。EtherCAT P 和 ENP 系统可以通过一根电缆实现供电和通信，并在整个结构中采用菊花链拓扑结构连接现场总线。Pulse 甚至还加入 EtherCAT 技术协会，开发他们自己的海底数据管理平台 and 基于 EtherCAT 的 INTEGRIpod-NX2 运动监测产品。

“我们这个行业最重要的财富是数据。” Pulse Structural Monitoring 公司解决方案架构师 Stephen Harford 解释道。“EtherCAT 的速度已经很快了，这对于同步和获取我们所需的数据至关重要。并且 EtherCAT 在每个层级都有分布式时钟，让我们能够采取进一步的处理措施并保持完全同步。有了倍福，我们就能够始终保证技术品质。”

Stephen Harford 也很重视合作伙伴关系：“倍福还尽一切努力帮助我们控制紧张的风电场项目进度。他们在每个阶段都积极为我们提供技术支持，当我们因时间紧张无法按时完成项目进度时，他们就会马上派人过来给我们培训。因此我们很希望能与倍福能在其它项目上继续合作。”



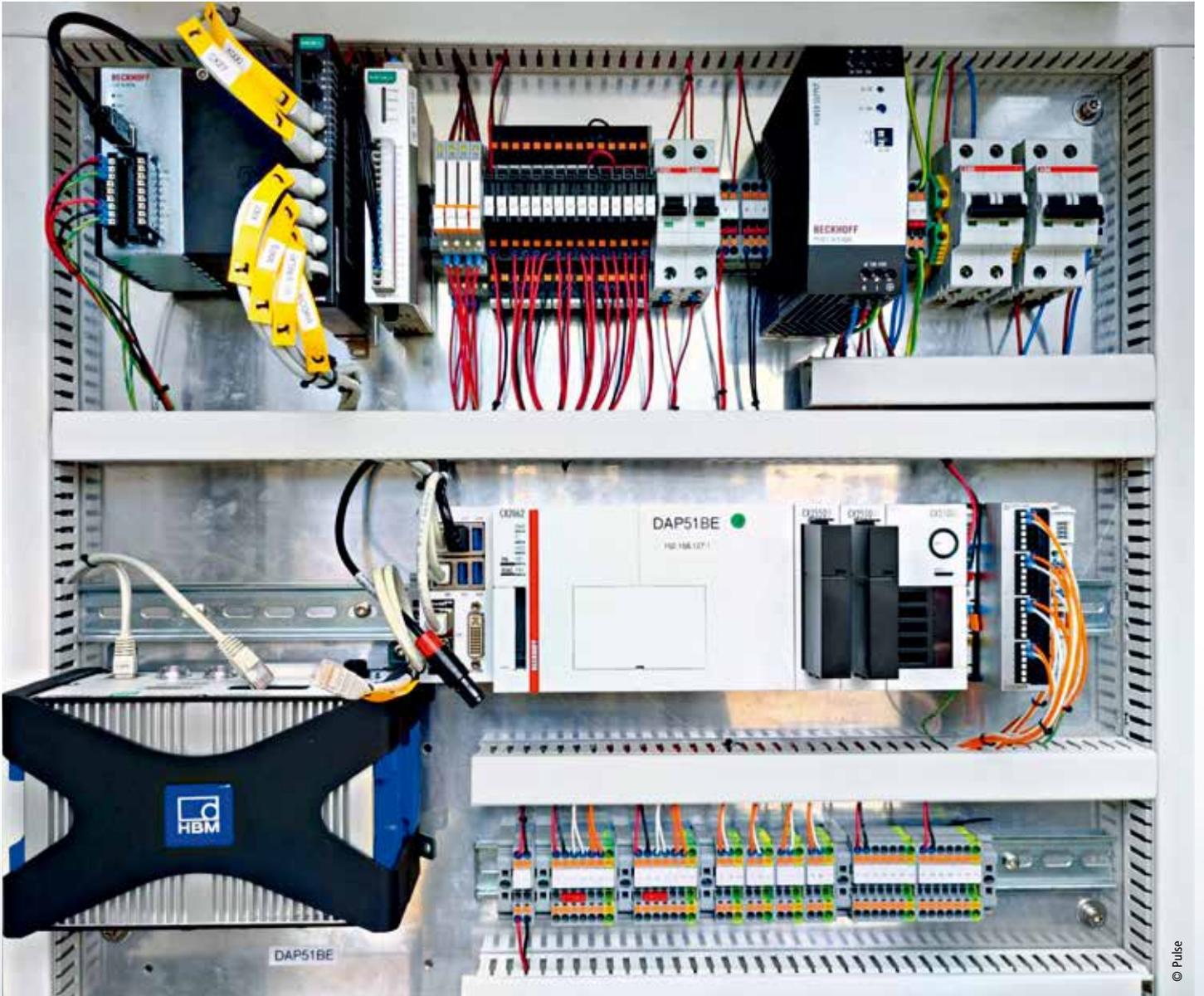


基于 TwinCAT 实现数据管理

一台安装有 TwinCAT PLC (TC1200) 和 Windows 10 IoT 的倍福 CX2062 嵌入式控制器负责集中采集传感器中的所有数据。选择 CX2062 是因为它可以灵活地扩大内存、添加接口和扩展数据处理能力，可以运行 TwinCAT runtime 软件和 Pulse 公司开发的数据管理和处理应用程序。倍福提供了一个开放的免费版 DLL，因而能够通过 ADS 访问 TwinCAT 系统内的所有实时数据。Pulse 既能够使用这个开放式平台分析数据，又能通过该平台将数据直接发送到上位 SCADA 系统中，为进一步了解风机的健康状况提供数据支撑。

倍福英国分公司产品经理 Beth Ragdale 解释道：“这个项目最棒的部分在于，我们可以利用我们以前在可再生能源领域的积累工作经验，向 Pulse 提供我们在这个领域的专业知识。我们还提供了从标准 I/O 端子模块到高精度测量模块的所有产品，并通过将供电和通信整合于一体的单电缆解决方案帮助 Pulse 简化了安装工作。因此我们对双方未来的合作感到非常兴奋。”





控制柜内配备 CX2000 嵌入式控制器和直接插接的 ELM 系列测量端子模块（图片中心）、CU8130 UPS（左上）以及 PS2000 电源（右上）

更多信息：

www.acteon.com/structural-monitoring/pulse

www.beckhoff.com.cn/wind



EtherCAT 测量端子模块助力风力发电机组大直径滚动轴承的状态监测

无缝集成的精密测量和控制技术 提供移动式早期故障检测

CMS Universal 移动式
状态监测解决方案



© cms@wind/Fred-Willenbrock.de

总部位于德国汉堡的 cms@wind 公司主营复杂环境下慢速旋转驱动组件的监测产品，并研发基于结构声的移动式状态监测（CM）系统。系统可检测直径达 4 米的传动机构中缓慢和不规则旋转的滚动轴承的异常情况。在数据采集方面，高精度 EtherCAT 端子模块 ELM3602 使用直接与标准控制技术集成的精密测量技术取代了以前使用的测量硬件。

直到 2018 年，cms@wind 公司的解决方案都一直完全依赖专用的测量硬件。但公司在 2017 年已经认识到高分辨率 EtherCAT 测量端子模块 ELM3602 在评估 IEPE（集成电子压电）传感器方面的优势，公司所有人 Brit Hacke 博士解释道：“ELM3602 能够满足我们应用的所有关键要求。新的测量模块能够在真正的 24 位模式下极为可靠、无干扰地采集 IEPE 输入时的振动时间信号。”

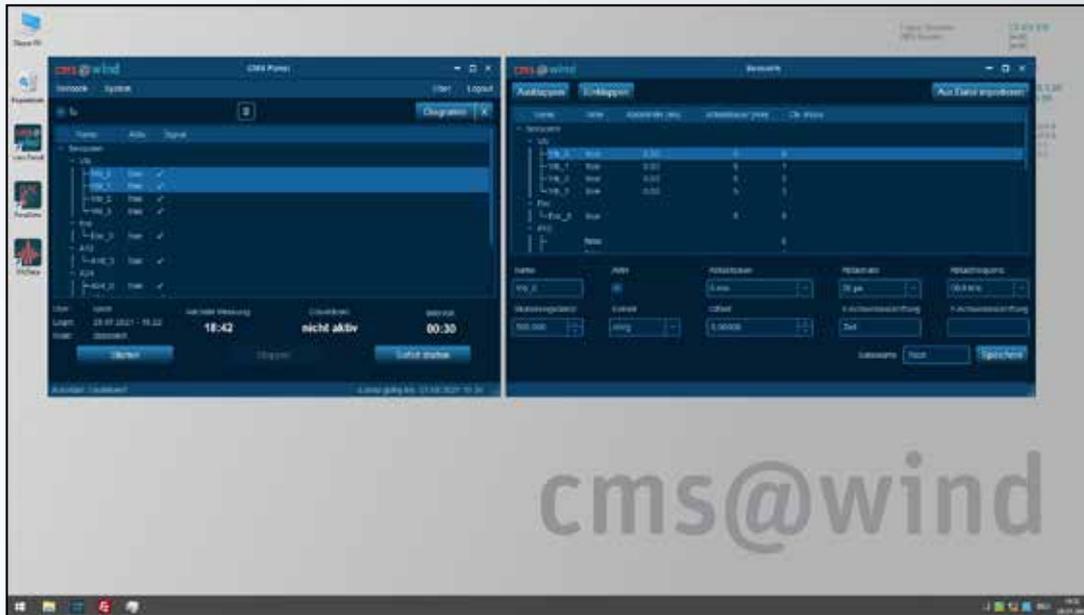
对于缓慢旋转的大型组件，需要长期采集数据，以便通过记录的合理转数，在早期阶段对初期损坏进行可靠的诊断。据 Brit Hacke 博士介绍，测量间隔可以轻松达到 5 分钟，数据由用作计算机硬件的 CX5130 嵌入式控制器可靠地存储，并通过远程访问方便地进行检索。

人性化的风力发电机组状态监测

cms@wind 公司的系统专为风力发电机中的大型组件设计，通常用于在人员难以进出的地方实施测量项目。在可移动式领域的典型应用包括从几分钟到几个月的临时应用，通常在 3 兆瓦以上的风力发电机的保修期结束之前。除了监测具有三级或更多级齿轮的传动系统和高速发电机之外，无齿轮系统的应用已经越来越普遍。

据 Brit Hacke 博士说，客户越来越希望技术人员在现场安装 CM 解决方案，或者将它们迁移到其它系统中。移动式系统可以助力实现这一目标；但直到现在，它们还不具备传统测量技术中常见的人性化和响应式用户界面，这让最终用户很难熟悉。幸运的是，现在，由 cms@wind

通过 CMS 用户界面
简单调整
传感器



© cms@wind

冲击脉冲序列
示意图



© cms@wind

基于 TwinCAT 3 开发的新型 CMS 面板让现场技术人员无需具备先进的自动化专业知识，即可对移动式系统进行专业化的编程，甚至能够在将所有传感器迁移到另一个系统后验证其全部功能。操作菜单与测量技术人员所熟悉的工作环境相对应，在记录时可以随时查看信号曲线。

通过新的用户界面也能够集成更多的传感器。除了在传动系统和滚动轴承分析中使用常用的 IEPE 传感器之外，cms@wind 还将传感器技术应用于时间同步速度监测，使用 MEMS 技术检测低频不平衡，甚至能够根据要求将控制器中的解耦信号整合到项目中，以便能够分配特定事件。Brit Hacke 博士继续补充道：“我们可以通过倍福全面的 EtherCAT 端子模块产品，轻松集成更多的信号类型。例如，在 2021 年

新推出的 CMS 通用状态监测解决方案中，除了 Pt100 信号之外，还提供基于 $\pm 10\text{V}$ 或 $4\text{...}20\text{mA}$ 的模拟量测量信号。具体使用哪种 EtherCAT 端子模块由具体的测量任务决定，例如，可以选择 16 位模式的经典款 EL3104 模拟量输入端子模块，也可以选择 24 位分辨率的高精度 ELM 系列测量端子模块。到目前为止，技术上的限制仅取决于安装空间的大小。”

有了 CMS Universal，除了传统的网络整合之外，还可以通过移动式通信实现远程访问和数据传输。通过 LAN 或 WLAN 连接直接进行现场访问。移动设备目前已经在海上和陆上风电场中使用，解决了这些由风力发电机制造商永久安装的系统给终端客户留下的真正的信息缺失问题。

更多信息：

www.cms-wind.de

www.beckhoff.com.cn/condition-monitoring

www.beckhoff.com.cn/elm3602



可再生能源：嵌入式控制器和 TwinCAT 软件助力控制发电厂

面向未来电网的电网友好型控制方法

德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）的电力系统和高压技术研究所（IEH）正在研究如何确保因向可再生能源过渡而发生变化的输电网的系统稳定性。除了模拟研究之外，发电厂和基于逆变器的发电系统的行为正在被用作专用测试环境的孤岛电网中进行仿真。在这里，研究人员正在运行安装有 TwinCAT 的倍福嵌入式控制器上实施具有创新意义的新型控制方法，以验证它们在真实场景中的应用是否可行。

在很多输电网中，可再生能源发电比例正在逐步增加。与传统的基于同步发电机的发电设备不同，风力和光伏发电设备通过并网逆变器直接将电能输入公共电网；但在使用传统的电网跟随逆变器控制时，基于逆变器运行的资源在超过一定比例时会出现稳定性问题。这就是为

什么需要创新的控制方法，以使可再生能源发电系统的整合不必因此而受到限制。众所周知，这些组网控制方法旨在为逆变器提供电网支撑的行为——100多年来一直与基于同步发电机的发电设备类型相关。其结果包括让风力发电机也具有瞬时储能能力。

通过 TwinCAT HMI 对电网仿真进行操作和监测

电网仿真

人们无法对欧洲大陆互联电网中强烈变化电网频率下的逆变器行为进行研究。IEH 为此建立了一个电网仿真系统，用于仿真大型发电设备的真实行为，因此也可用于仿真大型输电网行为。电网仿真系统包括一个带励磁机的同步发电机，通过一个由驱动逆变器和异步电机（而不是涡轮机）组成的变速驱动系统驱动。轴上还有一个飞轮，以达到与发电设备中的涡轮机相当的惯量。连接负荷可能会导致频率骤降，大型输电网在受到干扰时会出现这种情况。通过实际提供瞬时储备，电网仿真（与电力电子电网仿真相反）允许在孤岛电网中连接的资源对电网频率作出瞬时响应。

倍福的 CX5140 嵌入式控制器用作中央自动化和控制硬件，而各种 EtherCAT 端子模块则用于测量机械和电气变量。两台设备上都安装了编码器来测量旋转速度，这些编码器通过 EL5021 SinCos 编码器接口端子模块进行评估。扭矩可以通过两个扭矩测量轴和一个 ELM300x 模拟量电压测量端子模块确定。EL3783 电力监测超采样端子模块与电流互感器相结合，采集三相电压、电流和功率值。CX5140 嵌入式控制器通过 EtherCAT 与驱动逆变器通信。同步发电机励磁机的励磁由一个 EL2535-0005 脉宽电流端子模块保障。电源接触器由 EL2634 继电器端子模块作为执行器控制。

闭环控制的设计在 MATLAB®/Simulink® 中通过使用基于模型的设计完成，编译后，使用 TwinCAT 3 Target for Simulink® 在嵌入式控制器上实时执行。通过 TwinCAT HMI 实施了一个方便的用户界面来操作试验台，在这里，可以在运行期间实时修改控制参数、设定值和极限值。此外，可以用图形方式显示测量结果和设备状态。TwinCAT Scope View 可用于可视化和记录测量值。

逆变器仿真

针对基于逆变器的发电设备新设计的控制方法的研究需要一个灵活的测试设施，它在如何实施控制方法方面必须具有足够的自由度。由于第一步的重点是对逆变器电网侧进行控制，因此三相逆变器的调制和功率半导体的行为可以通过三个线性电压放大器仿真。在这里，电压放大器被用作受控的理想电压源。逆变器仿真控制柜位于电压放大器和电网仿真的孤岛电网之间。除了控制硬件之外，控制柜中还安装了可调节的主电源滤波器、电压和电流测量装置，以及接触器和断路器等设备。

一台插接有多个 EtherCAT 端子模块的嵌入式控制器也被用作该试验台的中央平台。一台 CX2030 甚至能够以快速循环时间执行复杂的程序。6 个 EL3702 双通道模拟量输入端子模块通过霍尔效应电流传感器采集多个测量点上的三相电压和电流值。电压设定值通过 EL4732 模拟量输出端子输出，并作为电压电平传输给电压放大器。

与电网仿真中一样，在 MATLAB®/Simulink® 中开发和验证的控制方法也可以在 CX2030 上实时执行。主要的不同点在于控制周期短，仅为 50 μs 。加上 EtherCAT 端子模块和电压放大器，整个控制回路的死区时间仅为 150 μs 。试验台也可通过由 TwinCAT HMI 创建的用户界面进行操作和监测。此时最重要的是对极限值的快速监测，如果超过了限值，就会导致安全关断。



对于逆变器仿真，CX2030 嵌入式控制器可以实现 50 μs 的短控制周期

测试环境

逆变器仿真与电网仿真相结合，可以构成一个孤岛测试环境，可以轻松对新的组网控制方法的行为进行研究。研究所已经对“同步逆变器”控制方法，即利用逆变器仿真同步发电机的行为，进行了研究并公布了研究结果。实验表明，配备合适控制系统的逆变器式发电系统可以提供瞬时电能储备，为电网提供技术支撑。这也可以证明，与实时模拟器相比，可以使用已在工业环境中得到成熟应用的控制平台实现组网控制。

展望未来，研究所将继续开发组网控制方法，以将其用于基于逆变器的操作设备中，如风力发电机。由于基于逆变器仿真的研究取得了成功，一个代表风力发电机驱动系统的试验台正在建立中，该试验台由一个发电机和缩减性能的全逆变器组成。这里的重点将放在风力发电机中所使用的部件的应用，如控制硬件和功率半导体，将继续研究如何能够在风力发电机中实施组网控制系统。

出版物：

- 1) Schulze, W. et al.: 使用实时 PC 和四象限电压放大器对组网逆变器进行仿真。Forschung im Ingenieurwesen [Engineering Research] 85, 425–430 (2021)。
- 2) Schulze, W. et al.: 电网频率影响仿真，用于分析发电机组组网逆变器。在第 55 届国际大学电力工程学术会议 (UPEC) 上，意大利都灵 (2020)。

更多信息：

www.ieh.kit.edu

www.beckhoff.com.cn/wind

基于 PC 的控制技术与应变传感器结合，监测风力发电机的风轮叶片

状态监测直接集成到控制技术中

从底层的应变传感器到控制和管理层的全数字化测量链是实现高性能、集成式风机状态监测的前提。来自汉堡 Leine & Linde 公司的市场营销副经理 Matthias Finke 在接受采访时，解释了这一切是如何在结合 ESR 应变传感器与基于 PC 的控制技术的情况下实现的。



ESR 应变传感器有什么特点？

Matthias Finke: ESR 系列应变传感器可以永久或临时测量几乎所有大型结构件的应力，特别是在风机风轮中的使用，以支持调节单个叶片。其它应用领域包括起重机负载监测、材料检验和应力测试。该系列传感器的核心部件是光电编码器，已经在很多行业领域取得成功应用。在这方面，特别值得一提的是，它不仅在机械结构上坚固耐用，而且具有超高的传感器分辨率（ $0.025 \mu\text{m}/\text{m}$ ）。此外，它还提供超宽量程，测量范围达到 $\pm 5000 \mu\text{m}/\text{m}$ ，最大传输速率也高达 30 kHz，因此既可支持静态应用，也可支持高动态应用。一个高度集成的专用集成电路（ASIC）在传感器中直接将信号数字化，实现低信噪比。标准的 EnDat 2.2 接口允许传输所包含的电子铭牌，确保全面的诊断能力。因此，ESR 系列传感器代表了数字应变测量的下一个发展方向，是集成式状态监测的理想基础。

EnDat 2.2 接口具体有哪些优点？

Matthias Finke: EnDat 2.2 可以助力实现从底层的单个应变传感器直到控制和管理层的全数字化测量链。该接口具有以下功能的特点：可以在需要时用高确定性的方式以高达 30 kHz 的速率在长达 100 米的电缆上实时传输数据。作为一个双向接口，它既能够读取传感器中的数据，也能够将数据传输到传感器中。该接口基于成熟、性能强大的 RS485 物理层，因此对外部干扰不敏感。循环冗余检查（CRC）可以确保数据的安全传输，可靠地检测出任何错误和故障。

相关的网关结构是怎样的？

Matthias Finke: 我们对网关的理解是，多个 ESR 应变传感器的信号可以借由 EnDat 2.2 接口通过现场总线传输。在这方面，相关的总线耦合器和 I/O 端子模块是安装在现有控制柜（如变桨系统）的 DIN 导轨上，还是作为一个防护等级达到 IP65 的独立解决方案安装在叶轮叶片根部，这并不重要。网关方案的优势在于，系统设计尽可能简单、坚固耐用和经济高效。倍福的 EnDat 2.2 接口端子模块 EL5032 设计非常紧凑，可以连接两个应变传感器，为实现这种方案提供了理想的支持。在需要使用多个应变传感器的系统设计中，这种小体积特别有利。此外，EtherCAT I/O 端子模块与 PROFINET-RT 总线耦合器 EK9300 满足了我们对质量和可靠性的严格标准要求。

你们在总线耦合器和 EnDat 接口的应用方面有哪些实践经验可以分享？

Matthias Finke: 我们在风机上的应用体验非常棒，特别是风轮叶片根部区域的安装位置。就 ESR 传感器和 PROFINET 接口与上一层数据记录系统的连接而言，系统调试工作非常简单。这在连接应变传感器方面尤其如此，因为不需要代表 EnDat 2.2 进行单独调试。

哪些软件功能可用于评估 ESR 数据？

Matthias Finke: 我们认为自己是这个应用领域的传感器和系统供应商。我们提供可扩展的解决方案，它包含了从 ESR 应变传感器到 EMS 应变测量系统的多个单独应用。如果全部使用 ESR 系列，可以完全访问每个传感器的测量原始数据，而 EMS 加上风机上安装的硬件组件可以提供数据真实性和监测功能以及校准和计算弯矩的功能。C++ 函数数据库 ESR eXtended 非常适合用于这种可扩展解决方案。我们为 TwinCAT 3 软件免费提供这个库。ESR eXtended 既支持串联应用的系统控制，也支持频繁变化的测量活动。时间同步性、信号可靠性和系统可维护性与传感器信号和所生成的信息相关，对于在系统控制中的使用有决定性的影响。ESR eXtended 通过以下功能为此提供支持：完全集成在 PLC 项目中，包括所有的任务类别，评估传感器的自我诊断，在线检验测量值的真实性和自动导入传感器中集成的数字铭牌。测量项目中的集成、可重复性和简单的文档编制等因素对于在测量活动中的使用



Leine & Linde 专注于风力发电机主要部件的状态监测

© Zentilia - stock.adobe.com
© Leine & Linde

ESR 系列应变传感器



尤为重要。任务类别集成的测量值查询，包括同步的时间戳，在这里也有帮助。

TwinCAT 的哪些功能对你们特别有利？

Matthias Finke: 我们使用 TwinCAT 3 作为开发环境创建 ESR eXtended。尤其是通过 TwinCAT 3 还可以为我们的功能库提供一个数字签名，确保为用户提供高品质和可追溯性。另一个切实的好处是，它可以集成在被广泛运用的 Visual Studio® 工具中，简化熟悉过程。TwinCAT 对 C++ 的支持同样也简化了功能库的实施工作。

总体来说，倍福基于 PC 的控制技术为你们带来了哪些优势？

Matthias Finke: 在这里，基于 PC 的控制技术具备的良好开放性最为重要。例如，这意味着即使没有 TwinCAT 开发环境也可以访问硬件，从而能够更轻松地修改基本设置或访问诊断功能。此外，它还为创建图形可视化提供最佳支持，因为在这里可以使用人们熟悉的开发工具。从风机制造商的角度来看，基于 PC 的控制技术允许在系统控制中直接集成状态监测功能。这非常有必要，因为处理器密集型算法经常被用于结构监测。因此，可以构建能够监测包括发电机和风轮在内的整个传动机构的全面监测系统，它与系统控制并行运行，并使用相同的硬件。

截至到目前，你们在具体的客户项目合作上有什么经验可以分享？

Matthias Finke: 在现场总线网关方面，我们已经使用 ESR 应变传感器和 EnDat 2.2 接口端子模块 EL5032 完成了一些测量项目。我们与客户的每一次合作都很愉快，尤其是在快速集成和调试方面。一名使用过 TwinCAT 3 的用户只需 5 分钟就可以开始一个测量项目，其中所有关于测量值、诊断和文档编制的信息都已被记录并以数字方式处理。

采访人：倍福全球风电行业经理 Dirk Kordtomeikel。

更多信息

www.leinelinde.com/wind

www.beckhoff.com.cn/wind

打造解决方案延长风力发电机组（WT）的使用寿命

基于 PC 的控制技术，结合传感器和风力发电专业知识延长风力发电机组的使用寿命

到 2020 年中期全球风电累计装机容量已经超过 650 GW，这是一项具有里程碑意义的成就。然而要让风力发电机组长期成功运行仍然是一个重大挑战：未来五年内，德国、丹麦和西班牙安装的风力发电机组中有三分之一以上将达到预期使用寿命。鉴于此，能够优化风机并延长风机使用寿命的解决方案，如由 fos4X 和 aerodyn 公司共同开发的变桨控制系统改造和完整的叶片状态监测系统，为风电行业的发展提供了重要方向。

总部位于慕尼黑的 fos4X 有限公司成立于 2010 年，是一家业内知名企业，专业研究包括机器学习在内的数据驱动方法的使用，对新增风机和存量风机进行数字化和优化。其智能解决方案基于当今性能最好的最新一代风机系统中部署的强大的光纤转子叶片传感器技术。总部位于德国伦茨堡的 Aerodyn Energiesysteme GmbH 公司是一家专门从事风力发电机（WT）系统和转子叶片开发的工程公司，提供风力发电机组的再设计和优化服务，并授权其风力发电机组的设计给第三方。公司的产品系列基于其模块化 aeroMaster 技术，一种具有电动变桨控制和变速发电机/变流器的三叶片设计。

可使设备效率最大化的延寿解决方案

延寿解决方案有助于延长风力发电机组的使用寿命，同时显著提高总电能收益率。尤其是在受到管制不能进行旧风电场改造时，延长风力发电机组的使用寿命有时是保护风电场的唯一途径。延长风机的使用寿命还可以提高风电项目的财务吸引力，并降低发电成本。以下维修和停机数据及其财务影响充分说明了这一点：

- 转子叶片故障约占所有风力发电机组故障的 7%，维修可能非常耗时，导致停电时间持续数周
- 实地经验表明，风力发电机部件很可能在其预期使用寿命结束之

前发生故障，这意味着通常需要预留适当的维修预算

- 在 10 年的时间里，平均有 2% 的风力发电机需要完全更换叶片。因此，监测转子叶片结构状况的能力变得越来越重要，特别是因为叶片的购置成本占风机系统总成本的 15%-20%。

最终，考虑的关键是延长风力发电机组使用寿命的项目能带来什么样的经济效益。延长风力发电机设计寿命的方法之一是减少主要部件的负荷，从而在不影响收益的情况下延长相对使用寿命。例如，转子叶片根部的损伤等效载荷如果能减少 10%，使用寿命就会延长 50%。因此，如果一个系统在其投入运行的第 10 个年头接受了改造，减少其转子叶片根部 10% 的损伤等效载荷，其使用寿命就会延长 5 年。

全面的负荷监测可以让风电场运营商持续跟踪离散事件对转子叶片使用寿命的影响。同样的指标可以作为了解同一风电场内各个风机性能差异的指标，让运营商能够识别疲劳程度较严重的风机中的尾流效应（由滑流中的尾流引起），以及由于转子叶片固有频率的跟踪波动、转子负荷不均匀导致的偏航和变桨故障造成的损坏。

Aerodyn 公司的风力发电机组
基于模块化的 aeroMaster 技术



© aerodyn

建立在综合专业知识基础上的解决方案

fos4X 的解决方案通过以下方式降低风机的发电成本：

- 提高年发电量
- 降低运营成本
- 最小化运营风险
- 延长使用寿命

这些解决方案的重点是转子叶片传感器和数据分析。fos4X 公司销售总监 Bernd Kuhnle 说道：“在我们与 aerodyn 联合开发的解决方案中，我们提供硬件平台和流式分析，作为优化风机运行和延长使用寿命的不同方法的基础。风力发电机组配备了我们经过现场验证的传感器系统，该系统安装在转子叶片内，以保护其免受环境影响。传感器在整个风力发电机组使用寿命期间内可靠地提供有价值的数

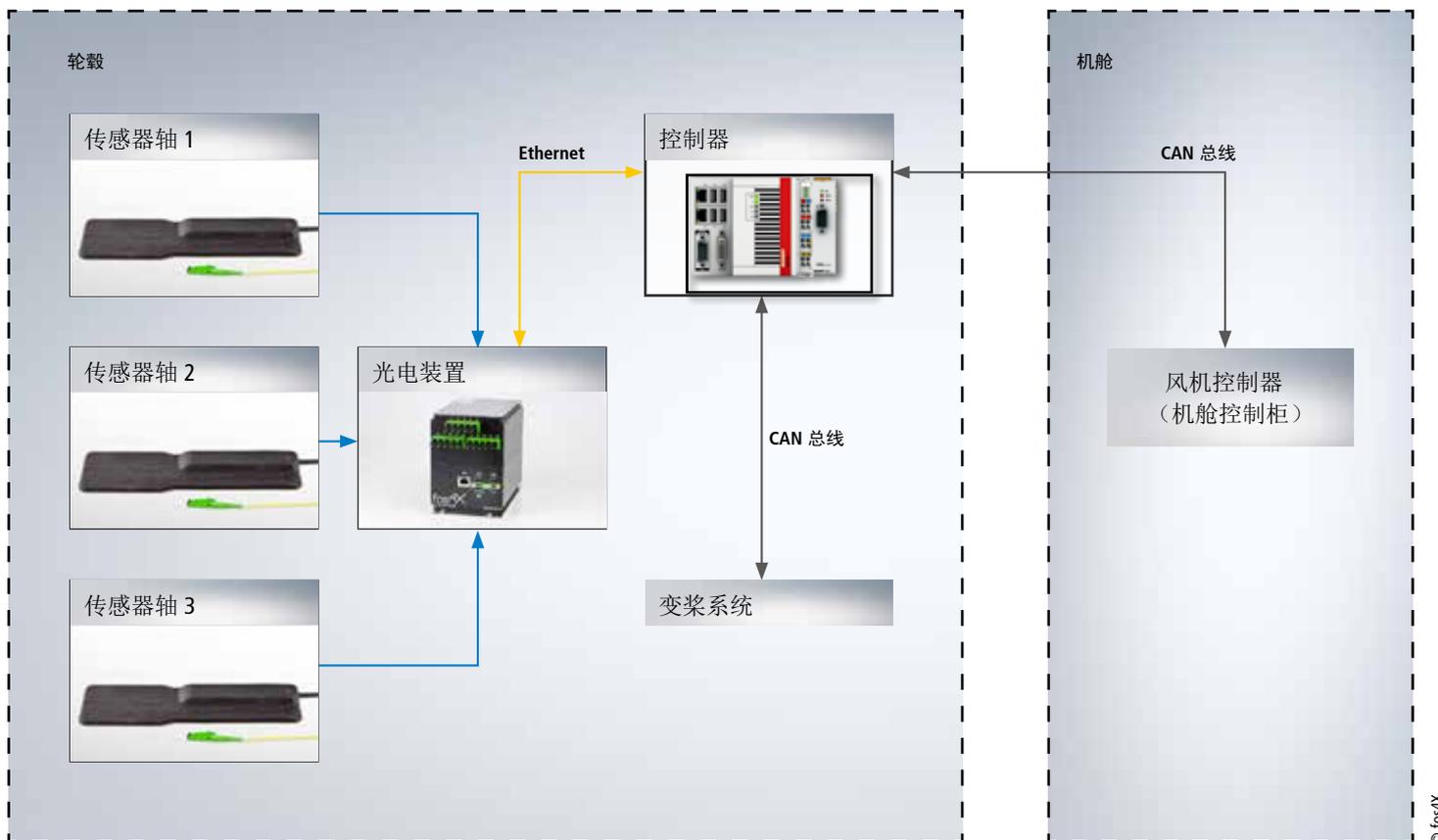
据。”
在系统正常运行期间，使用 fos4X 开发的算法对解决方案进行自主校准。就像数字双胞胎一样，fos4X 系统可以生成后续处理所需的高质量数据。Aerodyn 读取采集和生成的实时数据，并使用独立变桨控制方法调整每个转子叶片的迎角。



© fos4X

对于 fos4X 公司销售总监 Bernd Kuhnle 来说，基于 PC 的控制技术具备的良好开放性是关键

但该系统除了 aerodyn 的独立变桨控制方法外，还提供更多的增值服务：虽然基础版本只测量负荷，但它可以在系统的剩余使用寿命内



fos4X 解决方案如何与风机控制系统相结合

生成负荷历史记录。此外，fos4X 可以从采集到的负荷数据中检测出偏航和变桨故障。排除这些故障可以提高发电量，减少磨损。该解决方案还可以监测叶片的状态，确定是否有损坏或积冰。这些功能使得该解决方案成为世界上第一个能够实现全面的转子叶片监测的解决方案，同时为数字双胞胎和预测性维护提供重要的数据。

实施独立变桨控制方案

若要实现变桨控制，需要采集各种数据，包括作用在风力发电机上的力，最好直接在转子叶片上测量这个力。为了实现这一点，fos4X 在风机叶片内安装了传感器，这一过程通常只需一天即可完成。它可以连续采集负荷数据，并将数据传输到 aerodyn 的变桨控制系统中。

改造系统中为特定目的设计的算法可以让每个转子叶片都能单独、实时响应负荷波动，并在产生负荷时进行补偿。这样可以大大降低所承受的有效负荷，有利于减少对各个风机部件的磨损并提高部件的耐久性。负荷控制通过根据叶片负载连续计算所需迎角的

aeroBalance 方案实现。Aerodyn 公司塔筒设计部的 Timm Daunke 详细解释了这一问题：“自我监测程序确保负荷总是减少，或至少不会超过无独立变桨控制时的水平。这意味着风机不需要返修，也不需要修改风机的控制参数。负荷控制过程在风机控制系统和变桨系统之间使用的是非安全型总线通信，它会使得风力发电机组在内部系统出错时仍旧自动激活旁路模式并继续运行。”

集成状态监测功能的控制系统

但若想真正进入风力发电机组的控制系统，必须确保通信安全。Bernd Kuhnle 认为，这正是倍福作为战略合作伙伴的优势所在，在这里，基于 PC 的控制技术具备的良好开放性起到了核心作用。特别是现有的风力发电设施通常使用的是由不同供应商提供的不同组件的组合，能够与已经部署的设备集成非常关键。基于 PC 的控制平台是一个支持包括 EtherCAT、CANopen、PROFIBUS 和 PROFINET 在内的所有通用现场总线标准的开放式平台，它可以轻松、灵活地与任何类型的解决方案集成。模块化硬件与 EtherCAT 的高速通信能力和灵活的拓扑结构相结合，系统可以完全满足各种需求。

Fos4X 的解决方案作为 EtherCAT 从站运行，因此可以非常简单地集成到基于 PC 的控制系统中。它可以很轻松地与任何其它控制系统集成，既适用于现有风机改造，也适用于新风机系统的安装。如果需要，系统还可以使用倍福的 EtherCAT 模块进行模块化扩展，例如，采集应变、振动和温度信息。

Aerodyn 开发的控制器以 TwinCAT TcCOM 模块的形式呈现，这意味着它可以在任何安装有 TwinCAT 3 软件的嵌入式控制器或控制柜式 PC 上运行。TwinCAT 同时也简化了与 fos4X 传感器的连接。此外，通过添加用于 OPC UA、IoT 和数据库连接等 TwinCAT 3 功能，可以毫不费力地与现有的 SCADA 系统集成。

更多信息：

www.aerodyn.de

www.fos4x.com/en

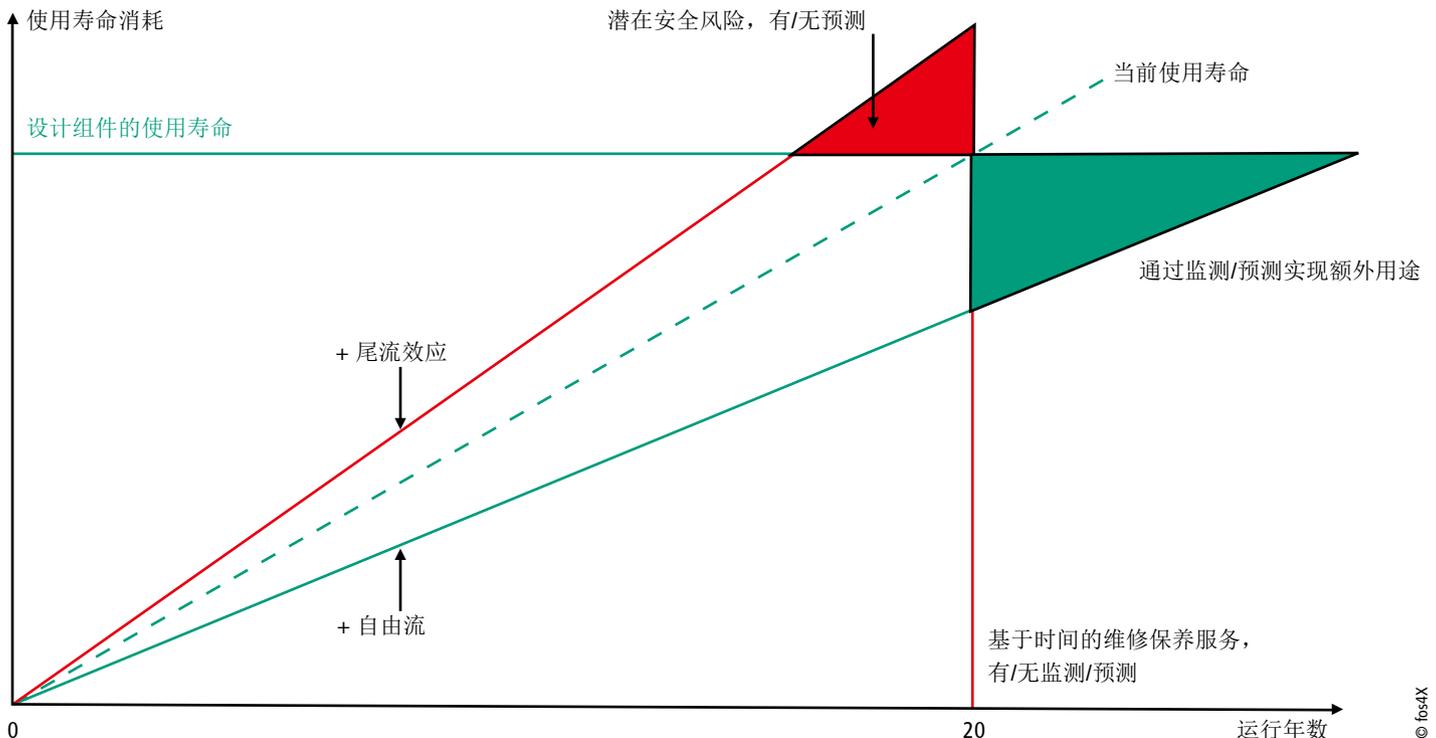
www.beckhoff.com.cn/wind

Aerodyn 采用 TwinCAT Wind Framework 设计风机

Aerodyn 的 aeroMaster 5.0 最初是在 2014 年的一个初始项目中实施的，它是第一个使用倍福 TwinCAT 3 软件和全新的 TwinCAT Wind Framework 的风机系统。基于 Wind Framework 的模块化控制软件与风机的模块化硬件完美匹配，其设计允许从不同的供应商处采购变桨控制器、变流器和发电机等组件。TwinCAT 3 Wind Framework 将控制技术与行业特定的专业技术统一封装在一系列软件模块和应用模板中。这些模块为风机自动化提供全面的服务，实时访问各种数据并将数据长期存储在数据库中。应用模板采用的是模块化架构，旨在实现高效、高度集中的开发环境，并让用户能够快速、轻松地上手。

更多信息：

www.beckhoff.com.cn/twincat-wind





在线故障诊断功能可大大提升风力发电机组的可利用率

TwinCAT Wind 和超采样技术 助力实现高效的状态监测

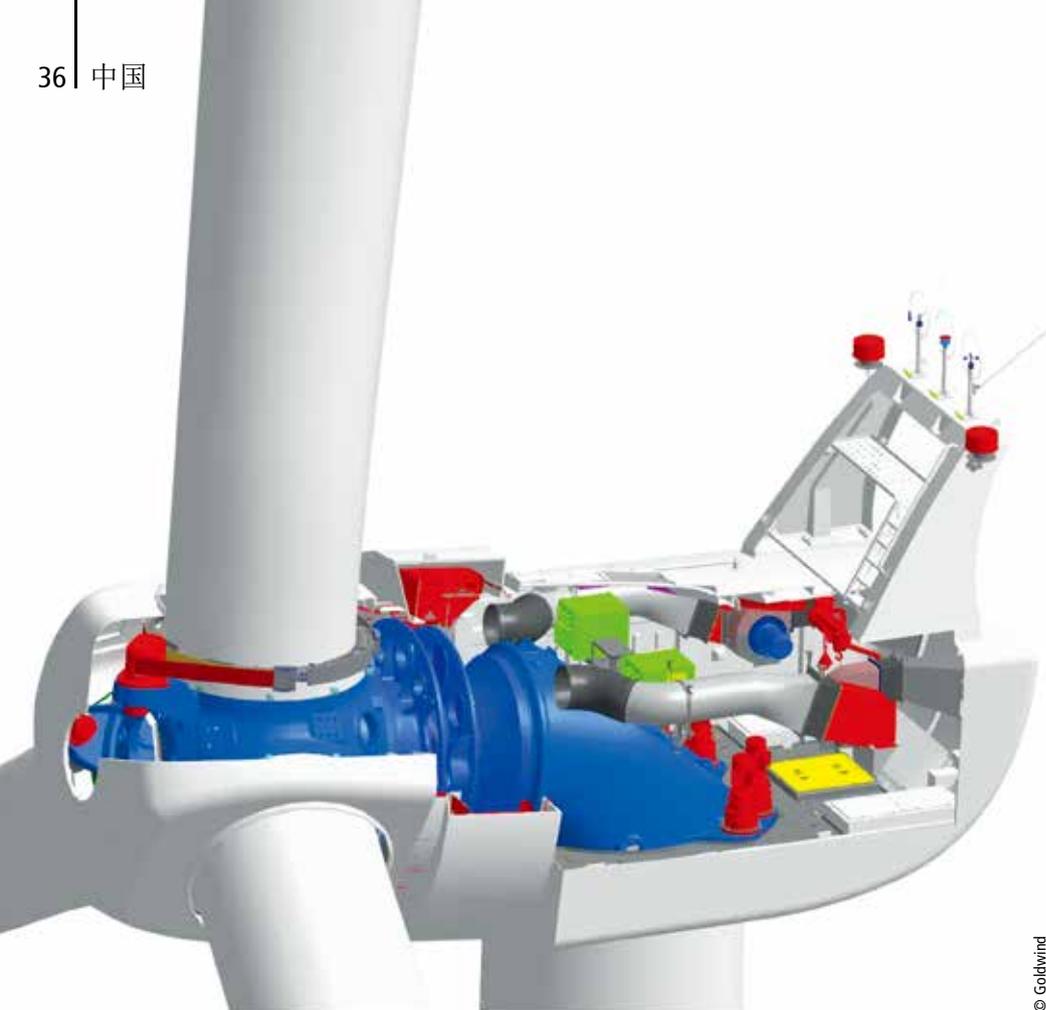
对于当今的风力发电机组，特别是输出功率达到兆瓦级的风力发电机组来说，保持高可利用率是重中之重。因此，中国最大的风电整机制造商金风科技研发了一套全新的在线状态监测系统，该系统的所有功能都基于倍福的 PC 控制技术和 EtherCAT 技术。控制平台可以实时通信，降低维护成本，提高风机的可利用率。



© Goldwind

倍福将持续助力金风科技持续完善风力发电系统，
推动发展廉价、可靠、可持续的未来能源

金风科技很早就在其风机中加装了状态监测系统，以远程监测并确定各个系统组件的运行状态。通过使用合适的传感器，状态监测系统（CMS）可以获取和分析噪声、振动和温度数据等，并及时预警各个组件可能出现的故障。机组运行人员或维护人员可通过方便的可视化人机界面得到风电场运行期间风机相关部件出现的异常信息，预测将会出现的故障并及时做出相应的维护处理，从而提高风机可利用率，避免部件严重损坏或发生大的故障。尤其是对于交通不便的海上离岸风电机组，在线状态监测系统是必备选项。



© Goldwind

基于 TwinCAT Wind Framework 软件的预测性维护功能使用超高速 EtherCAT 通信来监测风力发电机组机舱中的主要部件（此处是直驱风机），例如叶轮叶片、轮毂、变桨系统、发电机转子、发电机定子、齿轮系统、测风系统以及底板和塔架

金风科技： 专注于可持续发电

金风科技成立于 1998 年，是国内最大的风力发电机组整机制造商之一，成立至今实现全球风电装机容量超过 44 GW，交付了 28,500 台风力发电机组。现在，金风科技已成为德国风机设计公司 Vensys 的大股东，致力于成为国际化的清洁能源和节能环保整体解决方案提供商。金风科技多次入选“全球最具创新能力企业 50 强”，荣登 2016 年度“全球挑战者”百强榜。

在用户方面，原有的状态监测系统是一个黑匣子，软件在开放程度上受到了制约。另一个缺点是，无法同步采集振动数据与风机的工作数据（例如风速、发电机转速、偏航角度、桨距角等）。此外，随着装机量的提升和风机的智能化发展，原有的状态监测系统对于风机状态的分析受到了很大限制，因此系统已不能满足技术和市场的要求。

显著提升风机可利用率

金风科技多年来一直使用开放式自动化技术。金风科技从 2014 年起借助于倍福基于 PC 的控制技术开始着手研发全新的在线状态监测系统。目标是保持风力发电机组在全生命周期内的成本竞争优势，降低风机的故障率，降低维护成本，缩短停机时间，最终提高风机的可利用率。

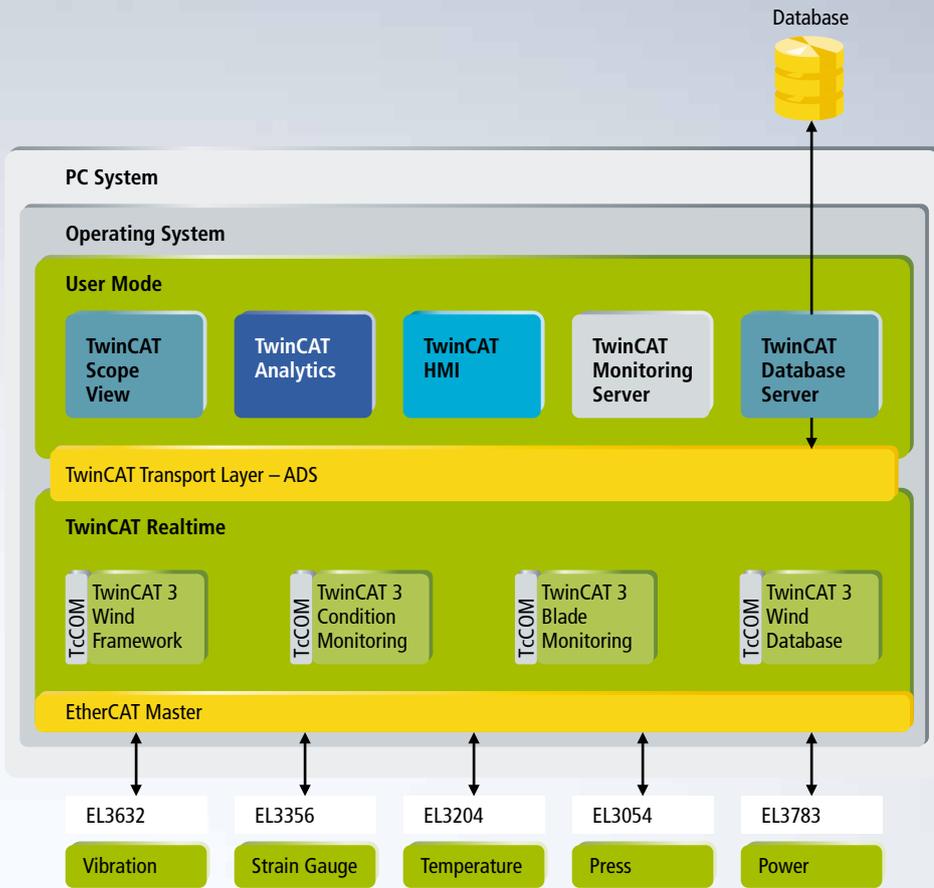
针对大兆瓦风机，金风的相关研发部门对风机工作状态进行系统性的全面分析和计算，并得出了明确的结论：为了同步采集发电机轴承上的所有状态数据，包括高频的加速度数据，我们在现有的传动链状态监测系统基础上开发了最新最先进的状态监测系统。新系统不仅能够采集叶片轮毂振动及应变数据，而且还能够同步采集风机

发电机轴承、风机塔筒振动及应变数据，系统通过风电场网络将这些数据传送给数据库服务器。

智能风机的实时解决方案

金风科技开发的基于倍福的 TwinCAT 3 自动化软件的在线状态监测系统可以独立运行。状态监测系统使用的控制系统架构和功能组件如下：

- 采用 64 位操作系统 Windows Embedded Standard 7 并搭载 Intel Atom® 多核处理器（时钟频率为 1.75 GHz）的 CX5130 嵌入式控制器用作状态监测系统的核心控制器
- 通过具有超采样功能的 XFC EtherCAT 状态监测端子模块（IEPE）EL3632 采集发电机轴承振动和加速度信号，采样率高达 50 ksamples/s，各通道的同步精度都 <100 ns。用户可以根据具体需要对采样率和超采样因子进行参数设置
- 通过 TwinCAT ADS 通信同时采集风机的所有状态数据
- 通过控制器中的 TwinCAT Wind Framework 同步采集原始数据和工况数据。原始数据及其计算结果由 TwinCAT 数据库服务器直接保存在本地的关系型数据库中
- 利用 TwinCAT 状态监测功能库中的流式算法实时在线分析功率谱



基于 TwinCAT 的 CMS 系统实时在线采集发电机轴承的振动数据，并通过 TwinCAT Wind Framework 快速存入本地数据库

© Goldwind

应用概览:

可持续能源生产解决方案

- 风力发电机组的在线状态监测

为客户带来的好处

- 减少维护需求，提高系统可用性
- 连续采集振动和应变数据，包括远程访问功能

PC 控制结构

- CX5130: 嵌入式控制器是 PC 控制产品中可精细扩展的系列，可以完美适应各种应用场景
- EL3632: 采用超采样技术实现高精度信号数据采集
- 包括 Wind Framework、Condition Monitoring 和 Database Server 在内的 TwinCAT 3 软件: 同步实时采集所有数据

和力矩系数等数据。分析结果实时输出到数据库中，同时反馈给风机的主控系统，为智能风机提供智能化的诊断数据

- 所有信息都可以存储在本地或远程数据库中。金风科技认为，状态监测服务器可以通过数据库远程访问各风机的原始数据及计算结果，这在传统的 CMS 系统中是不可能实现的

倍福软件的开放性及其控制技术的灵活扩展可以为任何状态监测系统带来特别的优势。这一点非常重要，因为没有两台风机的设计是完全相同的，风机专用控制软件的各项功能必须能够快速并最佳适应具体的需求。通过模块化可扩展的功能可以快速添加各个软件功能，可以进一步简化调试工作，快速实现数据同步采集、实时通信及故障点数据跟踪。所有这些功能都显著简化了数据库结构搭建及数据存储。

PC 控制系统: 针对状态监测的理想平台

金风负责 CMS 项目的高级工程师黄晓芳总结道: “基于倍福技术的状态监测系统便于未来的系统扩展升级，集成于主控系统中的 CMS 更具成本优势，是智能风机的理想解决方案。”

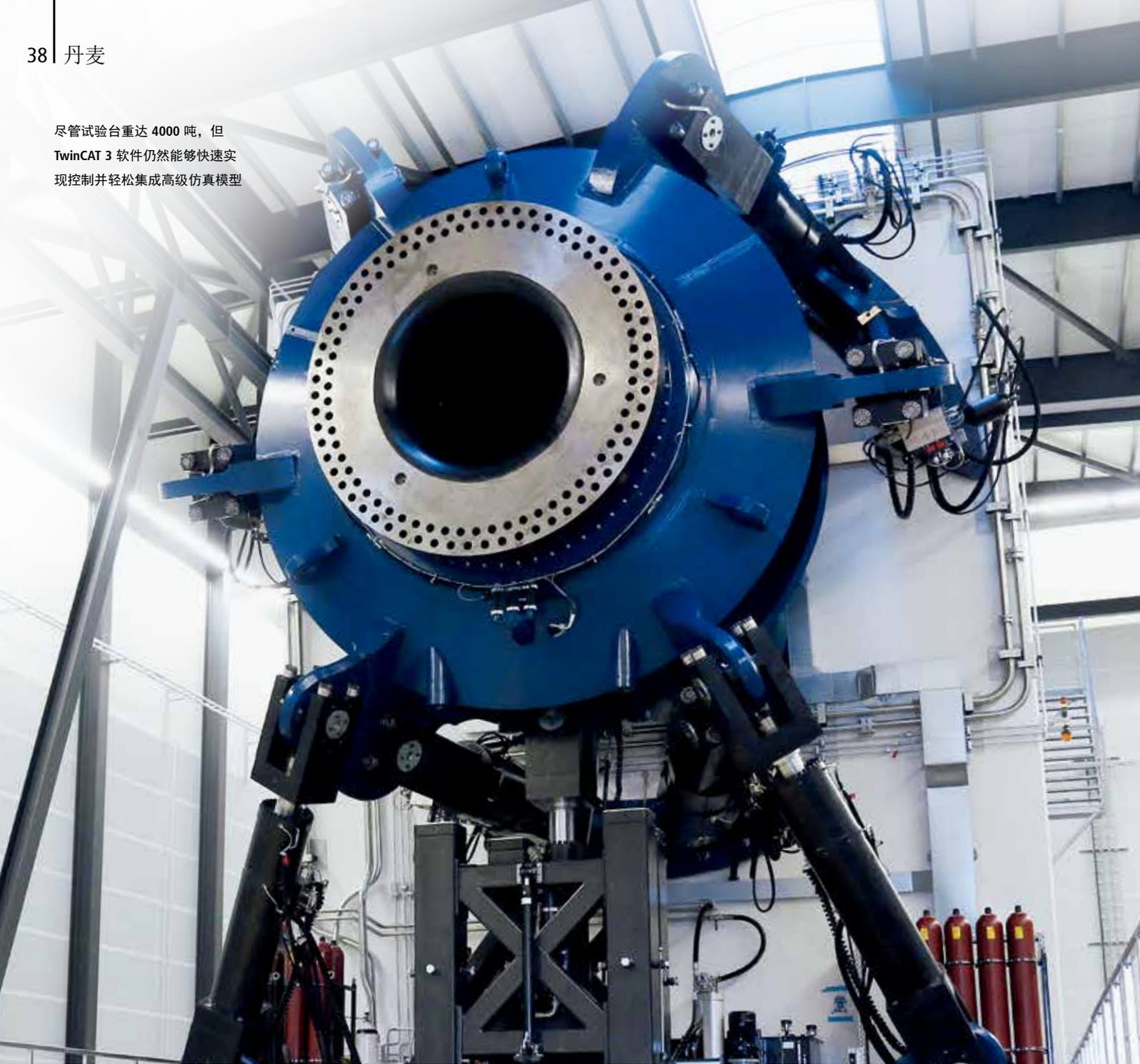
黄晓芳继续说道: “CMS 可以与风机实时通信，可以同步采集风机的运行数据和状态监测结果，提高了数据的可分析性和可用性。由于倍福平台具有极高的性能，可以实时采集、实时存储和实时分析连续的状态监测数据。因此，可以对风力发电机组持续进行健康检查并对关键组件的状态实时进行预警。”

更多信息:

www.goldwindglobal.com

www.beckhoff.com.cn/wind

尽管试验台重达 4000 吨，但 TwinCAT 3 软件仍然能够快速实现控制并轻松集成高级仿真模型



TwinCAT 3 控制用于 10 兆瓦风机的 HALT 试验台

风力发电 HALT 试验台实现严格测试

丹麦正在为风机组测试技术建立一项新的标准。丹麦林都海洋可再生能源中心（LORC）能够测试风机机舱在其超过 25 年的使用寿命期间可能承受的所有风荷载和扭转力矩。他们采用倍福的自动化技术实现试验台控制。

随着风机的体积越来越大，造价越来越昂贵，对于在整个使用寿命期间最小化损坏风险的需求也逐步增加。这就需要在开始批量生产一款新一代风机之前在真正的风机上进行载荷测试。2017年12月在丹麦蒙克博上线的全球最大的风机组（最大10兆瓦）试验台 LORC 的使命就是提供最严格的高加速寿命测试（HALT），大型风力模拟器使用机械功能、液压功能和电动功能在6个月内生成风机在其整个25年使用寿命期间所要承受的压力和应力。这类测试有助于识别设计和结构方面的缺陷，以便在批量生产风机之前能够进行必要的修改。

拥有真实试验环境条件的试验台

丹麦工程公司 R&D Test Systems 是此设施的交钥匙供应商，负责实施整个项目：从设计和开发机械组件一直到编程和调试。复杂的开发和实施过程需要很多年才能完成。为了确保调试过程平稳进行，并保证试验台性能稳定可靠，必须对所有功能进行彻底的模拟和测试。仿真模型和测试结果用于进一步开发软件以及给操作人员进行培训。

在测试中心，根据来自世界各地的风电场的风力和天气数据对风机的机械部件进行真实的疲劳测试。倍福丹麦分公司的总经理 Michael Nielsen 解释说：“模拟真实环境条件的能力对于风电及其它采用重型解决方案的行业来说越来越重要。从长远来看，如果制造商们能够知道风机在实际应用中会有怎样的反应，就可以帮助他们节省许多资源。”倍福通过 TwinCAT 3 软件、功能强大的工业 PC 和各种 EtherCAT I/O 端子模块为所有测试场景的规范和监控提供了基础。丹麦控制柜供应商 Tricon Electric A/S 安装了这些组件。

每一台新开发出来的风机都必须作为一个完整的系统进行测试。考虑到现代风机的尺寸庞大，想要进行测试非常困难，因此制造商们自己测试机舱，在试验台上尽可能逼真地模拟转子、电路及其它环境条件的影响。为了映射影响主涡轮轴和机舱的所有力因数和扭矩因数，新的 HALT 试验台需要采用独特的设计。建造这样一个长 31 米，宽 8 米，高 13 米的设施，需要使用 310 吨钢和 107 根混凝土柱（必须埋在地下 16 米深处）。试验台重达 4000 吨，采用液压弯曲系统，可以对被测风机施加高达 25 MNm 的弯矩。它通过液压缸产生这些力，一套扭矩为 14.5 Mnm 的驱动系统产生施加在转子上的风力。

当风切、强风或者风扰对转子产生冲击时，会产生额外的弯矩和推力。试验台通过一个六自由度结构中的液压缸重新产生这些力。然而，由于没有风电塔筒和转子，系统必须尽可能精确地模拟这些真实条件，因此仿真模型必须实时计算机舱和转子之间的交互，并将相应的信号发送给液压缸。系统能够模拟各种运行条件，如机舱在起暴风时或在电网故障和急停后的行为。

毫秒级范围内的模拟

在测试运行期间，传感器必须能够在最短时间内采集、处理和传输大数据量，因此在调试前，必须在 MATLAB®/Simulink® 中建模所有试验台组件和测试对象。R&D Test Systems 公司软件经理 Allan Mogensen 说道：“因为软件必须能够尽快响应各种测试场景，所以我们希望尽可能缩短循环时间。通过比较，我们发现倍福的 TwinCAT 3 自动化软件让我们能够实现 1 毫秒的循环时间，于是我们选择了倍福系统。”

TwinCAT 3 中的 MATLAB®/Simulink® 软件界面是另外一个优点，Allan Mogensen 补充道：“为了确保具有出色的性能和很强的可操作性，我们通过创建试验平台所有物理组件的 MATLAB®/Simulink® 模型以及 LORC 客户实际想要的测试对象的方式模拟计算机上的所有功能。MATLAB® 模型模拟可用作真实物理机械系统后期真实测试的基准，不会对机械系统造成威胁。这让我们能够比原计划更快地完成目标。”

Allan Mogensen 总结说道：“这座试验台是丹麦及丹麦风电行业的‘灯塔工程’，我们交付了一个能够更快、更高效地测试风机的 HALT 设施。是否具有足够的计算能力对我们实施此项目有着重要影响。倍福的硬件和软件可以理想地满足这些要求。”Tricon Electric 公司的销售工程师 Morten Hauge 同意 Allan 的观点：“为这么大一个项目提供如此先进的解决方案是一件有趣而又富有挑战的工作。倍福的硬件具有执行此类艰巨任务所需的智能水平。”



倍福的硬件组件安装在由 Tricon Electric 提供的六个控制柜中，通过功能强大的 EtherCAT 网络相互通信

更多信息：

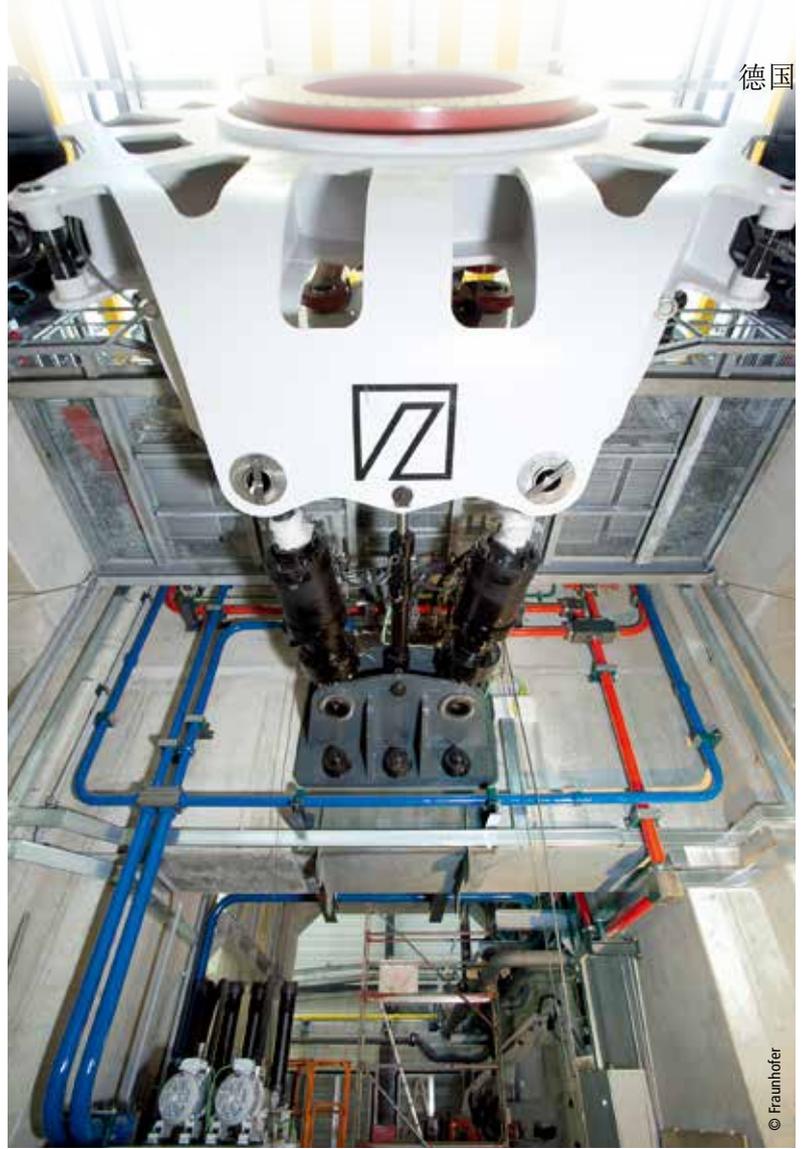
www.lorc.dk

www.rdas.dk

www.tricon.dk

www.beckhoff.com.cn/wind





用于给风机机舱加载的六自由度 Stewart 平台，它配备了
6 个 3000 kN 的伺服缸

基于 PC 和 EtherCAT 的控制技术在多功能风力发电机组试验台中的应用

基于快速 EtherCAT 总线的分布式实时控制系统在 10 MW 试验台中的应用

动态机舱测试实验室 (DyNaLab) 是德国有史以来建造的第一个用于测试整套风机机舱的实验室。该实验室拥有一个额定输出为 10 MW 的试验台驱动系统，用于测试额定功率为 4–8 MW 的风力发电机组。倍福基于 PC 的控制技术用于实现对这个复杂系统的控制，高速 EtherCAT 通信系统用于确保一致性实时控制，以及对各分布式子系统最佳控制。



DyNaLab 坐落在德国不来梅港“西北部弗劳恩霍夫风能及能源系统技术研究院 (IWES)”。IWES 的研究活动涉及整个风能技术领域，从风能物理学到电网馈送。根据设备和系统技术主管 Torben Jersch 所述，研究活动的重点是将风机理解为各个组件和环境因素之间动态互动的系统，通过综合的方法创建富于潜能的协同策略。事实上，位于不来梅港的弗劳恩霍夫 IWES 目前拥有两个可以不间断使用的叶片测试平台，这就为进行特定的全面测试提供了条件。

在真实环境下全面测试风力发电机

DyNaLab 为风电系统制造商提供了一个真实的多兆瓦级测试环境，从而能进行有现实意义的实验室测试，为评估和优化现有和未来的系统方案提供帮助。第一次测试是于 2015 年 8 月与西班牙系统供应商合作完成的。借助一台具有 6 个 3000 kN 伺服缸的六自由度液压承载应用系统平台 Stewart, Jacobs Power Tec 公司的风机机舱完成了测试。DyNaLab 的其中一个主要职责是对测试平台上的风机进行电气认证。

用于仿真实际风荷载（如剪切力矩或弯矩）的荷载传递结构，通过力矩轴承连接到法兰上。这样，力矩和力可以从非旋转轴传递到旋转轴中。通过这种特殊配置，可以施加约 20000 kNm 的弯矩或最大 1900 kN 的剪切力矩，而且，它能够动态仿真径向荷载。风载通过两个串联布置的外励磁同步电机（每个功率 5 MW）模拟。对于测试操

作，这样就可以实现总共 10MW 的驱动功率并将 8600 kNm 的额定扭矩引入到测试设备中。

为与现场风机的实际情况相符，整个传动机构与试验台之间有一个 5° 倾角，这样可以仿真真实的荷载情况。风荷载仿真可以模拟不同的静态和动态运行条件，或者也可以作为实时仿真运行。系统测试中集成了变桨和偏航系统，以便尽可能全面地测试风机。为此，各个系统的控制值通过实时仿真系统中的执行机构实现。36000 V 的中压电网仿真系统能够在机舱测试期间高重复率地仿真电网故障和电压跌落。

试验台的实时控制系统

Torben Jersch 解释了试验台对控制技术的要求：“由于我们要进行分布式实时计算和控制仿真，因此我们需要一个非常快速和可靠的通信系统，而 EtherCAT 已被证明非常适合实现此目标。由于深层次且专业的 EtherCAT 技术和各种 EtherCAT 组件都可从倍福一站式获取，因此系统实现就可以完全依赖于基于 PC 的控制。”

同时，这种方法在实践应用中已经非常成熟，正如 Torben Jersch 解释的那样：“EtherCAT 的 XFC 极速控制技术特性，如分布式时钟和时间戳，确保整个试验台的同步性。这样，我们可以很轻松地配置所需的分布式离散控制回路，而始终从控制角度保持各个子部件的实时性。



实际实验台以及液压和冷却系统位于测试中心综合大楼的大厅，大量的电气设备位于左侧那栋大楼里

基于 PC 的控制系统具有模块化、可扩展的特点，使其可以根据需要用于不同领域的测试

因此，EtherCAT 是用于控制试验台关键组件的主要通信总线，如变频器、电机、六自由度平台、仿真计算机、测试对象的设定和其它的监测。标准以太网用于实现非实时监测和控制辅助系统，如冷却泵。”

倍福的控制技术包含了 TwinSAFE 技术，确保了试验台的系统安全。此外，六自由度平台控制器同时控制 6 个液压缸，中央 DyNaLab 控制计算机进行任务执行，并实时计算风力发电机转子模型。三台工业 PC，两台 C5102 19 英寸抽拉式工业 PC 和一台 CX5010 嵌入式控制器 CX5010 协同完成上述任务。Torben Jersch 解释了使用这一配置的原因：“硬件上分离成三个计算装置是我们规范的一部分，以便为控制系统提供一个清晰的结构和明确的接口。此外，该架构利于日后的扩展或优化各种子系统。”

TwinCAT 3 使得系统工程设计更加简单

DyNaLab 使用 TwinCAT 3 自动化软件，它具有无缝链接 MATLAB®/ Simulink® 软件的特殊优点，Torben Jersch 阐述道：“MATLAB® 代码的集成让我的大部分工作人员都能够自己编程控制器，因此工程师可以专注于应用开发，而不需要深入研究微控制器或 PLC 编程。”测试平台中使用的其它组件包括基础 TwinCAT 3 软件开发环境和附加功能，如 TwinCAT 3 PLC、TwinCAT 3 Scope View Professional 和 Scope Server，以及 TwinCAT 3 XML Server 和 Database Server。

更多信息：

www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/en

www.beckhoff.com.cn/ethercat

www.beckhoff.com.cn/twincat3

www.beckhoff.com.cn/wind



GfM 工程师正在进行与
Peakalyzer 连接的加速度
传感器测试

风力发电机组的高级振动分析

使用 EtherCAT 端子模块实现灵活的状态监测解决方案

GfM 公司的 Peakalyzer 是一套可以普遍适用于实现全自动振动诊断的系统，而且它在风力发电机中的使用已经非常成熟。原始数据由一台倍福嵌入式控制器 CX5020 和状态监测 EtherCAT 模块 EL3632 完成处理和采集。该系统可以实现对整个风机的传动链甚至风机基础的高精度可靠诊断。

总部位于柏林的 GfM (Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH) 公司主营业务是滚动轴承上安装的齿轮装置的振动诊断。该公司联合创始人兼总经理 Dr. Rainer Wirth 这样解释道：“我们的研发工作始终专注于诊断流程的自动化，因为这对于诊断技术的推广至关重要。GfM 积极推动诊断服务和设备开发的融合，这样实践经验可以直接反馈到产品开发中。”

Peakalyzer 则是一款承载了这种设计思想优势的产品，它具有多达 32 个测量点专为全自动、高级振动诊断而设计。另有最多 32 个慢速通道用于处理较慢的过程变量 (1 kHz)。该款设备的核心是倍福基于 PC 的控制技术，它完美结合了科技自动化理念，将诸如状态监测等超越标准自动化要求的测量功能整合于一体。这样，Peakalyzer 能够通过重新采样变速驱动诊断数据的方式进行阶次分析，以及通过 DVS 分析来自动识别重要的谱频，监测特性值并触发数据采集。

这种多用途诊断设备的典型应用领域包括价格昂贵且低冗余设计的传动系统，如针对建材行业的钢铁厂、输送系统中的传动机构（可靠性在此类应用中关键要求）或缆车中与安全相关的驱动机构。Peakalyzer 也常常用于维护人员难以轻易到达的设备中，因为在这些设备中基于状态监测的提前维护是必须的。风机就是这种应用的典型案例。

风力发电机组特殊且全面的状态监测

为了监测风力发电机组的传动机构，一个 8 通道 Peakalyzer 设备用于监测风力发电机组的传动链，同时，还可以额外增加两个通道监测风机基础螺栓是否松动。诊断装置位于风机的机舱中，可以将其安装在控制柜内或者其他防护等级较高的箱体中。8 个 IEPE 加速度传感器对传动链进行数据采集，分别为：1 个传感器用于主轴承，2 个用于发电机，5 个用于齿轮装置。系统通过这些数据对传动链进行分析。



Kai Uchtmann、Dr. Rainer Wirth 和 Axel Haubold（从左至右）自 1985 年以来就一直从事机器诊断工作，并于 1999 年成立 GfM 公司

需要时，也可以将 Peakalyzer 连接到现有的通信结构中，如机舱中的局域网接口，VPN 等，或者可以通过无线通信、光纤（塔筒）、GHSDSL（系统之间的铜缆）以及通过 DSL 建立与互联网的通信。

GfM 软件工程师 Christian Reinke 解释了 PC 控制技术带来的优势：“Beckhoff 的模块化控制系统是一款可自由编程的开放式系统，可在全球范围内供货并提供备件更换，从而让我们能够提供定制化、经济高效且可灵活扩展的诊断解决方案。更重要的是，分布式解决方案可以方便地通过 EtherCAT 端子模块 I/O 系统实现。借助 EtherCAT 高性能的通信特征，Peakalyzer 可提供多达 32 个输入通道，从而提高了应用的灵活性。通过 EtherCAT 端子模块 EL3632 和 EL3702 的超采样功能，甚至还可以实现比总线周期更短的高速采样率，而这也是 Peakalyzer 能够支持如此精确的振动记录和分析的原因所在。”

TwinCAT 软件帮助 CX5020 嵌入式控制器实现测量数据采集和缓存。然后，数据通过 ADS（TwinCAT 内部通信协议）传输给 GfM 专有的分析软件，以进行进一步处理。Christian Reinke 继续说道：“其优势在于 PLC 可以直接实现配置更改，即所有的通信都基于一款通用 PLC，即使需要具有不同数量通道和端子模块类型的不同系统配置，也只需要在软件配置中加以区别即可。”远程访问也是可行的，将 GfM.NET 应用程序安装在嵌入式控制器中，就可以通过 TCP/IP 与网络上的另一台计算机中的配置和测评软件进行通信了。

必不可少的 I/O 设备 — 状态监测模块

双通道 EtherCAT 模块 EL3632 是 Peakalyzer 不可或缺的组成部分，它可以精确记录传动链监测的传感器数据，据 GfM 联合创始人兼总经理 Axel Haubold 所述：“我们的高级振动监测系统实现的一个关键是以 50 kHz 的采样率采集 IEPE 传感器信号，另外一个关键是以 1 Hz 和 1 kHz 之间的宽采样范围，这样，设备就可以同时测量低频率振动（例如塔筒

振荡）和高频率振动（例如风力发电机的振动）。为了获得高质量的包络信号，以检测滚动轴承及齿轮损坏情况，所有通道几乎都以 50 kHz 的频率进行测量。在风电行业，0.1 至 10 Hz 模式也额外用于记录符合 VDI3834 的特性值。另外一个优点是，特别是在调试期间，EL3632 状态监控模块能够提供断线检测功能。”

Peakalyzer 的 I/O 系列可以根据客户要求通过添加接口的方式进行完善。Christian Reinke 详细阐述道：“在这里，我们受益于种类丰富的模块化 EtherCAT I/O 系统解决方案。例如，通过脉冲测量端子模块 EL5151 的增量编码器接口，能够以每转多个非等距脉冲的方式进行非常精确的速度测量。具有超采样功能的模拟量输入端子模块 EL3702 非常适合于监测慢速移动滚子轴承的感应式位移传感器，以记录振动情况。”

数字量输入端子模块 EL1002 用于触发测量，数字量输出端子模块 EL2004 用于发送特性值和过程参数报警信号。重要的过程变量，例如功率、风速和扭矩，可以作为模拟量电压信号（±10 V）或电流信号（0 - 20 mA）通过模块 EL3702 或 EL3742 采集进入诊断系统中。此外，XFC（极速控制）载荷分析模块 EL3356-0010 可用于扭矩测量，而高精度 PT100 输入端子模块 EL3202-0010 可以用于温度测量。

更多信息：

www.maschinendiagnose.com

www.beckhoff.com.cn/el3632

基于 PC 的控制技术在分布式风力发电系统中的应用

开放式模块化控制器用于 分布式发电系统

由于将可再生能源馈入电网可能会导致电网负载的强烈波动，这就需要电网运营商的干预，以避免出现电力故障以及电压或频率波动。德国 EE Technik GmbH 公司多年来一直从事大型风电场项目电气基础设施的规划和设计，他们采用 DEA 控制器（分布式发电系统控制器），而这种控制器基于开放式和高度集成的倍福控制技术，可以灵活完成各种应用。

在发电系统中，需要根据电网公司的实际要求，由专用控制器控制电厂有功和无功功率输出。根据实际值与电网需求的偏差，这台控制器对每个发电单元的设定值进行调整。当前的问题是发电设备制造商还没有达成一个统一的标准协议来交换这些数据。标准化的缺失迫切需要建立一个有由端子模块和 IT 系统构成的一个复杂系统，用于满足网络运营商对电网接入点的要求。总部位于德国 Boklund 的 EE Technik GmbH 公司生产了一款独立于发电设备制造商的控制器，为解决当前问题提供了一种高效解决方案。这种用于分布式发电系统的控制器（DEA 控制器）对所有常用的系统开放，并能够实现电网连接点处各个发电系统的上位控制。例如，在实际应用中，它可以实现风力发电机的运行优化排布，这对发电量有积极影响。



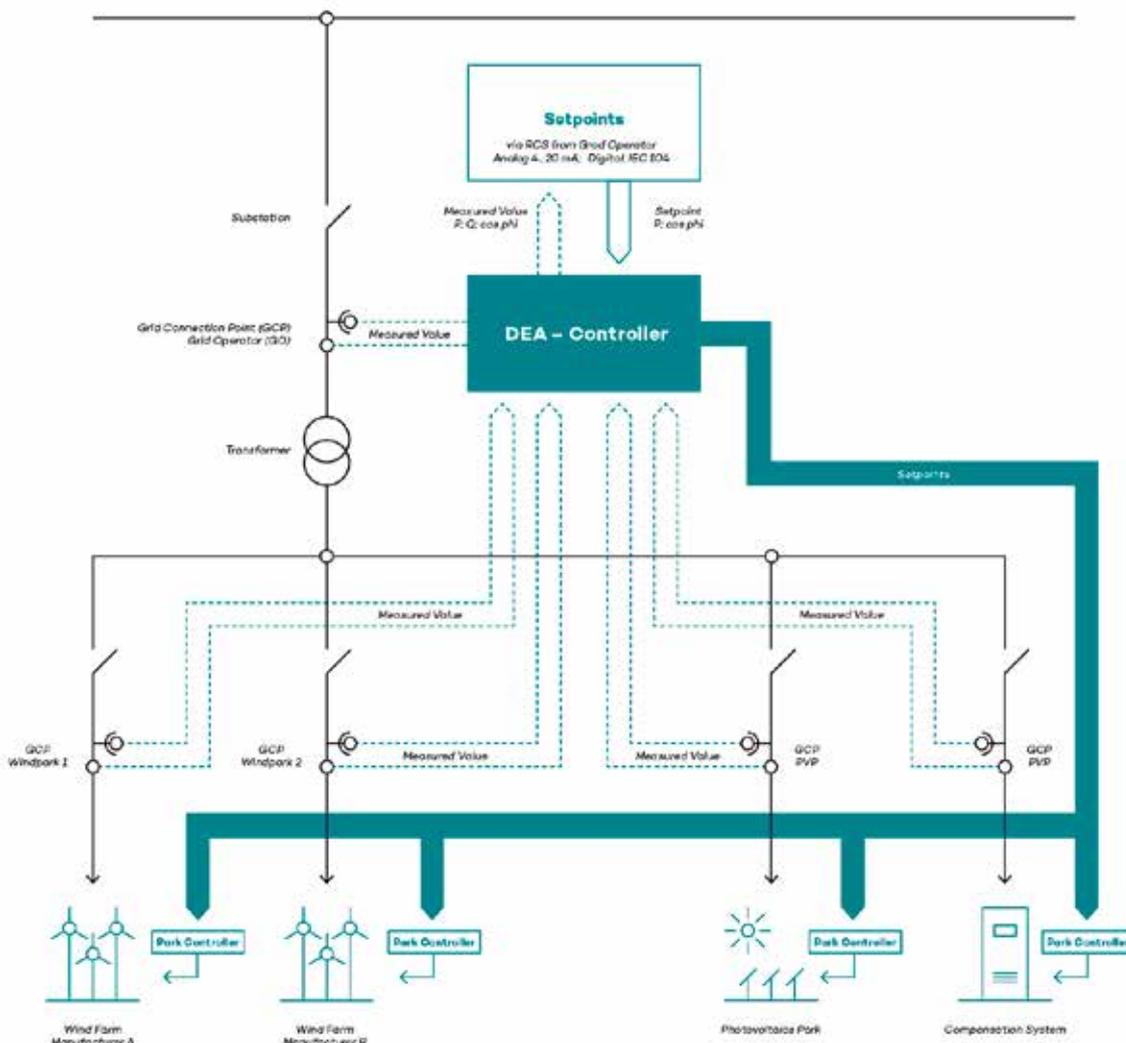
灵活的 DEA 控制器采用基于 PC 的控制技术

DEA 控制器有不同型号可选择，并且可以通过选择核心组件进行配置。高性能 PLC 用于存储、处理和显示数据，电网接入点处的测量传感器提供实际采集值。该系统包含模拟量和数字量 I/O 及以太网接口。以太网接口用于读取电网公司的指令，同时传输控制值给发电系统，并通过 OPC UA 集成一个可视化界面。

灵活的硬件和软件配置借助倍福基于 PC 的控制系统得以实现。开放的集成式解决方案为 DEA 控制器提供了一个高性价比的系统集成平台，同时也带来了高计算能力和模块化可扩展性等主要优势。倍福德国吕贝克分公司的 Karl-Friedrich Stapelfeldt 解释了最初的选择依据：“当时，一个决定性的因素是高性能 CX2030 嵌入式控制器，它搭载了 Intel® Core™ i7 处理器（1.7 Ghz，双核）。由于采用多核 CPU 架构，就可以轻松地在同一个系统上并行运行 PLC 软件、过程可视化程序和数据库应用程序，而且没有任何限制。这台控制器的另一个优势是它具有高度灵活性，这样系统就很容易进行扩展。另一个关键是模块化 I/O 系统和内部基于 PCI Express 的扩展总线，系统接口通过该总线与一个 PCI Express 信道进行全带宽连接。除了两个标准的

网卡，CX2030 可以通过系统模块扩展最多 8 个网卡。这样，每个风力发电场定制网络配置的目标就很容易实现了。”

在 I/O 层所使用的设备包括倍福模拟量 EtherCAT I/O 端子模块 EL3024 和 EL4024（4-20 mA），用于从网络运营商采集信号和反馈模拟量设定值，并传输控制信号到风力发电场。数字量 EtherCAT I/O EL1008 和 EL2008 采集阶跃停止信号，并通过特定的控制接收器提供反馈。其它用于 CX2030 的系统模块包括双千兆以太网接口 CX2500-0060 和抽拉式 HDD/SSD CX2550-0020 单元。采用 15.6 英寸显示屏的 CP2916 多点触控面板用于可视化。据 Karl-Friedrich Stapelfeldt 所述，这一灵活的系统可以完美应对潜在的挑战：“不同的标准和数据要求都涵盖在内，通常为 4 – 20 mA 模拟信号和 CANopen 总线或 Modbus 等成熟的现场总线协议。诸如网络控制技术中常见的 IEC 60870-5-104 等远程控制协议的应用范围也越来越广泛。此外，还有由 IEC 61850 衍生而来、专为风力发电应用而开发的 IEC 61400-25 协议。作为 TwinCAT 3 软件平台的一部分，倍福已经提供了现成的功能库，以支持所有这些通信协议。”



DEA 控制器可以实现不同系统制造商的发电机组共享一个公共电网接入点，例如：在中压输电线或者高压连接变电站中

TwinCAT 3 具有开放式通信和 Wind Framework

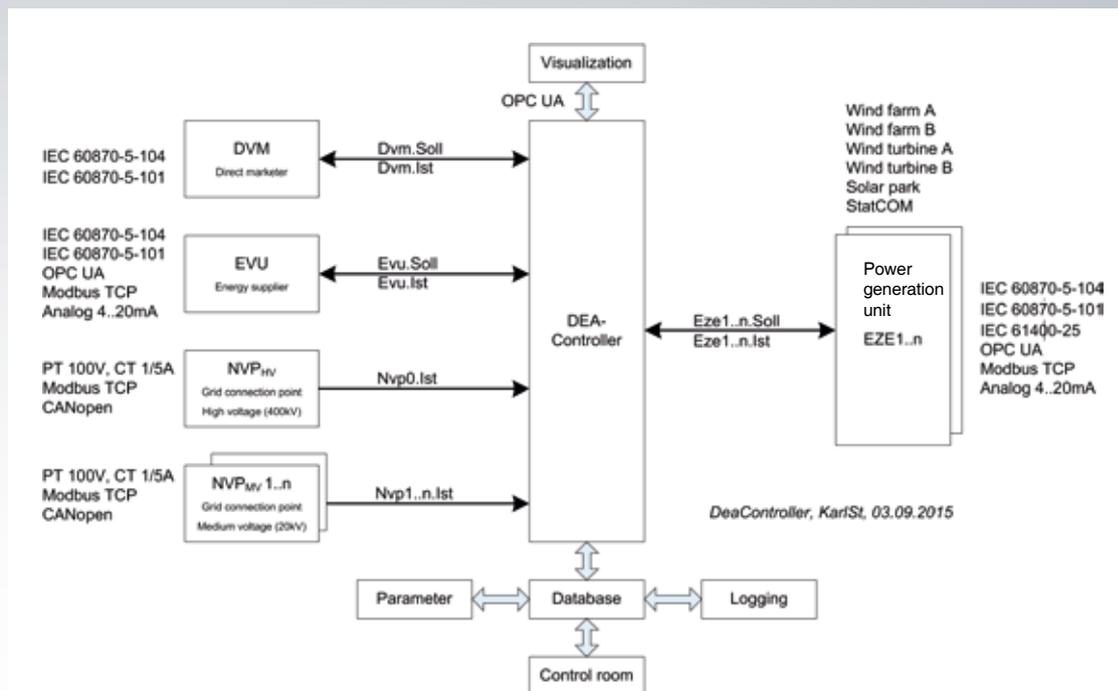
除了具备通过以太网（如 Modbus、OPC UA）和远程控制协议（IEC 60870, IEC 61400-25）进行标准通信的 TwinCAT 3 功能之外，最新开发的 TwinCAT 3 Wind Framework 带来了更多的优势。它建立在 TwinCAT 3 的模块化架构上，支持模块化和面向对象的风力发电机运行管理软件的开发。上位系统服务通过 TcCOM 模块支持。其中一个例子是 Status 模块，它可以监控所有组件，并实现事件管理、故障检测、故障排除和生成报告等功能。Parameter 和 Command 模块提供配置和与系统交互功能。Capture 和 Statistics 模块能够记录信号及对它们的数据进行统计评估。User 模块检查、管理和记录所有用户交互。基于 SQL 数据库的 Database 模块记录所有事件和信号，并用于存储和加载整个配置。

除了 DEA 控制器的输入和输出，TwinCAT 3 Wind Framework 中集成的工具环境支持在线和离线监测记录风电场数据，数据库驱动的离线分析能够显示和组合信号曲线，分辨率最高可达 1 秒。以 PLC 任务周期为分辨率的录波功能，可以更加详细地分析控制器行为，例如，分析在事件发生时，变量逐个 PLC 周期的改变情况。TwinCAT 3 中集成的示波软件 ScopeView 非常适合用于实现微秒级的超高速记录。

更多信息：

www.eetechnik.de

www.beckhoff.com.cn/wind



在软件方面，DEA 控制器的每个接口都以功能块的形式实现，这些功能块具有相同的输入和输出接口
在硬件方面，各种EtherCAT模块能够根据不同的应用进行接口优化配置



为了确保风电场扩建后能够为苏格兰格拉斯哥市可靠地供电，运营商使用了 EtherCAT 高速通信系统及相应的控制组件。图片显示了一组 PCC（公共连接点）

© Alstom

EtherCAT 光纤通信网络，用于连接高效灵活的风力发电机组

实时通信使风电场应用实现快速响应

根据近日欧洲风能协会发布的预测数据，欧洲风电将进一步取得动态发展，到 2020 年，风电总装机容量将实现 64% 的增长。作为这种发展的一部分，几十台总输出量为 217 兆瓦的风力发电机最近由法国公司阿尔斯通安装在苏格兰的风电场中。极速 EtherCAT 通信网络和倍福相应的 I/O 组件构成这一欧洲最大的陆上项目的通信主干。

阿尔斯通一个最新的风电项目在苏格兰格拉斯哥附近扩建的 Whitelee 风电场中投入运行。新增的 217 兆瓦的装机容量，能够满足 124,000 户家庭的用电需求。此次陆上风电场的扩建为整个欧洲大陆设立了新标准，此外，这也是阿尔斯通功能强大的 ECO 100 风力发电机的第一个大型项目。阿尔斯通在这所风电场总共安装了 69 台 3 兆瓦的 ECO 100 风力发电机，6 台 1.67 兆瓦的 ECO 74 风力发电机。

先进的控制技术确保可靠的风电场运营

阿尔斯通的 Wind e-control™ 系统负责风电场内的控制任务，如电压、功率和频率控制。例如，为了检查风电场并网转换点处的无功功率，Wind e-control™ 系统从风电场采取了各种措施。每个相应国家的电网准则都可以通过此控制系统可靠地实现。电网准则中描述的要求是为了保证电网的稳定，在可再生能源产业不断扩大时这是最重要的。除此之外，控制系统允许在控制室进行现场运营管理或通过与 SCADA 系统进行数据通信远程进行管理。Wind e-control™ 系统已首次在这个风电场中安装并成功应用。

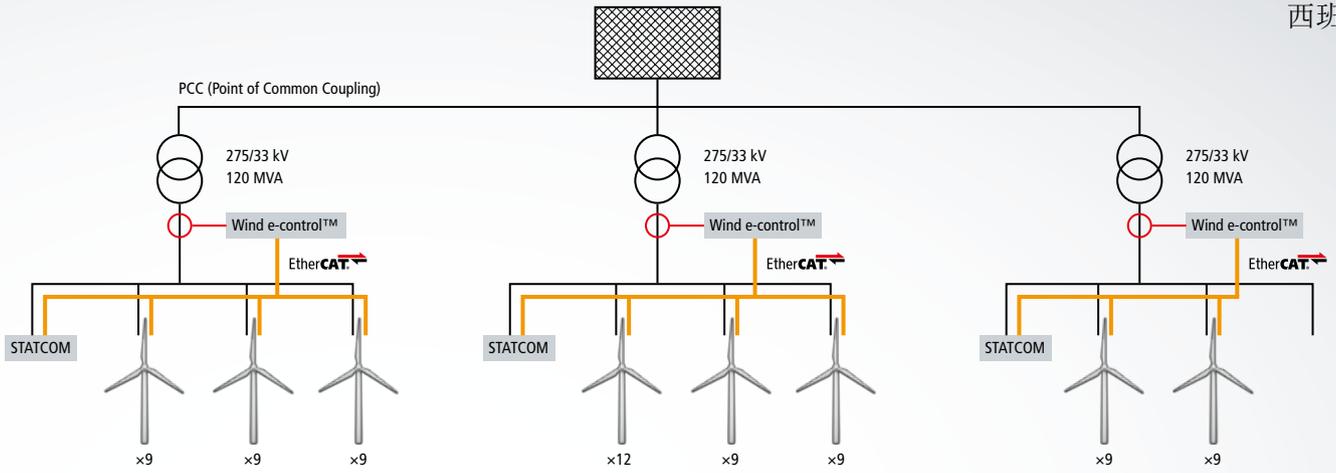
阿尔斯通的并网设计工程师 Vicenc Casadevall 描述了控制系统的一些关键细节：“一方面，我们有无功功率控制（RPC），它有三个调节模式。通过在‘电压控制’模式下控制无功功率，能够根据风电场运

营商的规定调整转换点，即公共连接点（PCC）的电压。在‘功率因数控制’模式中，可以控制 PCC 的功率因数。‘无功功率控制’模式能够让风电场运营商拥有一定的无功功率容量。另一方面，我们还有有功功率控制（APC），它有二个调节模式。通过在‘有功功率限制’模式下控制有功功率，可以限制风电场的有功功率输出。在‘频率控制’模式中，如果频率超过一定水平，有功功率输出将会被限制。”

EtherCAT 用作高速的并且经济的数据通信的基础

EtherCAT 是 Wind e-control™ 系统的另一个核心技术。这一功能强大的数据通信网络，不仅适用于单台风力发电机，它对风电场网络也特别重要。风电场和风力发电机控制的周期时间为 5 毫秒，并且它们相互间同步，使得风电场电压控制的响应时间低于 200 毫秒。

Vicenc Casadevall 回忆道：“由于我们必须满足充满挑战的时间要求，阿尔斯通的研发团队寻求一种具有操作确定性的通信协议。最终，我们选择了 EtherCAT 协议。它运行可靠、速度快，完全符合我们的要求。”



Wind e-control™ 系统用于每个变电站，确保风电场中各个风力发电机之间的 EtherCAT 数据传输安全

© Alstom

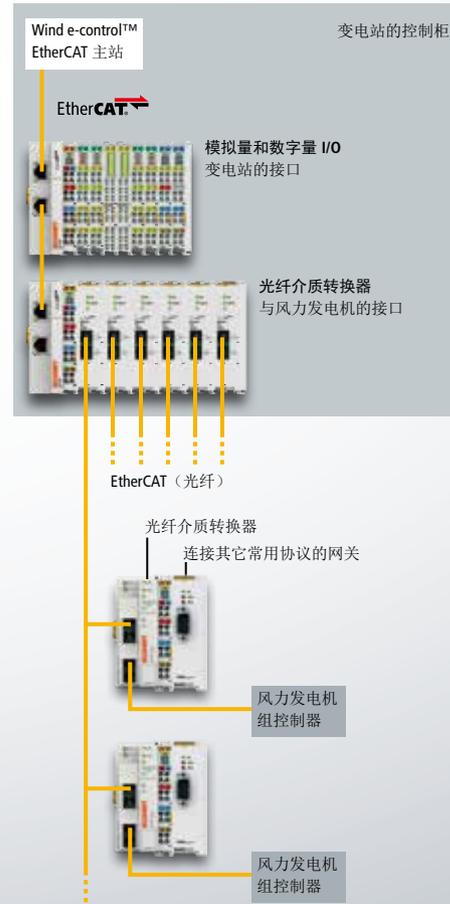
倍福全球风电行业经理 Dirk Kordtmeikel 强调了 EtherCAT 系统除了其速度之外的成本优势：“现在，风电场网络监控设备大部分都基于光缆。这些光缆都与 EtherCAT 兼容，允许我们在安装过程中利用现有的电缆网络，不会产生额外费用。此外，基于 EtherCAT 的风电场网络满足电缆冗余的要求。反过来，与其它总线系统的连接还可以提高整个系统的开放性和灵活性。运营商能够以比其它实时以太网协议更低的成本获得这些好处。

EtherCAT 能够跨越长距离

一个 EK1100 EtherCAT 耦合器链接控制站中的 I/O 层。种类齐全 EtherCAT 端子模块可处理风电场自动运行中出现的所有信号形式。另外一个 EK1100 耦合器与各个 EK1521 EtherCAT 光纤拓展端子模块通信。与带光纤接口的 EK1501 EtherCAT 耦合器配套，它们在各个风力发电机组间建立了灵活、可扩展的光纤网络。标准以太网电缆允许两个站点之间的距离为 100 米，两个光纤装置之间的距离可以更长：使用多模玻璃光纤连接可达 2 公里，而使用单模玻璃光纤连接甚至可达 20 公里。

硬件和软件组件协同工作

除了对高速数据通信的需求之外，硬件和软件的操作可靠性也是绝对重要的，特别是对于处在恶劣环境条件下的风力发电机组来说，例如剧烈的振动和 -60°C...+55°C 的工作温度。与 Beckhoff 的紧密合作对于 Vicenc Casadevall 来说是一个重要因素：“由于是倍福发明了 EtherCAT，对我们来说很清楚的一点就是，可以从倍福购买最好的硬件和软件解决方案，以实现与这个现场总线系统最佳匹配。不仅如此，倍福在自动化技术林领域，尤其是在风电行业，有着悠久的历史，在阿尔斯通也享有很好的声誉。”



EtherCAT 拓扑结构的整体示意图显示风电场中由各个具体模块处理的功能

© Alstom

更多信息：

- www.power.alstom.com
- www.beckhoff.com.cn/wind
- www.beckhoff.com.cn/ethercat

