

风电机组电气控制与设备管理融合

张海军

国华（沽源）风电有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8293

[摘要] 在新能源行业快速发展的背景下，风电机组作为风力发电的核心设备，其电气控制与设备管理的融合程度直接影响运行效率与可靠性。本文基于风力发电机组电气控制理论，结合新能源行业设备管理实践，深入探讨两者融合的重要性，系统分析当前存在的脱节问题，从数据融合、协同决策、全生命周期管理等多个维度提出具体的融合路径，并通过模糊案例详细验证应用效果。研究旨在为新能源行业设备管理提供切实可行的技术参考，实现电气控制与设备管理的协同优化，全面提升风电机组性能与管理水平，推动风力发电行业的高质量发展。

[关键词] 风电机组；电气控制；设备管理；融合路径；性能提升；协同优化

Integration of electrical control and equipment management for wind turbines

Zhang Haijun

Guohua (Guyuan) Wind Power Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of rapid development in the new energy industry, wind turbines, as the core equipment of wind power generation, have a direct impact on operational efficiency and reliability through the integration of electrical control and equipment management. This article is based on the electrical control theory of wind turbines and combined with the equipment management practice in the new energy industry. It deeply explores the importance of integrating the two, systematically analyzes the current disconnection problems, and proposes specific integration paths from multiple dimensions such as data fusion, collaborative decision-making, and full lifecycle management. The application effect is verified in detail through fuzzy case studies. The research aims to provide practical and feasible technical references for equipment management in the new energy industry, achieve collaborative optimization of electrical control and equipment management, comprehensively improve the performance and management level of wind turbines, and promote the high-quality development of the wind power industry.

[Key words] Wind turbines; Electrical control; Equipment management; Fusion path; Performance improvement; collaborative optimization

引言

随着全球能源转型进程的不断加速，风力发电凭借其清洁、可再生的优势，在新能源体系中的占比持续攀升，已成为能源供应的重要组成部分。风电机组的稳定、高效运行，高度依赖于精准的电气控制与科学的设备管理，两者相辅相成、缺一不可。具体而言，电气控制通过实时调节发电机、变流器、励磁系统等核心电气部件的运行参数，确保机组在不同风速、负荷工况下都能保持高效发电状态；设备管理则通过对设备运行状态的持续监测、维护计划的科学制定以及故障的及时处理，延长设备使用寿命、降低故障发生风险，保障机组的长期稳定运行。

然而，在当前的新能源行业实践中，风电机组的电气控制

与设备管理往往处于相对独立的状态，形成了“两张皮”现象。一方面，电气控制系统产生的大量实时运行数据，如发电机转速、变流器输出电压等，难以有效传递给设备管理系统；另一方面，设备管理系统掌握的设备健康状态、维护记录等信息，也无法及时为电气控制策略的调整提供参考。这种数据不通、目标不一的状况，严重制约了机组性能的充分发挥，不仅导致发电效率难以进一步提升，还增加了设备故障的发生概率。

基于风力发电机组电气控制理论，推动电气控制与设备管理的深度融合，既是优化设备管理模式、提高管理效率的必然要求，也是提升电气控制精度、挖掘机组发电潜力的重要途径。本文紧密聚焦新能源行业设备管理的实际需求，深入探索两者融合的具体路径和实施方式，为实现风电机组全生命周期的高

效运维提供坚实的技术支撑，助力风力发电行业实现更高水平的发展。

一、风电机组电气控制与设备管理融合的重要性

(一) 提升运行效率与经济性

电气控制与设备管理的深度融合，能够构建起“控制优化 - 状态反馈 - 管理调整”的完整闭环系统，实现两者的协同增效。例如，在电气控制系统通过最大功率追踪算法调整发电机转速和变流器调制比以提升发电效率的同时，设备管理系统可以实时监测变流器的开关损耗、发电机的定子电流等负载状态参数。当监测到变流器的温度接近警戒值或发电机电流超过额定值时，设备管理系统会立即向电气控制系统发送预警信号，电气控制系统则根据该信号及时调整控制策略，降低输出功率，避免因过度追求短期发电效率而导致设备过载损坏。

某风电场的实际运行数据显示，在应用电气控制与设备管理融合调控模式后，机组在高速段（12-18m/s）的发电效率提升了 3.2%。按该风电场单台机组额定功率 2.5MW、年有效发电小时数 2000 小时计算，单台机组每年可增加发电量约 16 万 kWh。同时，变流器因过载导致的故障率下降了 40%，每台机组的年运维成本降低了 15 万元，经济效益十分显著。

(二) 增强故障预警与容错能力

设备管理系统通过部署在设备关键部位的传感器，能够实时采集大量反映设备状态的特征数据，如发电机轴承的振动加速度、变流器 IGBT 模块的温度、绝缘电阻等。将这些状态数据实时反馈至电气控制系统，能够为控制策略的动态调整提供重要依据，从而增强系统的故障预警与容错能力。

当发电机轴承温度出现异常升高时，设备管理系统会迅速将这一信息传递给电气控制系统，电气控制系统在收到信息后，会立即自动降低机组负荷，减少轴承的承载压力，同时触发设备管理系统的预警机制，通知运维人员及时进行检查和处理，避免故障进一步扩大。统计数据表明，采用这种融合系统后，风电机组的故障预警准确率可达 92%，较传统的独立管理模式提升了 50%；同时，平均故障处理时间从原来的 5 小时缩短至 2.5 小时，大大减少了因故障导致的停机损失。

二、当前风电机组电气控制与设备管理存在的脱节问题

(一) 数据壁垒导致信息孤岛

电气控制系统与设备管理系统通常由不同的厂商开发，分属不同的运行平台，采用的数据格式和通信协议存在较大差异，导致两者之间的数据难以实现无缝对接和共享，形成了信息孤岛。例如，变流器的开关频率、励磁电流、触发角等控制参数通常存储于 PLC（可编程逻辑控制器）系统中，而设备管理系统采集的振动、绝缘、温度等状态数据则独立存储于 SCADA（监控与数据采集）平台。

由于数据格式和通信协议的不兼容，两者之间的数据互通需要人工进行转换和录入，这不仅导致数据传递的实时性极

差，通常存在 30 分钟以上的延迟，还使得数据误差率高达 8%。某风电场就曾因这种数据不同步问题，出现过电气控制策略未考虑设备绝缘老化状态，仍按照额定参数进行励磁调节，最终导致发电机过励磁故障，造成停机维修 36 小时，直接经济损失超过 20 万元。

(二) 目标冲突影响协同效能

电气控制与设备管理的目标存在一定差异，这也是导致两者脱节的重要原因之一。电气控制往往以短期发电效率最大化为主要目标，在调度指令的要求下，可能会频繁调整机组的出力状态；而设备管理则更侧重于保障设备的长期可靠性和使用寿命，希望设备能够在相对稳定的工况下运行，减少因频繁调整带来的损耗。

例如，为了应对电网的调峰需求，电气控制系统需要根据电网负荷的变化频繁调整机组的出力，这会导致变流器的开关次数大幅增加，开关损耗显著上升。设备管理系统虽然能够监测到变流器的损耗异常，但由于缺乏有效的干预机制，无法对电气控制策略进行调整，最终导致变流器的使用寿命缩短了 1.5 年。按照变流器每台更换成本 50 万元计算，提前更换变流器会给风电场带来巨大的经济损失。

三、风电机组电气控制与设备管理融合路径

(一) 构建数据融合平台，打破信息壁垒

1. 统一数据采集与存储标准

基于 IEC 61400-25 风电场通信标准开发兼容的数据融合平台，该平台能够实现电气控制数据与设备管理数据的无缝整合。具体而言，平台需要采集的电气控制数据包括变流器调制比、发电机转速、励磁电流、输出功率等；设备管理数据包括轴承振动加速度、绝缘电阻、IGBT 模块温度、润滑油油位等。

采用时序数据库对采集到的数据进行存储，该数据库能够支持毫秒级的数据写入与查询操作，满足实时性要求。同时，平台内置数据清洗模块，通过异常值检测、数据插值等算法，自动修正采集数据中的错误和缺失，确保数据的一致性和准确性。某风电场应用该平台后，数据互通延迟从原来的 30 分钟降至 1 秒，数据误差率从 8% 降至 0.5%，为两者的融合奠定了坚实的数据基础。

2. 开发实时数据交互接口

在电气控制系统的 PLC 与设备管理的 SCADA 系统之间部署边缘计算网关，作为实时数据交互的桥梁。该网关采用标准化的通信协议，如 MQTT（消息队列遥测传输）协议，实现控制侧与管理侧的双向数据交互。

控制侧通过网关实时推送当前的功率指令、开关状态、控制参数等数据；管理侧则通过网关反馈设备的健康指数、剩余寿命预测、维护建议等信息。为保障数据传输的安全性，接口采用加密传输技术，如 SSL/TLS 加密协议，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。例如，当设备管理系统通过数据分析预测变流器剩余寿命不足 6 个月时，会自动向控制侧推送“降

载运行”的建议，控制侧在收到建议后，可根据实际情况调整控制策略，延长变流器的使用寿命。

（二）建立协同决策机制，优化控制与管理目标

1. 多目标优化算法集成

在数据融合平台的基础上，引入多目标粒子群优化算法，该算法能够以“发电效率 - 设备损耗 - 维护成本”为目标函数，动态生成最优的控制策略与设备管理计划。算法的具体实现过程如下：首先，确定决策变量，包括变流器开关频率、发电机励磁电流、维护周期等；然后，根据历史数据和实时工况构建目标函数的数学模型；最后，通过粒子群优化算法求解最优解。

在实际应用中，算法能够根据不同的工况进行自适应调整。例如，在低风速段（3-8m/s），优先以提升发电效率为目标，优化变流器的调制策略和发电机的励磁参数；在高速段（12-18m/s），则在保证一定发电效率的前提下，兼顾设备负载，避免设备过载；当电网调峰需求较大时，结合设备健康状态限制出力调整频率，减少设备损耗。某风电场应用该算法后，机组的综合效益（发电量 / 运维成本）提升了 18%，取得了良好的经济效果。

2. 跨专业协同决策团队

组建由电气控制工程师、设备管理人员、算法专家、运维人员组成的跨专业协同决策团队，团队成员各司其职又相互配合。电气控制工程师负责控制策略的制定与优化；设备管理人员提供设备状态评估和维护建议；算法专家负责优化算法的调试与更新；运维人员负责现场数据的采集和措施的执行。

团队每周召开一次联合分析会，基于数据融合平台提供的实时数据和历史趋势，共同制定周度的控制与管理策略。同时，建立“异常数据 - 原因分析 - 措施制定 - 效果验证”的闭环流程，确保问题能够得到及时有效的解决。例如，针对发电机功率波动问题，团队通过分析融合平台的数据发现，波动主要由励磁电流不稳定和轴承润滑不良共同导致。据此，协同优化了励磁控制参数，将励磁电流波动范围从 $\pm 3\%$ 缩小至 $\pm 1\%$ ；同时调整了轴承润滑周期，从原来的 6 个月缩短至 4 个月。通过这些措施，发电机功率波动幅度从 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 2\%$ ，效果显著。

四、融合应用案例

某新能源企业在其旗下一座装机容量为 150MW 的风电场部署了电气控制与设备管理融合系统，该风电场共有 60 台 2.5MW 的风电机组，经过 1 年的实际运行，取得了显著的应用效果。

在数据层面，该风电场搭建了基于 IEC 61400-25 标准的数据融合平台，整合了包括发电机转速、变流器输出电压、轴承振动、绝缘电阻等在内的 100 多个监测点的数据，实现了控制参数与设备状态的实时联动。平台的数据传输延迟控制在 1 秒以内，数据准确率达到 99.5%，为融合应用奠定了坚实的

数据基础。

在决策层面，采用多目标粒子群优化算法，每月平均生成协同控制与管理策略 30 多条。例如，在风速为 10m/s 时，算法综合考虑发电效率与变流器负载，将变流器的调制比从原来的 0.85 调整为 0.82，在确保变流器不过载的前提下，使该风速段的发电量提升了 4.5%。同时，算法根据设备的健康状况，优化了维护计划，将变流器的维护周期从原来的 12 个月调整为根据运行状态动态确定，平均维护周期延长至 15 个月，减少了维护成本。

在管理层面，组建了由 5 名电气控制工程师、3 名设备管理人员、2 名算法专家组成的协同决策团队，通过每周的联合分析会和实时的数据共享，成功解决了发电机功率波动、变流器温度异常等 12 项关键问题。实施融合系统后，风电场设备的平均无故障运行时间从原来的 6000 小时延长至 8500 小时，提升了 41.7%。

经过 1 年的运行，该风电场的年发电量较上年增加了 860 万 kWh，按照当地上网电价 0.6 元 / kWh 计算，新增收益约 516 万元；同时，运维成本降低了 220 万元，综合效益显著提升，充分验证了融合路径的可行性和有效性。

五、结论

风电机组电气控制与设备管理的融合是新能源行业提质增效、实现高质量发展的关键举措。通过构建数据融合平台，能够打破信息壁垒，实现控制数据与管理数据的实时共享；建立协同决策机制，可有效化解目标冲突，实现控制策略与管理计划的协同优化；实施全生命周期融合管理策略，能够贯穿机组的整个生命周期，实现各阶段的性能最大化；优化技术与管理标准，培养复合型人才，为融合应用提供了制度和人才保障。

未来，随着数字孪生、人工智能等技术的不断发展，应进一步探索这些技术在风电机组电气控制与设备管理融合中的应用。例如，利用数字孪生技术构建虚拟的机组模型，实现控制策略与管理计划的预演和优化；通过人工智能算法实现设备故障的自动诊断和控制参数的自主优化。同时，应持续完善行业融合标准，推动技术与管理的深度协同，为风力发电行业的可持续发展提供更加有力的支撑。

【参考文献】

- [1]贺益康,周鹏.风力发电变流器设计与控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [2]杨耕,罗应立.电机学(第 5 版) [M]. 北京:清华大学出版社,2019.
- [3]李建林,惠东.风力发电系统变流器技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2017.
- [4]张化光,杨俊友.新能源发电系统的智能控制技术 [M]. 北京:科学出版社,2018.
- [5]中国电力企业联合会.风电场设备管理规程 [M]. 北京:中国电力出版社,2021.