

# 构网型级联储能PCS关键器件寿命预测任务拆解与分工

针对“构网型级联储能PCS关键器件寿命预测及PCS健康度分析”项目，我们将工作划分为四大模块，每个模块由一名团队成员主导。以下分别详述各模块的核心任务子项、所需技能、预期交付成果以及与其他模块的内部依赖关系。

## 模块1：储能系统 PCS 建模

### • 核心任务子项：

- 系统建模：基于项目要求构建级联储能PCS的仿真模型，包括35kV/25MW储能系统总体拓扑和H桥功率模块详细模型。模型需覆盖每相级联40个H桥模块的结构（包含IGBT开关器件、母线电容、取电电源、控制板等关键部件）。
- 工况模拟：按照比赛约束条件，对模型进行各种运行工况模拟。涵盖连续24小时运行场景、至少“一充一放”的日循环充放电功率曲线设计、电网侧3倍过载电流冲击场景以及环境温度在20°C~40°C波动对器件性能和寿命的影响等。通过仿真分析各工况下关键器件的应力变化（如IGBT电流/电压应力、结温变化，电容纹波电流等）。
- 寿命模型集成：在仿真模型中融入关键器件的寿命预测机制。根据获取的器件应力与热循环数据，采用寿命消耗模型估算**IGBT模块**和**母线电容**等的寿命衰减。例如，引入**半导体器件热循环寿命模型**、**电容剩余寿命模型**等，将运行工况转化为寿命消耗量。确保寿命计算结果清晰可追踪。
- 数据输出与分析：提取仿真结果中各关键器件的运行指标和寿命消耗指标，为后续优化策略提供依据。分析哪些因素对器件寿命影响最大（如过温、过流导致的寿命削减），为优化算法模块提供数据支持。

- 所需技能：电力电子建模与仿真（熟悉H桥级联拓扑、双向AC-DC变换原理），熟练使用仿真工具（MATLAB/Simulink, PSCAD 等）建立电力电子系统模型，热管理与器件寿命模型知识（了解IGBT热循环寿命、电容寿命模型等），以及一定的编程和数据分析能力，用于处理仿真输出数据。

### • 预期交付成果：

- 完整的级联储能PCS仿真模型文件（包含电路拓扑及关键器件寿命计算模块）。

- 各工况仿真结果报告和波形数据（电压、电流、温度曲线等），重点体现关键器件在不同工况下的应力与预计寿命消耗情况。
- 初步的关键器件寿命预测结果和分析报告（例如在基准工况下一段时间运行后器件寿命剩余百分比），为健康度评价提供定量基础。
- 将以上结果提供给优化算法模块，用于制定策略和校验算法效果。
- 内部依赖关系：本模块提供的模型和分析结果将直接支撑模块2和模块3的工作。  
**向模块2提供**关键器件寿命影响因素的数据和模型接口，便于模块2设计优化策略（如充放电曲线优化需以模型仿真反馈为依据）。**向模块3提供**实时仿真所需的模型简化方案或参数，以便模块3在HIL环境中运行近似的模型进行测试。建模工程师需与算法工程师反复沟通验证模型的正确性，并根据嵌入式实现需要对模型进行简化或调整，确保模型既具有物理准确性又能在实时环境下运行。模块1的输出还将提供给模块4，用于制作仿真结果图表和说明。各模块之间需保持密切沟通，以便及时根据模型仿真结论调整策略算法和测试方案。

## 模块2：优化策略算法

- 核心任务子项：
  - 充放电策略设计：根据系统需求与调研结果，制定储能系统的充放电功率控制策略。该策略需满足“一天至少一充一放”的基本要求，并结合电网调度需求设计合理的功率控制曲线（例如峰谷调度）。重点是在满足输出功率要求的同时，平抑功率波动，减少对PCS各H桥模块的应力冲击（如避免频繁大电流变化），从而延长关键器件寿命。
  - 寿命优化算法：开发算法以优化充放电调度，使关键器件的寿命影响最小化。例如，可采用优化算法（遗传算法、动态规划等）或控制策略（如模型预测控制）来在约束条件下优化功率分配。目标是在保证供能需求的同时，尽量降低IGBT结温峰值和波动、减少电容纹波电流等，从源头上延缓器件老化。算法需要考虑每日循环、3倍过载等工况对寿命的非线性影响，并据此调整控制策略。
  - 健康度指标构建：结合模块1的寿命分析结果，定义PCS系统的整体健康度评价指标。该指标应综合考虑所有H桥模块关键器件的健康状态。例如，可通过对每个模块IGBT和电容的剩余寿命进行归一化，提取最短板（寿命最短的模块）或计算加权平均寿命百分比，来定义一个0-100的健康度分值。需参考项目要求“结合关键器件寿命分析和其余器件特性分析，构建健康度评价指标，确保指标能够反映整个PCS系统的可靠性水平。
  - 算法仿真验证：将所提出的充放电策略和健康度计算方法，嵌入模块1的仿真模型中进行验证。在仿真中比较应用优化策略前后的关键器件应力和寿命变

化，验证策略有效性（例如，优化后IGBT温度波动减小X%，寿命延长Y%）。同时验证健康度指标随时间的变化是否与器件老化趋势吻合，确保指标设计合理。根据仿真结果迭代调整算法参数或策略逻辑。

- 嵌入式可实现性评估：评估所设计算法在嵌入式平台上的可实现性。考虑算法的计算复杂度、内存占用和实时性要求，尽可能简化算法逻辑（如采用查表或简化公式替代复杂计算），确保算法能够在实际控制器有限的资源下高效运行。为模块3提供算法代码接口或伪代码说明，便于在嵌入式系统中实现。
- 所需技能：优化控制理论与算法设计能力（熟悉充放电策略、能量管理算法），电力电子及电池管理知识（理解功率变换器的运行限制、电池特性等），可靠性工程与寿命预测知识（了解如何将应力-寿命模型融入控制决策），编程能力（能用MATLAB/Python进行算法开发与仿真，后续能用C/C++实现嵌入式代码），以及嵌入式系统基础（了解实时控制对算法执行时间和资源的限制）。
- 预期交付成果：
  - 优化策略算法说明书：详细描述充放电功率控制策略的逻辑（包含控制曲线设计依据、触发条件、算法流程图等）以及健康度评价指标的定义方法。
  - 算法仿真代码及结果：实现优化策略的源代码（MATLAB脚本或Python代码等）以及在仿真模型上的测试结果数据。重点输出包括：应用优化策略后的关键器件温度、电流曲线对比图，寿命消耗对比分析，健康度指标随时间的曲线等，以量化算法带来的寿命提升效果。
  - 嵌入式实现方案：针对嵌入式部署的算法简化方案与接口文档。例如，提供主要算法模块的伪代码、函数接口说明，及对运行资源需求和预计执行时间的评估。这将指导模块3进行实际代码移植。
  - 阶段性评估报告：总结算法设计的创新点和效果，包括如何满足比赛要求的实际可操作性（调度策略可执行度和正确率等），以及在创新性方面相较传统方法的改进之处，以便提供给模块4用于撰写报告和制作PPT。
- 内部依赖关系：本模块承上启下，与其他模块联系紧密。从模块1获取准确的仿真模型和关键器件寿命数据作为算法设计依据；没有可靠的模型支撑，优化策略的有效性无法验证。算法设计完成后，需与模块3协作，将算法部署到嵌入式硬件中进行测试，因此在设计过程中就需与模块3沟通嵌入式平台性能约束，必要时共同调整算法实现。算法产生的健康度指标和优化效果数据也将提供给模块4，用于丰富PPT和报告的内容，证明方案的有效性和创新性。模块2负责人需与模块1密切配合调试仿真、与模块3确认实现细节、与模块4提炼方案亮点，共同确保算法既有理论依据又能实际落地。

## 模块3：嵌入式系统与 HIL 台架实验验证

- **核心任务子项：**

- 嵌入式平台选型与环境搭建：选择合适的嵌入式控制器平台作为PCS控制单元（例如基于DSP或ARM内核的控制板），搭建开发环境。准备硬件在环（HIL）试验台架，将仿真模型中的电气部分（电网、电池、功率电路等）部署到实时仿真器或工业计算机上，以模拟真实运行环境，并确保该环境能与物理控制器进行信号交互。
  - 算法嵌入式实现：根据模块2提供的优化策略算法和健康度计算方法，将其用嵌入式编程语言实现（如用C/C++编写代码，或借助Matlab代码生成）。重点开发充放电功率控制的实时控制程序和健康度监测模块。在编码过程中，严格考虑实时性：确保控制循环周期满足系统要求（例如IGBT控制在毫秒级，健康度更新在秒或分级别）。**优化代码以降低运行资源需求（CPU占用、内存）和缩短执行时间。**如果算法过于复杂，需与模块2协商简化。
  - HIL联调测试：将编写好的嵌入式控制算法下载到控制器上，连接HIL仿真平台进行联调测试。设计测试用例，包括：标准工况下一天的运行（验证一充一放策略效果）、突发3倍过载电流场景（验证控制器对过流的响应及保护）、环境温度变化模拟输入（验证健康度算法对温度影响的处理）等。通过HIL实时仿真，让嵌入式控制器“操控”虚拟的PCS系统，观测系统响应。
  - 数据采集与性能评估：在HIL测试过程中记录关键数据：控制指令输出、PCS各模块电压电流、IGBT温度、健康度指标实时变化等。评估嵌入式系统性能，包括算法运行的周期和延迟、资源占用情况，以及控制决策的准确性和稳定性。确保策略在嵌入式环境下保持了仿真中的预期效果，没有出现例如控制失稳或计算超时等问题。
  - 问题反馈与优化：根据HIL测试结果，分析可能存在的问题。例如，若发现某些极端情况下健康度指标计算不准确或控制命令执行不及时，及时反馈给模块2调整算法；如果嵌入式资源不支撑当前算法复杂度，则进一步优化代码或调整硬件方案。在多轮测试-修改中逐步完善嵌入式实现的可靠性。最终，在HIL上实现系统长时间稳定运行，关键器件寿命预测和健康度评估功能正常。
- **所需技能：**嵌入式系统开发技能（熟练使用C/C++，掌握嵌入式调试工具），实时控制经验（了解控制器实时操作系统或中断调度机制，确保控制算法实时执行），硬件在环仿真知识（熟悉HIL原理，能够配置模拟电力电子系统与物理控制器通讯），电力电子与控制原理（理解PCS控制逻辑，能够对应仿真模型的信号与实际控制信号），以及一定的数据分析能力用于处理测试记录。
- **预期交付成果：**
    - 嵌入式控制程序：包含充放电控制策略和健康度计算的嵌入式源码和可执行程序。代码应有良好注释和模块划分，便于查阅和维护。

- **HIL测试报告**：详细记录各项测试工况下系统的表现，包括关键波形截图（如三相电压电流、IGBT温度曲线）、健康度指标随时间变化曲线等。报告中评估控制算法在实时运行中的有效性，例如：在日常循环中健康度下降速率减缓了多少，在过载冲击下控制响应是否快速限制了应力等。也要列出嵌入式性能指标（CPU使用率、控制周期执行时间、内存占用等）及是否满足要求。
- **演示视频及材料**：提供HIL联调运行的演示视频或现场演示资料。视频可展示控制器对虚拟PCS的控制过程，以及健康度指标实时更新的界面。还可以提供照片（如嵌入式硬件和HIL台架的搭建实物图）用于成果展示。
- **问题清单与解决方案**：在开发过程中形成的问题记录及相应的解决措施文档。例如，遇到过的实时性能瓶颈和优化方案，算法在嵌入式实现中与仿真的差异调整等。这既用于内部知识积累也可提供给模块4撰写经验总结。
- **内部依赖关系**：本模块的工作建立在前两模块输出的基础上，又为最后成果展示提供验证支撑。**需要模块1的支持**：获取或简化仿真模型用于HIL平台，使虚拟环境足够逼真；同时依赖模块1提供系统参数以正确设定HIL仿真边界条件。**需要模块2的输出**：拿到优化策略算法和健康度指标的详细说明或代码，以便移植实现；在实现过程中与模块2持续沟通，确保算法逻辑一致。**HIL测试中发现的问题需要反馈给模块2和模块1共同分析**（可能涉及模型不完善或算法需改进）。测试完成后的数据和结论则将**提供给模块4**，用于丰富PPT报告中的实证部分。模块3扮演将理论转为实践的关键角色，需要与其他模块高频互动：从模块2获取算法方案，从模块1获取模型支撑，同时将测试结果返回给二者协同改进，最终拿出经验验证可行的嵌入式实现方案供模块4展示。

## 模块4：PPT 与报告优化

- **核心任务子项**：
  - **材料汇总与内容梳理**：从前三个模块收集项目技术材料，包括系统模型架构图、优化策略流程图、仿真和HIL测试的结果数据、图表及视频截图等。梳理项目整体思路，形成从问题背景、方案设计、实施过程到结果分析的清晰逻辑主线，确保内容紧扣比赛主题并突出解决实际问题的指导意。
  - **PPT设计与制作**：根据比赛要求准备演示PPT方案。PPT需图文并茂、条理清晰，涵盖以下内容：项目背景和意义（介绍级联储能PCS及关键器件寿命问题），方案概要（四模块协同的总体方案图），模型与方法（模块1和2的技术细节，如模型搭建、算法创新点），实现与验证（模块3的嵌入式实施和HIL验证结果，包含关键图表和演示截图），以及结论与展望（总结健康度分析成果，对提升产品可靠性的意义）。在设计上突出重点数据和创新点，用简明 bullet points 搭配示意图表说明，避免大段文字堆砌。确保幻灯片视觉效果专业、美观，必要时对技术插图进行美工润色。

- **报告撰写与润色：**完善书面报告或方案说明文档（如果需要提交书面说明的话）。报告内容与PPT对应但更详实：包括项目背景调研、技术方案细节、实验数据分析和结论。重点章节如算法和模型部分要补充理论依据和引用支持，以展示方案的科学性和创新性。文字表述要求严谨通顺、突出团队原创贡献。在定稿前反复校对润色，确保没有歧义和错误，并在语言上做到简洁专业。
- **评审要点对照检查：**逐条对照比赛评选标准，检查PPT和报告中是否充分体现了系统功能完整性（例如是否展示了完整仿真模型和寿命计算结果）、策略和算法先进性（例如算法在嵌入式上的实现和效果）以及项目创新性。如果某方面展示不足，及时与相关模块负责人沟通补充材料或改进表达。在PPT中添加相应页章突出这些维度，例如增加“完整性验证”页面汇总作品功能、用数据支撑策略有效性的页面、以及“创新点”页面强调技术创新之处。
- **最终演示准备：**协调团队进行PPT讲解的排练和问答准备。根据每个人的分工，确定由谁在答辩中阐述哪部分内容，确保讲解深入浅出、时间分配合理。准备可能的评委提问答案，如模型假设依据、算法如何落地应用等。通过内部演练打磨表达，使团队成员清楚各自汇报重点并能相互衔接补充。
- **所需技能：**优秀的技术写作和幻灯片制作技能（能够将复杂技术内容以浅显易懂且有说服力的方式呈现），中英文资料整合能力（可能需要引用文献或说明理论依据），数据可视化和图表美化能力，熟悉比赛评审关注点和答辩技巧。另外需要良好的沟通协调能力，与技术团队配合提炼关键成果和亮点。
- **预期交付成果：**
  - **演示文稿(PPT)：**一份结构清晰、美观专业的PPT文件，预计包含主要内容如：项目简介、技术方案（建模、算法、嵌入式实现）的分模块介绍，仿真及实验结果图表，结论与展望等。PPT中配有必要的视频演示截图和照片，以增加直观性。
  - **书面报告/方案文档：**一份完整的项目报告，用于评委详细审阅。报告应与PPT内容一致且更加详尽，包含背景调研、设计方案细节、测试数据和分析、创新点说明等部分。报告中适当引用权威来源或比赛提供的数据，以增强说服力。
  - **辅助展示材料：**HIL演示短视频、模型仿真演示视频，以及关键代码片段或仿真模型文件的提交包等，用于佐证PPT中提出的结果（按照比赛要求，代码和模型作为作品的一部分一同提交）。此外，还包括演示讲稿或备注（speaker notes），帮助演讲者记忆要点。
  - **评审要点对照表：**一份内部使用的检查清单，列出评审指标和我方对应PPT/report页码或内容要点，确保没有遗漏评分点。这有助于临场答辩时快速定位内容回答评委提问。

- **内部依赖关系：**本模块几乎依赖于所有其他模块的输出。需要模块1提供系统模型示意图、仿真波形及寿命计算结果图表，用于展示模型完整性和寿命预测部分；需要模块2提供算法流程图、优化前后性能数据、健康度指标定义等内容，用于展示策略算法的有效性和创新性；需要模块3提供嵌入式实现照片、HIL测试结果曲线和性能数据，用于证明方案的可行落地性。模块4负责人将在项目后期同步参与各模块阶段性讨论，以充分理解技术细节，提炼关键亮点。期间若发现某模块结果不够直观或说服力不足，将及时反馈相关负责人补充实验或改进表达。最终由模块4整合大家的工作成果，确保呈现出一个协同一致、亮点突出的完整方案。通过明确的分工和紧密合作，四个模块各司其职又互相配合，确保项目高质量完成并在比赛中取得优异成绩。