

多能源协同保护系统在智能电网中的实现路径

丁乐伟 徐耿

国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司 宁夏吴忠 751100

摘要：在可再生能源大规模并网、多元负荷随机波动及电网拓扑结构愈发复杂的背景下，传统单一能源保护系统已难以保障智能电网的安全稳定运行。多能源协同保护系统通过整合电、热、冷、气等多能源网络的运行数据与保护资源，实现跨能源品类的故障感知、协同决策与联动控制，成为提升智能电网韧性与可靠性的关键技术方向。本文从多能源协同保护系统的架构设计切入，结合智能电网的数字化、信息化与自动化特性，深入剖析系统实现过程中的核心技术瓶颈，提出涵盖系统规划、技术验证、试点应用与规模化推广的分阶段可落地实现路径。经实践验证，该路径能有效提升多能源网络故障响应速度，降低事故扩大风险，为智能电网多能源协同保护系统的工程化应用提供理论支撑与实践参考。

关键词：多能源协同保护；智能电网；数据融合；协同决策

引言

全球能源转型进程中，智能电网正逐步摆脱传统“以电为中心”的单一能源网络模式，朝着“电-热-冷-气”多能源协同互补的综合能源系统方向演进。这一转型在显著提升能源利用效率、促进可再生能源消纳的同时，也使智能电网面临新的安全挑战。一方面，多能源网络间紧密的耦合关系使得单一能源系统的故障极易通过耦合节点扩散至其他系统，例如天然气管道压力骤降可能导致燃气轮机停机，进而引发区域电网功率缺额；另一方面，分布式光伏、风电等间歇性电源的大量接入，以及电动汽车、柔性负荷等多元化用电设备的普及，加剧了电网运行状态的动态变化，传统“离线整定、本地决策”的保护机制已无法适应复杂多变的运行场景。多能源协同保护系统的核心价值在于打破不同能源网络间的保护壁垒，通过实时共享各系统的电压、电流、压力、流量、温度等运行状态信息，构建跨能源品类的故障监测与保护体系，实现“全局感知、协同决策、联动控制”的保护目标。相较于传统保护系统，它不仅能提升故障识别的准确性与及时性，还可通过优化保护动作策略，减少非必要的负荷切除，降低故障造成的经济损失^[1]。鉴于此，本文结合智能电网的技术特征与工程实践需求，从架构设计、技术突破、实施步骤三个维度，构建多能源协同保护系统的实现路径，为其在智能电网中的规模化应用提供指导。

1 多能源协同保护系统的架构设计

多能源协同保护系统架构遵循“分层分区、协同联动”

原则，依托智能电网感知层、网络层、平台层、应用层形成闭环保护流程。感知层作为数据基础，通过PMU、智能电表、温度传感器等高精度设备，采集电、热、气网络实时数据，经边缘计算预处理后，以标准化协议接入分布式能源设备，确保数据全面准确；网络层构建“骨干网+接入网”架构，以光纤为主、5G专网为辅传输数据，借协议转换网关统一通信协议，凭网络切片与带宽动态分配保障故障数据优先传输；平台层基于“云-边融合”数据中台，通过多源异构数据融合算法整合数据，采用“深度学习+规则推理”模型诊断故障并生成最优保护策略；应用层将策略转化为指令，经执行、评估、优化模块落地，同时联动电网调度中心，确保保护与调度协同一致。

2 多能源协同保护系统实现的核心技术突破

2.1 多能源数据融合技术

针对多能源网络数据异构（如电力连续时序数据与天然气离散事件数据）、时空不一致（PMU50Hz采集与热力1Hz采集）及不确定性（传感器故障、传输丢包）问题，需采用“时空对准-特征融合-不确定性处理”三级方法。时空对准阶段，通过线性插值或样条插值统一数据时间尺度，结合地理信息系统匹配各能源网络物理节点坐标，消除数据空间错位；在特征融合阶段，使用主成分分析提取电压跌落幅度、温度变化率等关键特征，经归一化处理消除量纲差异，构建多维度特征向量；不确定性处理阶段，引入贝叶斯概率模型，结合相邻传感器历史数据与实时工况，量化修

正异常数据偏差，例如温度传感器故障时，可通过概率推理得出节点真实温度分布，保障融合数据可靠性，为后续故障诊断提供精准支撑^[2]。

2.2 协同保护决策算法

协同保护决策需要在满足多能源安全约束的同时，平衡故障处理效率与经济损失，因此构建“多目标优化-分层决策”模型。多目标优化环节，以“故障切除时间最短、负荷损失最小、设备动作次数最少”为目标，结合电网电压频率约束、热力温度波动约束、天然气压力约束建立优化函数，采用改进非支配排序遗传算法（NSGA-II），通过自适应交叉变异算子与精英保留策略提升解的质量与收敛速度；分层决策环节，按故障影响范围分级响应：故障仅波及单一能源局部区域，如配电线短路时，本地控制单元依据预设规则快速动作；影响多能源局部区域，如工业园区电网故障致热力站断电时，区域控制中心协调多系统保护；影响跨区域大范围时，上级调度中心统筹决策，例如工业园区故障中，既切断电网故障线路，又指令天然气系统增供燃气锅炉，实现效率与安全的平衡。

2.3 跨网络通信协调技术

多能源协同保护对通信的实时性、可靠性与安全性要求严苛，需从三方面构建保障体系。在实时性保障上，采用“边缘计算+优先级调度”策略：在各能源本地控制单元部署边缘节点，预处理故障数据仅上传故障类型、位置等关键信息，减少传输量；在通信网络中为故障数据与保护指令分配最高优先级，确保时延控制在50ms内，满足电力系统毫秒级响应需求。在可靠性保障上，要构建“多路径冗余通信”架构，为区域控制中心、重要电源节点配置光纤与5G专网双链路，主链路故障时100ms内自动切换至备用链路，同时采用数据分片加密传输与重传机制，避免数据丢失。在安全性保障上，通过SM4国密算法实现端到端加密，基于数字证书完成节点身份认证，搭配入侵检测系统实时监测DoS攻击、数据注入等异常，发现风险立即启动网络隔离与告警，筑牢通信安全防线。

2.4 动态安全控制技术

为应对多能源系统运行状态的动态变化，需建立“动态定值调整-自适应控制”体系。动态定值调整阶段，基于可再生能源出力、负荷水平、网络拓扑等实时状态，通过潮流计算、热力管网水力计算、天然气管道稳态计算等在线

方法，实时更新保护装置动作定值，例如分布式光伏出力骤增时，同步调整电网过流保护整定电流，避免保护误动或拒动。自适应控制阶段，在保护动作执行中，实时监测系统状态变化，若发现电压未按预期恢复，立即修正控制指令，增加备用电源出力；系统恢复阶段，采用“分步恢复”策略，先恢复医院、交通枢纽等重要负荷，再逐步恢复一般负荷，同时持续监测电压、压力、温度等参数，防止负荷骤增引发系统二次失稳，确保保护动作精准且系统恢复平稳。

3 多能源协同保护系统的分阶段实现路径

3.1 系统规划阶段（1-2年）

系统规划是多能源协同保护系统落地的基础环节，需从需求、技术、资源三方面统筹推进。首先开展多能源系统全面调研，通过实地勘察、数据采集与stakeholder访谈，掌握目标区域电、热、冷、气网络的拓扑结构、设备参数、运行负荷特性及现有保护系统缺陷，明确如多能源耦合节点故障扩散防控、间歇性电源并网保护等核心需求，同时结合区域能源发展规划（如可再生能源装机目标、综合能源园区建设计划），制定量化建设目标，如故障响应时延≤100ms、负荷损失率降低30%。其次进行技术路线选型，对比不同数据采集设备（如高精度PMU与普通传感器）、通信技术（光纤与5G专网）、决策算法的适用性，确定适配区域特征的技术方案，并参考国家标准《智能电网调度控制系统技术要求》，构建涵盖数据采集精度、通信协议、保护动作阈值的标准体系，确保系统兼容性。最后划分实施区域，按“先核心后外围”原则将目标区域划分为城市核心区、工业园区等子区域，明确各区域建设优先级与时间节点；同步规划资源配置，制定资金预算（设备采购、研发、施工费用），组建含电力、热力、信息技术的跨学科团队，完成传感器、通信网关等关键设备选型，为后续建设奠定坚实基础^[3]。

3.2 技术验证阶段（2-3年）

技术验证阶段需通过“仿真+物理”双重平台，全面检验核心技术可行性并迭代优化。先搭建多能源协同保护实验平台，仿真层基于MATLAB/Simulink、EnergyPlus构建电-热-气耦合仿真模型，可模拟可再生能源出力波动、设备故障等20+典型场景；物理层搭建微型实验系统，包含10kW分布式光伏、小型燃气轮机、500m模拟热力管网及配套传感设备，实现多能源系统物理运行状态复现。基于该平台开展核心技术验证：测试多能源数据融合技术，模拟传感器故

障、数据丢包场景，验证融合后数据误差率是否 $\leq 5\%$ ；验证协同保护决策算法，设置单一能源故障、多能源耦合故障场景，检测故障识别准确率（需 $\geq 95\%$ ）与决策时延（需 $\leq 100\text{ms}$ ）；测试跨网络通信技术，在不同网络负荷下监测传输时延（故障数据 $\leq 50\text{ms}$ ）、链路切换时间（ $\leq 100\text{ms}$ ）及加密安全性。针对验证中发现的问题，如算法收敛速度慢、通信时延超标，组织技术团队优化：通过改进算法结构、增加边缘计算节点提升决策效率，通过优化通信带宽分配、增设冗余链路改善通信性能，最终形成技术参数达标、稳定可靠的技术方案。

3.3 试点应用阶段（3-4年）

试点应用需选择多能源基础扎实、耦合性强的区域，如工业园区、新兴城区等，推动技术方案工程化落地。首先完成试点区域系统部署与集成，依据规划阶段技术方案，在试点区域关键节点安装PMU、温度/压力传感器等感知设备（覆盖率 $\geq 90\%$ ），搭建“光纤+5G”双层通信网络，部署多能源数据中台与应用模块；同时开展与现有能源管理系统（电网SCADA、热力监控系统）的集成调试，通过标准化接口实现数据互通与指令协同，确保系统能实时采集多能源数据、下发保护指令。随后进入3-6个月试运行阶段，采用“模拟故障+实际故障”结合方式测试系统性能：定期人为设置故障（如断开配电线路、调整天然气管道压力），检验系统故障识别、决策与动作效果；记录真实故障，如雷雨天气线路短路、负荷骤增下的系统响应，评估保护动作对多能源网络的影响（如电网电压恢复时间、热力管网温度波动范围）。试运行结束后，从技术、经济、社会三维度评估效果：技术上分析故障响应时延、识别准确率等指标；经济上核算负荷损失减少量、设备维护成本降低额；社会上调研用户满意度（需 $\geq 85\%$ ）。总结试点经验，如设备安装规范、运维流程优化建议，形成包含问题解决方案、实施要点的试点报告，为规模化推广提供实践依据。

3.4 规模化推广阶段（4-5年）

规模化推广需推动技术标准化、建立协同机制并实现大范围落地。首先推进技术方案标准化与产品化，基于试点经验梳理系统设计、设备选型、施工安装、调试运维的全流

程规范，形成行业认可的技术标准；同时联合设备厂商将核心技术（如数据融合模块、协同决策软件）转化为标准化产品，实现关键设备批量生产，降低建设成本（较试点阶段降低20%-30%）。其次建立政策支持与跨企业协同机制，联合政府部门出台财政补贴（对系统建设项目给予15%-20%资金补贴）、税收优惠（研发企业减免企业所得税）等政策；组织电网、热力、天然气企业签订协同协议，明确数据共享范围（如运行状态数据、故障数据）、保护动作责任划分及利益分配机制，解决跨企业数据壁垒与协作矛盾。最后开展大范围系统部署与运行监控，按标准化方案在目标区域（如全市、全省）分批次推进系统建设，优先覆盖能源消耗大、安全需求高的区域；建设统一的运行监控中心，实时监测各区域系统运行状态（如设备工况、数据传输、保护动作），配备专业运维团队（人均负责区域 $\leq 50\text{km}^2$ ），及时处理系统故障（响应时间 $\leq 2\text{h}$ ）；定期开展技术培训，提升运维人员多能源协同保护技能，确保系统长期稳定运行，最终实现多能源协同保护系统在智能电网中的全面覆盖，提升电网整体安全韧性。

4 结语

多能源协同保护系统是智能电网安全运行的关键，需通过合理架构、核心技术突破与分阶段实施推进。当前系统仍面临多能源耦合建模难、数据共享机制不完善、复合型人才短缺等挑战。未来可结合数字孪生、联邦学习技术提升系统性能，加强人才培养，推动系统在智能电网中广泛应用，支撑全球能源转型与能源安全。

参考文献：

- [1] 谈东平, 葛长俊, 戴军, 等. 服务区综合能源服务设施智能化建设 [J]. 中国公路, 2025,(18):27-35.
- [2] 贺新. 智能电网与分布式能源协同优化研究 [J]. 电力设备管理, 2025,(20):11-13.
- [3] 唐铭泽. 智能电网分布式能源协同优化控制方法研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.

作者简介：丁乐伟（1999—），男，回族，宁夏吴忠市，本科学历。