

新能源电气孤岛模式下构网储能黑启动能力评估框架

戴俊雄

云南电力技术有限责任公司 云南昆明 652701

摘要: 按照新型电力系统建设的进程节奏推进,高比例新能源接入与电网形态变革紧密相关,新能源电气孤岛运行场景正不断快速增多,构网储能作为孤岛模式下黑启动的核心电源,其拥有的黑启动能力直接关乎电力系统应急恢复安全。本研究致力于创建新能源领域的电气孤岛模式下构网型的储能系统黑启动能力评估的框架体系,从理论上支持黑启动电源选型、控制策略优化及系统安全运行工作开展。先对构网储能黑启动核心概念与孤岛运行特性界定,界定评估范畴与要紧目标;之后以启动、稳定、支撑、安全性能四个维度为依据选取关键评估指标,完整地建立多层次指标体系;之后提出层次分析法与模糊综合评价法相结合的评估模型,实现定性定量评估相结合;依靠云南某储能电站黑启动实例验证框架的科学性与可行程度。

关键词: 新能源电气孤岛; 构网储能; 黑启动; 评估框架; 指标体系; 模糊综合评价

引言

在“双碳”目标引领下,风电、光伏等新能源大规模并网,新型电力系统呈现“高比例可再生能源、高比例电力电子设备”特征,电网运行的随机性、波动性增强表现十分突出,电网因极端天气与设备故障面临停电风险剧增。黑启动作为电力系统全停后迅速达成供电恢复的关键技术,是保障能源安全的重要防线,按电源类型划分。传统黑启动依赖抽水蓄能、燃机电站等同步电源,但此类电源存在建设耗时久、环保缺陷多、地域限制引发问题多等弊端,难以符合新能源高渗透电网发展的实际需求。

一、新能源电气孤岛与构网储能黑启动核心理论

构网型储能借助自身特质完成电压频率搭建,具备独立组网与黑启动的可达性,凭借特性成为新型电力系统黑启动技术的关键发展方向。云南某储能电站成功实施国内首例百兆瓦时构网型储能电站黑启动试验,30秒即可完成供电恢复,转换效率超85%,经过验证得出构网储能黑启动的可行性与优越性。基于新能源特性的电气孤岛模式下,构网储能黑启动面临对多储能变流器实施同步控制、新能源出力波动冲击、负荷分级恢复协调等诸多挑战,其黑启动能力由储能荷电状态、控制策略、孤岛系统拓扑等多因素共同作用而定,从紧迫性上说明需马上构建科学完整的评估框架。

全球范围内就构网储能黑启动的学术研究大多围绕着突破控制技术瓶颈与单个点位的试验检验,如多机并

联控制、构网限流策略等技术攻关,从研究现状看,新能源电气孤岛场景下黑启动能力评估研究刚开启^[1]。现有评估标准如DL/T 1863-2018《独立型微电网运行管理规范》仅对黑启动给出基本定义与原则性要求,缺少具有针对性的评价指标与体系化方法。开展新能源电气孤岛模式下构网储能黑启动能力评估框架研究,厘定评估维度、架构指标体系、设立评估模型,构建提升构网储能黑启动可靠性、保障孤岛系统安全恢复所带来的理论及工程意义。

把公共电网故障或检修作为界定新能源电气孤岛的依据,新能源电源、储能系统与部分区域负荷构成的独立自治供电系统,其运行特性和大电网之间的差异十分显著,基于风电靠风能转化、光伏靠光能转化的发电原理。孤岛系统内新能源出力具有强波动性与随机性,负荷类型呈现多样化,存在不可预测的特性,导致该系统功率平衡难度大,频率与电压稳定性控制挑战突出。根据DL/T 1863-2018定义,孤岛系统黑启动是指全部停电后仅依靠内部电源实现启动的进程,而构网储能作为孤岛黑启动的核心“火种”,其启动过程中,从储能单元激活开始,逐步经历电压频率建立、负荷逐步接入,最终达成新能源协同并网等关键阶段。

从功能上看,构网储能和传统跟网型储能的核心区别在于前者具备虚拟同步机特性,采用控制策略去模拟同步发电机的惯量及阻尼特性,主动自主构建并维系统电压与频率,不必依靠外部电网参考信号。这一特性助力其在孤岛黑启动里迅速搭建稳定的电压频率基准,

为后续负荷与新能源电源的恢复给予有力支持。实现黑启动的能力本质上是构网储能孤岛环境下，冲破启动阻力、维持系统平稳、带动负荷让其他电源恢复的综合能力。

二、构网储能黑启动能力评估框架构建原则与目标

评估框架构建需依从科学性、系统性、针对性与可操作性四大核心原则开展。科学性原则必然要求评估指标与模型依赖构网储能黑启动机理与孤岛运行特性，符合电力系统固有运行规律；系统性原则从其系统性的本质对黑启动全流程全面覆盖，统筹兼顾启动、稳定、支撑、安全等多维度性能；靶向性准则聚焦新能源电气孤岛场景，全面思索新能源波动跟孤岛运行的特定约束；可操作性原则本质上要求选取易量化计算的指标，评估方法不烦琐，成效极为显著，可在工程实际应用中施展。

评估核心目标包括三个层面：一是精准评估以构网储能为核心在特定孤岛场景下的黑启动能力等级，为电源选配上的合理规划提供科学依据；二是识别黑启动过程中的薄弱环节，为控制策略优化与系统改进探索前行方向；三是借助多方面措施保障孤岛系统黑启动过程的安全稳定，增加应急供电恢复的可信系数与效率^[2]。围绕上述目标，评估框架需实现从指标选取、体系构建到模型计算、结果应用的全流程衔接闭环，让评估结果切实有效指导工程实践工作。

评估框架应把动态性与通用性统筹兼顾起来，动态性从适应不同孤岛拓扑、新能源渗透率、负荷特性等场景变化的角度展现出来，依靠指标权重调整以实现差异化测评；不同容量和技术类型的构网储能系统，体现了通用性对框架的要求，对工程领域多方面具备应用价值，在具体构建过程中，需结合现有标准规范如T/SPSTS 036—2024《构网型电化学储能黑启动技术导则》，说明达成评估框架合规又有权威效果。

三、构网储能黑启动能力评估指标体系设计

基于上述原则与目标，以启动、稳定、支撑和安全四个关键性能维度搭建多层次评估指标体系，共包含12项具体指标，做到对构网储能黑启动能力的完整呈现。启动性能维度把关注点放在黑启动的快速与成功要素上，表明构网储能从停止状态到打造稳定电压频率基准的本质，选取黑启动响应时间、启动成功率、满负荷启动能力3项指标^[3]。黑启动响应时间指从接到启动指令到系统电压频率达到稳定范围的时间，云南某储能电站试验中该指标仅为30秒，呈现了构网储能快速启动时的优势；启动成功率为多次启动试验中成功建立稳固系统的次数

占比，是衡量启动可靠性的关键尺度；满负荷启动能力指构网储能可带动的最大负荷占其额定容量的比例，直接反映启动功率支撑能力。

以稳定性层面衡量黑启动期间系统电压与频率的稳定控制水准，筛选出电压偏差、频率偏差、电压频率波动幅度3项指标。根据GB/T 15945《电能质量 电力系统频率偏差》与GB/T 12325《电能质量 供电电压偏差》标准，明确指标阈值：频率偏差应控制在 $\pm 0.5\text{Hz}$ 以内。电压偏差在 $\pm 7\%$ 以内，从电压频率最大变化的方面定义波动幅度，体现系统应对负荷冲击以及新能源波动的抗干扰能力实质，构网储能借助虚拟惯量控制和阻尼调节手段可有效降低波动幅度。

支撑性能维度凭借衡量彰显构网储能对孤岛系统恢复的支撑之力，选取新能源协同并网能力、备用容量充足率、负荷恢复速度3项指标关乎系统稳定性。新能源协同并网能力体现为构网储能带动新能源场站恢复并网最大容量的占比实质，显示其在新能源消纳上的支撑意义；备用容量充足率指实际备用容量与所需最小备用容量的比值，根据DL/T 1863—2018要求，该系统须具备充足的有功与无功备用，以应对功率波动；负荷恢复速度指单位时间内可恢复的负荷容量，以直接影响供电恢复效率。

安全性能维度作为关键因素保障黑启动过程的设备与系统安全，选取变流器过载能力、SOC维持水平、故障隔离能力3项指标。变流器过载能力指其应对短时间出现的过载现象的最大应对倍数，构网储能借助构网限流策略的优化可增强过载支撑能力；黑启动过程里，储能SOC的最低值就是SOC维持水平，需高于安全阈值以预防过放损坏；故障隔离能力是在系统突发故障时，迅速将故障元件隔离开来的能力，采用完备的继电保护配置达成，维持黑启动过程正常运行，不被故障搅扰中断。

四、构网储能黑启动能力评估模型建立

选用层次分析法与模糊综合评价法相联合的组合评估模型，从定性评估转变至定量评估构网储能黑启动能力。首先要做的是借助层次分析法确定各评估指标的权重，着重思索不同指标对黑启动能力影响程度的分野，构建层次结构模型，目标层为构网储能黑启动能力评估结果，准则层为启动性能、稳定性能、支撑性能、安全性能四个维度，12项指标层为具体指标^[4]。邀集电力系统、储能技术等领域的专家对各层级指标两两对比计分，构建判断矩阵，达成一致性检测后开展各指标权重核算。启动性能下的启动成功率以及稳定性能下的电压

频率偏差,对黑启动能力的影响存在紧密关联,应赋予较高权重。

随后采用模糊综合评价法进行等级评估,将黑启动能力划分为优秀、良好、合格、不合格四个等级,明确各指标在不同等级下的隶属函数。借助实地试验、虚拟仿真等手段采集各指标实际数据,代入隶属函数计算隶属度,构建模糊评价矩阵,采用层次分析法来敲定指标权重,经由模糊矩阵合成运算达成综合评价结果,实现对构网储能黑启动能力等级的判定。该组合模型具有定性分析与定量计算的优势长处,可高效应对评估过程中的模糊性与不确定性,提升评估结果的准确水平与可靠水平。

为凸显保障评估模型的实用性,需建立机制以有效获取数据。经由构网储能系统监控平台采集黑启动操作中的实时运行数据,如电压、频率、功率、SOC等;凭借硬件在环模拟与整站实证检验获得极限工况里的指标数据,如最大过载能力、极端新能源波动下的稳定性能等。建立针对特定类型指标数据的校准机制,依据现有的标准规范与工程实践经验矫正数据,将焦点置于获取真实有效评估数据上。

五、实例验证与分析

用云南某储能电站这一实例验证评估框架科学性及其可行性。该电站为国家能源局聚焦新型储能的试点示范项目,总容量50兆瓦/100兆瓦时,采用磷酸铁锂电池,拥有构网型完整控制功能,成功实施国内首个针对百兆瓦时构网型储能电站的黑启动试验,结合本文所搭建的评估框架,采用综合方式对该电站黑启动能力进行全面评估。首先明确评估边界是后续评估工作的基础:孤岛系统含有高桥变电站、储能电站及周边1.6万户家庭负荷,新能源接入比例为30%。

基于现场试验以及监控数据采集各指标实际数值:黑启动响应时间30秒,启动成功率100%,满负荷启动能力85%;电压偏差0.3%,频率偏差0.2Hz,电压频率波动幅度0.5%;新能源协同并网能力90%,备用容量充足率120%,负荷恢复速度200kW/min;变流器过载能力1.2倍,SOC维持水平35%,故障隔离能力100%^[5]。为精准评估指标,采用层次分析法确定各指标权重后,借助模糊综合评价开展计算得出综合隶属度:优秀等级隶属度0.75,良好等级隶属度0.23,隶属度为0.01,对应合格与不合格两个等级,评估结果为优秀,与该电站实际黑启动体现的情况相契合。

实例评估结果表明,该框架能全方位、精准无误地体现构网储能和启动能力,找出该电站在启动速率与稳定管控方面的长处,同时也分析出,以极端新能源波动为前提,备用容量储备有优化潜力。基于评估结果,提出优化建议:助力储能变流器宽频振荡抑制能力上扬,积极提升应急备用容量的配置水平,以实施管理措施应对高比例新能源接入的极端工况,该典型实例充分验证了评估框架的工程实用性,能够促进构网储能黑启动技术的优化与推广取得实际成效。

结论

本文围绕新能源电气孤岛模式下电网储能黑启动能力评估问题开展研究,系统构建了由核心理论、构建原则、指标体系、评估模型有机结合而成的完整评估框架。从启动、稳定、支撑、安全四个性能维度为该框架挑选12项关键指标,借助层次分析法与模糊综合评价法的组合模型,可全面、准确地评估构网储能黑启动能力等级。通过云南某储能电站实例验证,该框架展现出卓越的科学性与强大的工程实用性,考核结果与实际运转表现高度吻合,能切实引导参与组网的储能设备应急重启电源类型选择、储能控制策略改良升级与关键系统安稳运作。后续的研究可自下述方向开展:一是完善特殊环境下的指标体系,添加与环境适应性关联的指标;二是优化评估模型,扩充对大规模集群黑启动场景的评估本领;三是结合数字孪生技术,构建动态实时评估平台,实现黑启动能力的在线评估与预警,为新型电力系统应急恢复提供综合技术全面支撑。

参考文献

- [1] 蒋毅,朱跃贴,周怡,等.融合“风光互补”智能微网技术的新型高可靠性站用交流系统[C]//浙江省电力学会2017年度优秀论文集.2017.
- [2] 李振坤,周伟杰,钱啸,等.有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J].电工技术学报,2015,30(21):9.
- [3] 许家政.佛山电网电厂自动解列与保护配合问题的研究[D].华南理工大学,2010.
- [4] 王波.全球最大容量构网型10MW级风机下线[J].2024.
- [5] 魏鑫.考虑分布式电源的微电网自愈控制技术研究[D].山东大学,2020.