

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

压缩空气储能与风电光伏耦合 系统运行规范

Technical requirements for long-cycle operation and maintenance of compressed air
energy storage power stations

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 总体要求	3
4.1 基本原则	3
4.2 功能要求	4
4.3 接入及电能质量要求	4
5 系统结构与功能	4
5.1 系统总体结构	4
5.2 压缩空气储能子系统功能	4
5.3 风电与光伏子系统功能	5
5.4 耦合控制与能量管理功能	5
6 技术与性能要求	5
6.1 出力平滑与功率调节性能	5
6.2 效率指标	6
6.3 储能容量与运行压力要求	6
6.4 并网与电能质量指标	6
6.5 可靠性与可用率	7
6.6 安全与环境要求	7
7 运行过程要求	7
7.1 运行模式管理	7
7.2 充气工况运行要求	7
7.3 放气发电工况运行要求	8
7.4 联合平滑运行要求	8
7.5 应急与事故工况	8
8 监测、保护及控制要求	8
8.1 监测系统	8
8.2 保护系统	8
8.3 控制系统与通信	9
9 试验与证实方法	9
9.1 一般规定	9
9.2 出力平滑性能试验	9
9.3 往返效率试验	9
9.4 电能质量试验	9
9.5 可靠性试验与运行验证	10
9.6 安全与应急演练验证	10
10 文件和记录	10
10.1 文件管理	10
10.2 记录管理	10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏国信苏盐储能发电有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：江苏国信苏盐储能发电有限公司、华电电力科学研究院有限公司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、中国科学院广州能源研究所、山东建筑大学、中盐盐穴综合利用股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司、北京中研华采技术服务有限公司。

本文件主要起草人：马丙周、张东兴、赵珈卉、宋永兴、谢卫炜、谢宁宁、唐海宁、张健、葛艺、陈留平、常勇、贺扬、徐孜俊、张国强、郑志美、王兆福、钟声远、乐志斌、夏卫彬。

压缩空气储能与风电/光伏耦合系统运行规范

1 范围

本文件规定了压缩空气储能与风电/光伏耦合系统（以下简称“CAES - 风光耦合系统”）在并网运行、调峰调频和辅助服务等工况下的总体要求、系统结构与功能、技术与性能要求、运行过程要求、监测、保护及控制要求、试验与证实方法、文件和记录等内容。

本文件适用于采用压缩空气储能系统与风电场、光伏电站通过公用电网或专用集电线路进行电气耦合的电站和示范工程。采用其他形式储能（如电化学、飞轮等）或其他一次能源与压缩空气储能耦合的系统，可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 10070 城市区域环境振动标准
- GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 14285 继电保护和安全自动装置技术规程
- GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
- GB/T 19153 容积式空气压缩机能效限定值及能效等级
- GB/T 19963.1 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电
- GB/T 19964 光伏电站接入电力系统技术规定
- GB/T 31464 电网运行准则
- GB/T 43687 电力储能用压缩空气储能系统技术要求

3 术语和定义

GB/T 43687界定的下列术语和定义适用于本文件。

3.1

压缩空气储能电站 compressed air energy storage power station

利用低谷电能驱动压缩机将空气压缩并储存在地下盐穴、矿井或高压容器中，在需电高峰通过膨胀机/燃气轮机等装置释放压缩空气能量发电的电站。

4 总体要求

4.1 基本原则

4.1.1 CAES - 风光耦合系统运行应遵循安全可靠、绿色低碳、经济高效和友好并网的原则。

4.1.2 系统运行应满足电网调度机构对功率有功/无功、频率、电压及电能质量的要求，符合 GB/T 12325、GB/T 15945、GB/T 14549、GB/T 15543 等标准规定的指标限制。

4.1.3 在满足安全前提下，应优先利用风电/光伏能源进行充气，提升可再生能源消纳水平，减少弃风弃光率。

4.1.4 应根据风电/光伏资源特性和负荷需求，合理设置储能容量与功率比值，建议储能额定充放电功率占接入风光装机容量的15%~40%，储能时长4 h~8 h。

4.2 功能要求

4.2.1 系统应具备以下基本功能：

- a) 风/光输出功率平滑与短时间预测误差补偿；
- b) 高峰时段削峰填谷，配合电网调峰；
- c) 提供一定范围内的有功调节和一次/二次调频能力；
- d) 提供无功调节、支撑接入点电压；
- e) 提供黑启动能力（条件具备时）；
- f) 运行状态监测、故障诊断与事件记录。

4.2.2 系统运行应保证 24 h 连续监视，关键运行参数的实时数据刷新周期不应大于 4 s；用于频率调节的快速响应参数刷新周期不应大于 1 s。

4.3 接入及电能质量要求

4.3.1 接入技术要求应符合 GB/T 19963.1、GB/T 19964 以及 GB/T 31464 的相关条款。

4.3.2 CAES - 风光耦合系统并网点电压偏差应符合 GB/T 12325 的规定，10 kV~110 kV 电压等级偏差不应超过额定电压的 $\pm 7\%$ 。

4.3.3 系统在满负荷充、放工况下向公共电网注入的各次谐波电流含有率应不大于 GB/T 14549 对非线性负荷的限值要求，总谐波畸变率 THD 不应大于 5%。

4.3.4 三相电压不平衡度应控制在 GB/T 15543 规定的 2% 以内，一般运行不宜超过 1.5%。

5 系统结构与功能

5.1 系统总体结构

5.1.1 CAES - 风光耦合系统通常由以下子系统构成：

- a) 风电子系统：风力发电机组、箱式变电站、集电线路、场内升压站等；
- b) 光伏子系统：光伏组件阵列、组串逆变器、汇流箱、集电线路、升压站等；
- c) 压缩空气储能子系统：压缩机、储气装置（盐穴、矿井或高压罐）、余热回收及热管理系统、膨胀机与发电机组、辅助设备；
- d) 公共电气系统：并网变压器、开关设备、母线、保护及测控系统；
- e) 耦合控制与调度系统：能量管理系统（EMS）、监控与数据采集系统（SCADA）、自动发电控制系统（AGC）、自动电压控制系统（AVC）；
- f) 辅助系统：冷却系统、消防系统、通风与氮气/惰性气体系统、安全监控与视频系统等。

5.1.2 典型结构示意图见图 1。

图 1 CAES - 风光耦合系统典型结构示意图

（拟构图）

风电场和光伏电站通过集电线路接入公共母线，CAES 通过双向变流或直接接入同一母线，由耦合控制中心统一控制。

5.2 压缩空气储能子系统功能

5.2.1 压缩机装置

压缩机段应实现多级压缩、级间冷却和高效能量回收，压缩比、排气温度应控制在设备设计范围内。典型参数范围见表 1。

表 1 压缩机段主要参数参考范围

项目	典型数值/范围	备注
单台额定功率	10 MW~80 MW	按电站规模选型
进气压力	0.10 MPa~0.12 MPa (绝压)	以当地大气压为基准
排气最高压力	7 MPa~15 MPa	地下盐穴可取 8 MPa~12 MPa
排气最高温度	≤ 220 °C	与 GB/T 19153 参照
设计等熵效率	≥ 0.82	按厂家保证值

5.2.2 储气装置

储气装置应符合下列要求：

- a) 盐穴储气运行压力应控制在设计允许范围的 70 %~95 % 之间，例如设计允许 8 MPa，则正常运行区间为 5.6 MPa~7.6 MPa；
- b) 储气压力日内波动率一般不超过最大允许压力的 15 %；
- c) 存在水封的井筒管柱应定期监测井口和井下压力，压力波动速率不应大于 0.2 MPa/min。

5.2.3 膨胀机与发电机组

膨胀机与发电机组应符合下列要求：

- a) 膨胀机应能在 30 %~110 % 额定负荷范围内稳定运行，变负荷速率不应大于 10 %P_n/min (P_n 为额定功率)；
- b) 发电机电压偏差应控制在 ±5 % 以内，频率偏差应满足 GB/T 15945 的规定；
- c) 在 AGC 投运条件下，从接到有功调节指令到有功出力达到指令值的响应时间不应大于 30 s，快速响应工况下宜不大于 10 s。

5.3 风电与光伏子系统功能

5.3.1 风电子系统应满足 GB/T 19963.1 的要求，具备低电压穿越、电压支撑和有功/无功调节能力。

5.3.2 光伏子系统应满足 GB/T 19964 的要求，具备低电压穿越和无功支撑能力。

5.3.3 风电场和光伏电站应将实时出力、预测出力（短期预测 15 min~6 h）以及可利用容量信息传输至耦合控制中心。

5.4 耦合控制与能量管理功能

5.4.1 耦合控制系统应至少包含以下功能模块：

- a) 风光预测与负荷预测模块；
- b) 储能状态估计（SOC 等效、储气压力、有效储能量）模块；
- c) 经济调度与优化决策模块；
- d) 功率分配与运行模式切换模块；
- e) 保护及安全逻辑模块；
- f) 数据记录与事件分析模块。

5.4.2 系统应实现对下列运行模式的自动切换：

- a) 风光富余电能优先充气模式；
- b) 风光—储能联合平滑出力模式；
- c) 储能独立调峰/调频模式；
- d) 事故或孤网运行下的应急保供模式。

6 技术与性能要求

6.1 出力平滑与功率调节性能

6.1.1 系统耦合后，在 10 min 时间尺度内并网有功功率变化率不应大于额定并网功率的 10 %/min；

6.1.2 在 1 min 时间尺度内并网有功功率变化率宜不大于额定并网功率的 5 %/min；

6.1.3 平滑效果可采用标准差法进行评价，见公式（1）：

$$\sigma P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{N}} \dots\dots\dots (1)$$

其中：

- σP —— 并网有功功率标准差，单位为 MW；
- P_i —— 第*i*个采样时刻并网功率，单位为 MW；
- \bar{P} —— 一段时间内并网功率平均值，单位为 MW；
- N —— 采样点个数。

6.1.4 耦合运行后，系统在典型风光波动工况下的功率标准差应较未耦合时降低不小于 30 %。

6.2 效率指标

6.2.1 储能系统往返效率

在额定充放工况下，系统的电-气-电往返效率 $\eta_{\text{round-trip}}$ 应符合式 (2)，且不应低于表 2 的限值。

$$\eta_{\text{round-trip}} = \frac{E_{\text{discharge}}}{E_{\text{charge}}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $E_{\text{discharge}}$ —— 一次完整放电周期输出电能，单位为 MWh；
- E_{charge} —— 对应充电周期输入电能，单位为 MWh。

表 2 不同规模 CAES 系统往返效率参考限值

额定放电功率/MW	储能时长/h	往返效率 $\eta_{\text{round-trip}}/\%$ (不低于)
≤ 50	4~8	52
50~150	4~8	55
≥ 150	4~10	58

6.2.2 综合能量利用率

考虑到风光富余电能的利用，建议采用年度等效能量利用率指标对系统进行综合评价，可在附录中给出计算方法。

6.3 储能容量与运行压力要求

6.3.1 储气容量应满足风光预测波动和电网调度需求，宜使系统具备至少 2~3 个典型晚高峰时段（每次 2 h~3 h）的调峰能力。

6.3.2 盐穴 CAES 容量设计宜按有效储气体积 V_{eff} 和工作压力区间 $[P_{\text{min}}, P_{\text{max}}]$ 计算可用储能量（工程应用时应由设计单位给出更精确的热力计算）：

$$E_{\text{usable}} \approx \frac{k}{k-1} \cdot P_{\text{min}} V_{\text{eff}} \left[\frac{P_{\text{max}}^{k-1}}{P_{\text{min}}^{k-1}} - 1 \right] / 3.6 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- k —— 空气等熵指数，取 1.30~1.40；
- P_{min} 、 P_{max} —— 最小和最大工作压力，单位为 Pa；
- V_{eff} —— 有效储气体积，单位为 m^3 ；
- E_{usable} —— 可用储能量，单位为 MWh。

6.4 并网与电能质量指标

6.4.1 并网电压偏差、频率偏差指标应满足 GB/T 12325、GB/T 15945 的规定。

6.4.2 总谐波电压畸变率（THDu）在公共连接点处不应超过 3 %，单次谐波电压含有率不应超过 2 %（参照 GB/T 14549 A 类用户限值）。

6.4.3 电压闪变短时值 P_{st} 不应超过 0.8，长时值 P_{1t} 不应超过 0.6（参照 GB/T 12326 中公用电网推荐值）。

6.5 可靠性与可用率

6.5.1 CAES子系统年平均可用率 A_{year} 不应低于 95%；风光—储能整体系统年平均可用率不应低于 90%，可靠性常规指标要求具体见表3。

6.5.2 单次故障停机恢复时间宜不大于4 h，关键设备（压缩机组、膨胀机组、主变压器等）故障应有备份或应急方案。

表 3 系统可靠性指标

指标名称	指标要求
压缩机组年可用率/%	≥ 96
膨胀机组年可用率/%	≥ 96
储气装置年可用率/%	≥ 99
耦合控制系统年可用率/%	≥ 99.5
系统平均无故障运行时间/h	≥ 500

6.6 安全与环境要求

6.6.1 储气洞（罐）压力、温度监测应设多重冗余，具备超压泄放和紧急卸载功能。泄放阀动作压力宜为 P_{max} 的 105%~110%。

6.6.2 储气装置的泄漏浓度监测应满足相关安全规范，氧含量低于 19.5% 或可燃气体浓度接近爆炸下限20% 时应启动报警。

6.6.3 噪声、振动等环境影响指标应符合 GB 12348、GB 10070 等有关规定，具体工况应视项目类型执行相关国家标准。

7 运行过程要求

7.1 运行模式管理

7.1.1 运行单位应根据季节气象条件、风光出力特性和电网调度指令，制定年度、月度和日运行计划。

7.1.2 日运行计划中应至少明确：

- a) 预计风光出力曲线；
- b) 预期负荷曲线和电价/辅助服务价格信息（如适用）；
- c) CAES 充放电时段、功率和预计储能变化；
- d) 备用容量安排和应急预案。

7.2 充气工况运行要求

7.2.1 充气时，宜优先消纳风电/光伏富余电能，当预测弃风弃光功率 P_{curtail} 大于一定阈值 P_{th} （一般取风光装机容量容量的 5%~10%）时，自动进入强化充气模式。

7.2.2 充气功率的变动速率应控制在压缩机允许范围内，通常不应大于 10% P_n /min。

7.2.3 充气过程中系统主要运行参数监测数据参照表4的内容，充气过程中应实时监测储气压力、温度和压缩机段振动、电流、电压等参数，一旦出现以下情况之一应自动减载或停机：

- a) 储气压力达到 P_{max} 的 98%；
- b) 级间温度超过允许上限的 105%；
- c) 压缩机转速或振动超出厂家规定值。

表 4 主要运行参数监测参考表（充气工况）

监测项目	典型设定值/范围	报警值	跳闸值
储气压力	$0.7 P_{\text{max}} \sim 0.98 P_{\text{max}}$	$0.98 P_{\text{max}}$	$1.02 P_{\text{max}}$
级间温度	$\leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$	$210 \text{ }^\circ\text{C}$	$220 \text{ }^\circ\text{C}$
压缩机电机电流	$\leq 1.0 I_n$	$1.05 I_n$	$1.10 I_n$
压缩机轴振动	$\leq 4.5 \text{ mm/s}$	6 mm/s	7.1 mm/s

储气温度	-10℃~60℃（视设计而定）	±10℃ 超范围	±15℃ 超范围
------	-----------------	----------	----------

7.3 放气发电工况运行要求

7.3.1 放气时应根据电网调度指令和日运行计划确定开启机组数和出力水平，主要运行参数检测见表5。

7.3.2 膨胀机升负荷速率宜不大于 15 %P_n/min，在 AGC 投运情况下可按调度要求提高至 20 %P_n/min，但应满足设备安全限制。

7.3.3 放气过程中，储气压力不应低于 P_{min}，若压力接近 P_{min} 的 102 % 时应触发减负荷逻辑。

7.3.4 对参与一次调频的机组，应按电网规定的一次调频死区和斜率设置（如：死区 ±0.03 Hz，调频斜率 2 %P_n/0.1 Hz）。

表 5 主要运行参数监测参考表（放气工况）

监测项目	典型设定值/范围	报警值	跳闸值
储气压力	1.02 P _{min} ~0.95 P _{max}	1.02 P _{min}	P _{min}
膨胀机进口温度	450 ℃~650 ℃	430 ℃（低）/670 ℃（高）	410 ℃（低）/700 ℃（高）
膨胀机转速	0.95 n _N ~1.05 n _N	1.03 n _N	1.06 n _N
发电机定子电流	≤ 1.0 I _n	1.05 I _n	1.10 I _n
发电机定子温度	≤ 120 ℃	130 ℃	140 ℃

7.4 联合平滑运行要求

7.4.1 在风光出力快速上升或下降时（例如 1 min 内变化超过装机容量的 5 %），应由 CAES 自动补偿一部分功率变化，以保证并网点功率波动满足 6.1 条款要求。

7.4.2 能量管理系统应实时计算下一时段（5 min~15 min）的风光预测偏差，并预先配置 CAES 的充放策略。

7.4.3 当储能状态（等效SOC）低于 20 % 或高于 90 % 时，应限制 CAES 的相应放电或充电功率，避免过度充放。

7.5 应急与事故工况

7.5.1 当电网发生大面积电压跌落、频率严重偏差（偏差超过 0.5 Hz）、母线故障等情况时，系统应按预设逻辑进入应急模式，包括：

- 根据低电压穿越策略保持一定有功出力和无功支撑；
- 在频率大幅下降时，快速增加有功出力（若储能充足）；
- 在电压高过压或系统孤网时，按保护定值快速解列。

7.5.2 储气系统发生重大泄漏、井口火灾等事故时，应优先保障人身安全和环境安全，立即执行紧急泄压和系统停机程序。

8 监测、保护及控制要求

8.1 监测系统

8.1.1 监测系统应采用 SCADA/EMS 结构，采集的基本量包括电量、电压、电流、频率、谐波、压力、温度、振动、阀位等。

8.1.2 重要监测点的数据采集精度不应低于下列要求：

- 电压、电流测量误差不应大于测量值的 ±0.5 %；
- 功率及电能测量误差不应大于 ±1 %；
- 压力测量误差不应大于 ±0.25 %FS；
- 温度测量误差不应大于 ±0.5 ℃。

8.2 保护系统

8.2.1 电气保护应符合 GB/T 14285 的要求，主要包括：

- 过流、过负荷保护；

- b) 过压、欠压保护；
- c) 失步、失磁保护；
- d) 接地故障保护等。

8.2.2 工艺保护应对压缩机、膨胀机、储气装置设置多级保护，保护定值应与设备设计协调，有关主要定值范围可参考表4、表5。

8.3 控制系统与通信

8.3.1 CAES - 风光耦合系统应具备与电网调度中心的双向通信能力，通信协议宜采用 IEC 60870-5-104、IEC 61850 等标准协议。

8.3.2 控制系统重要装置应采用双机热备或冗余配置，关键通信链路应具有环网冗余通道。

9 试验与证实方法

9.1 一般规定

9.1.1 试验应在系统建成并通过单机、子系统调试后进行，包括出力平滑性能试验、往返效率试验、电能质量试验、可靠性试验等。

9.1.2 试验过程中应记录环境条件（温度、气压）、运行参数及电网工况等信息。

9.2 出力平滑性能试验

9.2.1 试验目的

验证 CAES - 风光耦合系统对风光出力波动的平滑效果是否满足本标准 6.1 的规定。

9.2.2 试验条件

风光出力波动显著的典型日（如多云有风日）；CAES 具备充放空间（等效 SOC在 30 %~80 %）。

9.2.3 试验方法

试验方法包括下列内容：

- a) 以 1 s 或 2 s 为采样间隔记录风光原始出力、CAES 出力以及系统并网点总出力；
- b) 分别计算试验时段内风光原始出力和平滑后总出力的标准差 σ_{P1} 、 σ_{P2} （按公式（1））；
- c) 计算平滑效果提升率：

9.2.4 判定准则

R不应小于 30 %，并网功率变化率应符合 6.1.1 和 6.1.2 的规定。

9.3 往返效率试验

9.3.1 试验目的

确定规定工作点下 CAES 的电-气-电往返效率 $\eta_{\text{round-trip}}$ 。

9.3.2 试验步骤：

- a) 选择代表性充电工况，使储气压力从 P_1 升至 P_2 ；
- b) 测量对应充气周期内的电能输入 E_{charge} (MWh)；
- c) 在不改变系统工况前提下进行一次完整放电，使压力从 P_2 降至 P_1 ，测量输出电能 $E_{\text{discharge}}$ ；
- d) 按式（2）计算往返效率。

9.3.3 试验次数

试验次数不应少于 3 次，取平均值作为判定结果。

9.4 电能质量试验

电能质量试验应包括下列要求：

- a) 测量地点：公共连接点（PCC）。
- b) 测量项目：电压偏差、频率偏差、谐波、电压波动和闪变、不平衡度。
- c) 测量时间不应少于 24 h，数据分辨率应满足相关电能质量标准要求。
- d) 判定依据：测量值应符合 GB/T 12325、GB/T 15945、GB/T 14549、GB/T 12326 和 GB/T 15543 的相关限值要求。

9.5 可靠性试验与运行验证

9.5.1 在系统投运后的连续 12 个月内，统计实际可用小时数、故障次数、故障停机时间等，计算系统可用率和平均无故障运行时间。

9.5.2 当可用率低于本标准 6.5 的限值时，应分析原因并制定改进措施。

9.6 安全与应急演练验证

9.6.1 每年至少组织一次全系统应急演练，包括储气装置超压、泄漏、电气故障和失电等典型事故情形。

9.6.2 演练应记录响应时间、操作准确率和系统恢复时间等指标，评估应急流程有效性。

10 文件和记录

10.1 文件管理

运行单位应建立完善的技术档案和运行记录制度，包括：

- a) 系统设计和调试资料；
- b) 设备出厂试验和现场试验报告；
- c) 日常运行记录、故障记录和检修记录；
- d) 运行优化分析报告和节能评估报告。

10.2 记录管理

所有运行数据和试验记录保存期限不应少于10年；涉及安全和环境保护的记录保存期限不应少于工程寿命周期。
