



团体标准

T/CES XXX-XXXX

沙储热系统能效评估导则

Guidelines for Energy Efficiency Evaluation of Sand-Based
Thermal Energy Storage Systems

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 录..... I

前 言..... II

1 范围..... 3

2 规范性引用文件..... 3

3 术语和定义..... 3

4 总则..... 4

5 评估流程..... 4

6 沙储热能效评估指标体系..... 5

7 数据采集..... 5

附 录 A（规范性附录） 指标统计及计算方法 7

附 录 B（资料性附录） 能效评估报告 9

附 录 C（资料性附录） 基础数据清单..... 10

附 录 D（资料性附录） 沙储热系统能效指标评价表..... 11

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会电力能效技术工作组归口。

本文件起草单位：国网甘肃省电力公司电力科学研究院、国网甘肃省电力公司、国网甘肃省电力公司酒泉供电公司、华中科技大学、中国科学院电工研究所

本文件主要起草人：李亚昕、梁琛、牛继恩、赵龙、魁五军、罗利、李吉侗、向昱瑾、彭小圣、吴理心、薛谦谦、覃国元、杨劼、刘启冉、霍群海、杨兴琼

本文件为首次发布。

沙储热系统能效评估导则

1 范围

本文件规定了沙储热系统能效评估的术语和定义、评估流程、指标体系及数据采集要求。

本文件适用于新建、改建、扩建及在运的以沙子作为介质进行储热的沙储热系统的能效评估。其他类型固体颗粒储热系统的能效评估可参照执行。

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 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则

GB/T 2589 综合能耗计算通则

GB/T 15316 节能监测技术通则

GB/T 15913 风机机组与管网系统节能监测

GB/T 41308—2022 太阳能热发电站储热系统性能评价导则

DL/T 645 多功能电能表通信协议

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJG 229 工业铂、铜热电阻检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

沙储热系统 sand-based thermal energy storage system

一种利用沙子颗粒材料作为主要储热介质，通过电加热使其存储热能，并在需要时通过冷却释放热能的储热装置及其附属设备组成的系统。通常包括充热单元、储热单元、换热单元、保温系统等。

3.2

有效储热介质 effective heat storage medium

实际参与系统充/放热循环且产生有效温差的储热沙体，不包含处于内部死区或无效保温夹层内的沙体。

3.3

完全充热状态 fully charged state

沙体平均温度达到设计最高允许温度的状态。

3.4

工作放热状态 fully discharged state

沙体平均温度降至设计最低允许温度的状态。

3.5

储热利用率 storage utilization rate

实测完全充热状态到工作放热状态之间，有效储热介质实际累计储热量占设计工况下可用储热量的百分比，反映储热空间被有效利用的程度。

3.6

充热效率 charging efficiency

实测工作放热状态转化到完全充热状态，有效储热介质实际累计储热量与输入系统热能总量的比值。

3.7

放热效率 discharging efficiency

实测完全充热状态转化到工作放热状态，系统对外释放热能总量与沙体累计释热量的比值。

3.8

辅机耗电率 auxiliary power consumption ratio

沙储热系统边界内所有辅助设备（风机、泵、控制系统、电伴热等）的耗电量，与同一周期内系统输入的总电量的比值，以百分数表示。

3.9

风机效率 fan efficiency

循环风机运行时，有效风功（风机进出口全压差与体积流量的乘积）占风机输入电功的百分比。

3.10

日静置热损失率 daily static heat loss rate

沙储热系统达到完全充热状态后静置 24 h，期间系统散热总量占静置开始时刻有效储热介质总储热量的百分比，表征储热装置保温结构的隔热性能。

3.11

综合能效指数 comprehensive energy efficiency index

由储热利用率、充热效率、放热效率、辅机耗电率、风机效率、日静置热损失率六项指标的加权求和得到，用于划分沙储热系统的总体能效等级。

4 总则

4.1 评估原则

沙储热系统能效评估应遵循独立、客观、科学的原则，评估所用数据应真实、完整、可追溯。评估方应具备开展能效测试与评估的相应能力；委托方应提供设计文件、运行记录等必要资料，并配合监测点安装与数据确认。

4.2 计量单位与折标

能效评估中能量单位采用千焦（KJ）；电能换算为热能时按 3600KJ/(kWh) 折算；标准煤当量折算按 GB/T 2589 执行。

4.3 评估结论与报告

评估完成后应出具能效评估报告，报告内容参见附录 B；评估结论应包括单项指标得分、综合能效指数及总体等级，并对不合格指标提出原因分析与改进建议。

5 评估流程

5.1 评估活动包括资料性审查、现场检查、现场测试等，可通过查阅资料、现场调查、分析评估、现场询问、现场测试等方式开展。评估人员应记录评估打分和评估对象。

5.2 评估前，应首先进行评估资料收集并确定评估内容。

5.3 评估结论中，应对评估项目（储热装置、换热单元、辅机系统及系统整体）进行总结，对符合要求的项目和不符合要求的项目进行客观描述；评估过程中同期完成整改的问题项，经专家组核实后按最终情况写入评估结论。

5.4 评估完成后，专家组应出具评估报告，包括系统概况、评估内容、评估结论、评估建议等部分，评估报告框架模板见附录 B，其中表 D.1 为能效指标评价表。

6 沙储热能效评估

6.1 指标权重

沙储热系统指标基本权重划分见表 1。

表 1 沙储热系统指标基本权重划分

序号	指标名称	方向	权重 w_i
1	储热利用率	正向	0.20
2	充热效率	正向	0.20
3	放热效率	正向	0.20
4	辅机耗电率	反向	0.15
5	风机效率	正向	0.10
6	日静置热损失率	反向	0.15

6.2 评分原则

6.2.1 沙储热系统综合能效指数得分应根据指标得分和相应权重系数，按公式计算：

$$CEI = \sum_{i=1}^6 w_i \cdot R_i \quad (1)$$

式中：

w_i ——各指标权重，见表 1；

R_i ——第 i 项指标的得分，见表 2。

表 2 沙储热系统指标得分计算标准

序号	指标名称	满分分值	得分标准
1	储热利用率	100	1) 达成率 $\geq 100\%$ ，记 100 分 2) $90\% \leq \text{达成率} < 100\%$ ，记 95 分； 3) $80\% \leq \text{达成率} < 90\%$ ，记 85 分； 4) $70\% \leq \text{达成率} < 80\%$ ，记 75 分； 5) $60\% \leq \text{达成率} < 70\%$ ，记 65 分； 6) $40\% \leq \text{达成率} < 60\%$ ，记 50 分； 7) 达成率 $< 40\%$ ，记 30 分
2	充热效率	100	
3	放热效率	100	
4	辅机耗电率	100	
5	风机效率	100	
6	日静置热损失率	100	
注：对于正向指标（储热利用率、充热效率、放热效率、风机效率）：达成率= (实测值/设计值) $\times 100\%$ 对于反向指标（辅机耗电率、日静置热损失率）：达成率 = (设计值 / 实测值) $\times 100\%$			

6.2.2 沙储热系统能效指数得分大于等于 90 分为 A 级；得分为 80~90 分为 B 级；得分为 70~80 分为 C 级；得分为 60~70 分为 D 级；得分低于 60 分为 E 级。

7 数据采集

7.1 采集监测点

监测点应覆盖边界内全部能量交换环节：储热体上、中、下三点温度，换热水箱进出口水温，电加热器、辅机及系统总进线的电量，环境温湿度。测点应满足附录 A 各指标计算需要，经评估方与委托方确认后实施，设置与监测方法应符合 GB/T 15316 的规定。

7.2 采集时间间隔

储热体与换热介质温度等核心参数采样间隔不大于 10 s，环境温湿度不大于 60 s，电能表累积读数不大于 15 min；数据应连续记录，不得中断。

7.3 采集测量要求

统计期应含 1 个完整“充热—静置—放热”循环，累计不少于 48 h。仪表应经检定或校准：电能表不低于 0.5 级，温度传感器误差不大于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。各通道时间偏差不大于 1 s，异常数据按 3σ 剔除，缺失比例不大于 0.5%。能源计量器具应符合 GB 17167 的规定。

7.4 采集内容

沙储热系统能效评估的数据采集内容应包括：

- a) 电能：电加热器输入电量、辅机分项电量、系统总输入电量，分别计量；
- b) 热能：储热体三测点温度、进出口水箱温度；
- c) 辅助流：环境温湿度，静置期储热体平均温度。

全部数据带北京时间标准时间戳和防篡改数据校验，电子归档 ≥ 10 年。

附录 A（规范性附录） 指标统计及计算方法

沙储热能效评估指标体系由 6 项指标构成，具体指标如下：

A.1 指标计算方法

储热性能测试可参照 GB/T 41308—2022。

a) 储热利用率

实测完整循环内，有效储热介质由完全充热状态降至工作放热状态的平均温降，占设计可用温降的百分比，反映“设计储热空间”被利用的程度。当储热体当量热容为常数时，该比值等于实际累计储热量占设计可用储热量的百分比。

$$\eta_u = \frac{T_{\text{dis,start}} - T_{\text{dis,end}}}{T_{\text{des,max}} - T_{\text{des,min}}} \times 100\% \quad \text{公式节 (下一节)(.1)}$$

式中：

η_u ——储热利用率，单位为百分数（%）；

$T_{\text{dis,start}}$ ——放热开始时储热体三测点平均温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{\text{dis,end}}$ ——放热结束时储热体三测点平均温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{\text{des,max}}$ ——设计最高储热温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{\text{des,min}}$ ——设计最低放热温度，单位为摄氏度（℃）。

b) 充热效率

充热期内有效储热介质净储热量占电加热器输入电能折算热量的百分比，衡量“充得进”的能力。

$$\eta_{ch} = \frac{C_s \cdot \Delta T_{\text{charge}}}{E_{\text{heat}} \times 3.6} \times 100\% \quad (.2)$$

式中：

η_{ch} ——充热效率，单位为百分数（%）；

C_s ——储热体当量热容，单位为千焦开尔文（kJ/K）；

ΔT_{charge} ——蓄热温升，单位为摄氏度（℃）；

E_{heat} ——计入再蓄热量，单位为千瓦时（kWh）。

c) 放热效率

放热期内系统对外输出热量占有效储热介质释热量的百分比，衡量“放得出”的能力。

$$\eta_{dis} = \frac{Q_{\text{out}}}{C_s \cdot \Delta T_{\text{dis}}} \times 100\% \quad (.3)$$

式中：

η_{dis} ——放热效率，单位为百分数（%）；

Q_{out} ——放热侧实测放热量，单位为千焦（kJ）；

C_s ——储热体当量热容，单位为千焦开尔文（kJ/K）；

ΔT_{dis} ——放热温降，单位为摄氏度（℃）；

d) 辅机耗电率

辅机耗电量占输入总电量的百分比，越低越经济。

$$\alpha_{aux} = \frac{E_{aux}}{E_{total}} \times 100\% \quad (.4)$$

式中：

α_{aux} ——辅机耗电率，单位为百分数（%）；

E_{aux} ——辅助设备总耗电量，单位为千瓦时（kWh）；

E_{total} ——系统输入总电能，单位为千瓦时（kWh）。

e) 风机效率

风机有效风功占输入电功的百分比，体现风机运行经济性。风机效率的测试与监测应按 GB/T 15913 的规定执行。

$$\eta_{fan} = \frac{\Delta p \cdot V}{E_{fan} \times 3.6} \times 100\% \quad (.5)$$

式中：

η_{fan} ——风机效率，单位为百分数（%）；

ΔP ——风机进出口全压差，单位为帕（Pa）；

V ——体积流量（标准状态），单位为立方每秒（ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）；

E_{fan} ——风机输入电功，单位为千瓦时（kWh）。

f) 日静置热损失率

完全充热状态静置 24 h 期间，有效储热介质温降占其工作温区（完全充热与工作放热状态温差）的百分比，越低保温性能越好。当储热体当量热容为常数时，该比值等于静置期间散热总量占起始储热量的百分比。

$$\beta_{loss} = \frac{T_{start} - T_{end}}{T_{dis,start} - T_{dis,end}} \times 100\% \quad (.6)$$

式中：

β_{loss} ——24 h 日静置热损失率，单位为百分数（%）；

T_{start} ——静置 24 h 开始时储热体三测点平均温度，单位为摄氏度（℃）；

T_{end} ——静置 24 h 结束时储热体三测点平均温度，单位为摄氏度（℃）。

A.2 不确定度评定

各指标的扩展不确定度评定应按照 JJF 1059.1 规定的要求执行。所有实测能效值须给出扩展不确定度 U （ $k=2$ ）：

1，电测量： $U \leq 1\%$ ；

2，流量测量： $U \leq 2\%$ ；

3，温度测量： $U \leq 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ；

4，最终能效指标： $U \leq 3\%$ 。

超出限值时应在报告中声明并分析来源。

附录 B（资料性附录） 能效评估报告

B.1 项目概况

沙储热项目规模、工程概况，储热系统构成及主要工艺、设备参数，储热介质的具体成分及典型热物性参数，评估边界的划定及本次评估的运行工况。

B.2 评估及测试方法

沙储热系统能效评估的基本规定，设计与运行数据的收集情况、数据筛选条件；能效测试依据的标准、测试设备、测点、仪表等，现场测试方法及试验条件。

B.3 评价指标取值、计算说明及分析

B.3.1 储热利用率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明储热利用率的设计值、实测值的取值来源与计算过程，评价其达成率及得分。

B.3.2 充热效率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明充热效率的设计值、实测值的取值来源与计算过程，评价其达成率及得分。

B.3.3 放热效率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明放热效率的设计值、实测值的取值来源与计算过程，评价其达成率及得分。

B.3.4 辅机耗电率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明辅机耗电率的设计值、实测值的取值来源与计算过程，评价其达成率及得分。

B.3.5 风机效率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明风机效率的设计值与实测值，评价其达成率及得分。

B.3.6 日静置热损失率及评价

根据附录 A 规定的计算方法，说明日静置热损失率的设计值与实测值，评价其达成率及得分。

B.3.7 综合能效指数及评价

根据 6.2 规定的计算方法计算综合能效指数（CEI），评价总体等级。

B.4 结论及建议

提交沙储热系统能效指标评价表，分析指出指标差距，并针对差距给出指导性意见及建议。

附录 C（资料性附录） 基础数据清单

沙储热系统能效评估数据采集清单见表 C.1。

表 C.1 沙储热系统能效评估数据采集清单

数据类别	序号	参数名称	符号	单位	数值	数据来源	采集要求与说明
收集数据 (设计及物性)	1	设计储热最低/最高温度	T_{min} / T_{max}	°C		查阅资料	来源于项目设计说明书
	2	储热体平均比热容	c_s	kJ/(kg·K)		取样化验	按测试周期内平均工况取值
	3	储热体质量	m_s	Kg		查阅资料	来源于设计文件或装料记录
	4	换热水箱水体质量	m_w	Kg		查阅资料	按水箱有效容积与水的密度折算
	5	换热水箱罐体质量及比热	m_t / c_t	kg / kJ/(kg·K)		查阅资料	用于温升法计算放热量 Q_{out}
	6	热力折标煤系数	-	kgce/MJ		查阅资料	依据 GB/T 2589 取值
	7	电力折标煤系数	-	kgce/kWh		查阅资料	依据 GB/T 2589 取值
实测数据 (热力流体)	8	储热体三测点温度	$T_1、T_2、T_3$	°C		在线实测	采样间隔≤10 s，用于计算平均温度
	9	换热水箱水温（初值/终值）	T_{w1} / T_{w2}	°C		在线实测	采样间隔≤60 s；冷侧进口、热侧出口各设一点
	10	静置期储热体平均温度	T_{start} / T_{end}	°C		在线实测	用于日静置热损失率；静置期间不得投运辅机
	11	风机进出口全压差	ΔP	Pa		在线实测	采样间隔≤60 s
	12	送风体积流量	V	m³/s		在线实测	采样间隔≤60 s，须做温压补偿
实测数据 (电能消耗)	13	电加热器输入有功电量	E_{heat}	kWh		在线实测	0.5 级电能表，累积读数记录间隔≤15 min
	14	辅机（风机/泵）总耗电量	E_{aux}	kWh		在线实测	0.5 级电能表，用于计算辅机耗电率
	15	系统总输入电量	E_{total}	kWh		在线实测	电加热器耗电与所有边界内辅机耗电之和
	16	风机输入电功	E_{fanl}	kWh		在线实测	0.5 级电能表

附 录 D（资料性附录） 沙储热系统能效指标评价表

沙储热系统能效指标评价表见表 D.1。

表 D.1 沙储热系统能效指标评价表

编号	指标名称	单位	设计基准值	实测评估值	达成率	权重	得分	评级
1	储热利用率	%						-
2	充热效率	%						-
3	放热效率	%						-
4	辅机耗电率 (反向)	%						-
5	风机效率	%						-
6	日静置热损失率 (反向)	%						-
CEI	综合能效指数							
评价意见								
(日 期)								
(评价单位)								

注：单项得分按附录 A 计算，仅用于 CEI 加权，不单独定级。