

团 体 标 准

T/CSEE XXXX—XXXX

隐极同步发电机适应灵活性运行技术导则

Technical guide for cylindrical rotor synchronous machines to adapt flexible
operation

(征求意见稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国电机工程学会 发布

目 次

前言.....	3
1 范围.....	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	4
4 符号和缩略语.....	4
5 总则.....	5
6 发电机适应灵活性运行技术要求.....	5
附录 A （资料性）灵活性运行对发电机的影响.....	8
附录 B （资料性）EOH.....	10

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准化管理办法》、《中国电机工程学会标准化管理办法实施细则》的要求，依据 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。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会电机标准专业委员会技术归口和解释。

本文件起草单位：.....。

本文件主要起草人：.....。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

隐极同步发电机适应灵活性运行技术导则

1 范围

本文件规定了隐极同步发电机适应灵活性运行的技术要求。
本文件适用于隐极同步发电机及其附属系统。

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/T 7064 隐极同步发电机技术要求
GB/T 20140 隐极同步发电机定子绕组端部动态特性和振动测量方法及评定
GB/T 29626 汽轮发电机状态在线监测系统应用导则
DL/T 438 火力发电厂金属技术监督规程
DL/T 492 发电机环氧云母定子绕组绝缘老化鉴定导则
DL/T 596 电力设备预防性试验规程
DL/T 838 燃煤火力发电企业设备检修导则
DL/T 970 大型汽轮发电机非正常和特殊运行及维护导则
DL/T 1164 汽轮发电机运行导则
DL/T 1766.1 水氢氢冷汽轮发电机检修导则第1部分：总则
JB/T 10499 透平型发电机非正常运行工况设计 and 应用导则
T/CEEMA 002 煤电机组发电机节能、供热、灵活性改造技术导则
国能发安全[2023]22号 防止电力生产事故的二十五项重点要求（国家能源局）

3 术语和定义

3.1

灵活性运行方式 flexible operation mode

灵活性运行方式是指根据电网运行需求，发电机频繁变负荷、快速变负荷、深度调峰、调压调频、热备盘车、长期停备等运行方式。

3.2

等效运行时间 equivalent operating hours

对各种工况运行发电机寿命影响程度进行折算，将运行时长综合计算为等效运行时间。

3.3

等效启停次数 equivalent start-stop times

发电机调峰运行时负荷波动与启停影响类似，即负荷升降次数等效为启停次数。

4 符号和缩略语

4.1 符号

下列符号适用于本文件。

P_N : 额定负荷;

T_e : 等效运行时间;

N_e : 等效启停次数。

4.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

EOH: 等效运行小时数 (Equivalent Operating Hours);

ESST: 等效启停次数 (Equivalent Start-Stop Times)。

5 总则

灵活性运行严重影响发电机定子、转子等零部件安全可靠和运行寿命, 零部件不同材料间的胀差加速绝缘老化、引起结构局部松动、磨损、开裂等。为适应灵活性运行, 新机和在役发电机应满足结构要求, 加强零部件状态评估和周期性检修, 计算发电机 EOH, 结合状态和设计寿命及时更换零部件, 加强发电机温度、振动、漏油、漏氢、漏水等运行监测, 以及异常状态的分析 and 处理。

6 发电机适应灵活性运行技术要求

6.1 定子

6.1.1 结构要求

定子结构符合以下技术要求。

- a) 定子线圈槽内应采用有紧力补偿的径向固定结构;
- b) 出槽口宜采用垫块固定;
- c) 定子端部应能承受灵活性运行引起热胀冷缩导致的松动、磨损、开裂等问题。

6.1.2 检修要求

定子检修措施符合以下技术要求。

- a) 关注定子线圈变色、发空、电气性能下降等问题, 定期评估绝缘状态, 必要时更换或升级;
- b) 加强槽楔紧固状态检查;
- c) 加强定子端部固定、电连接检查和端部动态特性试验, 对松动、磨损、开裂等及时处理;
- d) 加强定子铁心松紧度、片间绝缘状态、铁心端部过热检查, 宜进行铁心磁化试验;
- e) 氢冷发电机测温元件出线板宜采用新型穿墙密封接头。

6.1.3 运行要求

加强对定子温度、轴瓦振动、漏油、漏氢、漏水、异音等监测和分析, 对于安装了相关监测装置的发电机, 加强对绝缘过热、局部放电、端部振动等监测和分析。

6.2 转子

6.2.1 结构要求

转子结构符合以下技术要求。

- a) 转子端部匝间绝缘拼缝部位应采用加强结构;

- b) 线圈固定应采用轴向滑动结构；
- c) 端部应采用轴向弹性支撑结构；
- d) 转子引线和线圈连接处应设置柔性结构。

6.2.2 检修要求

转子检修符合以下技术要求。

- a) 灵活性运行 15 年左右，宜进行转子全面解体检查、清理、绝缘更换和滑移层修复等工作；
- b) 加强端部线圈、端部固定件等检查，变形线圈应整形或更换；
- c) 加强转轴、护环、叶片和风扇座等部件高应力区无损检测。

6.2.3 运行要求

加强转子轴振、励磁电流、励磁电压、磁化等监测和分析，对于安装了相关监测装置的发电机，加强对转子绕组匝间短路、轴电压轴电流等监测和分析。

6.3 附属设备

6.3.1 集电环和刷架

集电环和刷架检修符合以下技术要求。

- a) 加强滑环表面检查，必要时加工或更换；
- b) 加强集电环温度、碳刷电流、打火等监测；
- c) 宜配备碳粉收集装置。

6.3.2 氢油水系统

氢油水系统符合以下技术要求。

- a) 宜配备氢气干燥循环风机；
- b) 冷却水系统应能满足水流量控制，包括定子水系统二次水流量和氢气冷却器水流量；
- c) 应在线监测定子线圈内冷水系统氢气泄漏量；
- d) 宜配备氢气提纯净化或隔离装置。

6.3.3 监测系统

监测系统配置符合以下技术要求。

- a) 转子采用氢冷、空冷的发电机应配备转子线圈匝间短路监测装置；
- b) 宜配备定子线圈端部光纤测振装置；
- c) 宜配备集电环综合监测装置；
- d) 宜配备发电机智能诊断专家系统，通过趋势分析、专家诊断加强状态监测。

6.4 其他要求

发电机停机时，铜空心导线受冷却水腐蚀、绝缘系统受湿度影响，集电环、励磁机受环境影响，发电机零部件易腐蚀和劣化，应符合以下技术要求。

- a) 对于定子水内冷发电机，停备时每周运行水系统至少一次，每次至少 8 小时，确保冷却水电导率恢复合格，运行时，关闭水冷却器的二次冷却水；
- b) 对于氢冷发电机，未排氢热备时应保持氢气循环风机和氢气干燥器运行；监视氢系统监测状态，每周监测定子和转子绝缘；
- c) 对于空冷发电机和励磁机，停备时应定期运行空气加热器；

- d) 停盘车时，转子应每周旋转 180°，同时大齿向上。

附录 A
(资料性)
灵活性运行对发电机的影响

A.1 深度调峰对发电机的影响

建设新型电力系统,电网要求火电、核电机组在保障基本能源供应的基础上将承担更多的调节功能,越来越多的隐极同步发电机运行于调峰等灵活性工况,且调峰范围将超出设计的 $50\% \sim 100\%P_N$ 的基本负荷范围,称为“深度调峰”。深度调峰超出了常规设计的运行范围,尤其是频繁、快速的深度调峰,热循环胀差、应力对发电机尤其是定子端部、转子绕组造成严重影响。

发电机结构所用材料不同,定子铁心、转子本体为钢材料,定子铜线和转子铜线为铜材料,槽楔、线圈绝缘等为非金属材料,其线性热膨胀系数、导热系数差别较大。深度调峰时,转子励磁电流和定子电流与负荷变化成正比,电流产生的损耗发热与电流的平方成正比。如升负荷时,铜材料因发热量增大快速热膨胀,绝缘材料因热传导受热膨胀,钢材料受绝缘材料和冷却介质热传导而膨胀,三种材料的热膨胀量差异较大,引起材料间产生相对摩擦,或者无法相对移动而产生很大应力,导致固定结构松动,绝缘磨损、老化、发空、电气性能下降,铜线变形,振动加剧等问题。

深度调峰还会导致机内氢气温度压力波动导致密封件老化加速、漏氢量增大等问题。此外,氢气油密封结构磨损导致漏油恶化,污染定子、转子和集电环等部件,特别是机内油污、杂质等异物随风路进入转子,容易堵塞风路、集聚和污染匝间绝缘,造成匝间短路的风险急剧增加。

A.2 频繁启停、热备盘车对发电机的影响

发电机频繁启停、热备盘车主要是加速旋转部件劣化,如转子线圈要承受高速旋转的离心力、启停应力的大幅变化,端部弹性结构和滑移结构容易疲劳失效,转子铜线特别是端部顶匝线圈容易蠕变而发生变形,进而可能发展成匝间短路,严重时包间短路。转子经常性的盘车会因转轴挠度的变化,线圈间、线圈与绝缘间加大磨损,这在大容量柔性转轴上更容易产生,此外槽楔也会加大磨损。

频繁起停机、反复通过临界、并网等加大了对转轴的机械损耗,低周疲劳应力可造成转子金属结构件上裂纹的产生和扩大。对于转子齿部、应力集中的R区,护环和风扇柄等承受应力较大的部件,在正常离心应力上叠加低周应力,会加速材料的疲劳,缩短使用寿命。

A.3 长期停备对发电机的影响

长期停备时,发电机绝缘材料容易受潮、老化,转子静止不动容易永久弯曲变形,金属结构件如铁心、滑环等容易锈蚀,氢、油、水等附属系统可能出现性能下降。

A.4 调压调频对发电机的影响

随着新能源的接入,电网电压、频率变化较以往更为突出,电压频率变化超出限制后,定子端部磁负荷显著增加,铁心端部局部过磁通,损伤铁心端部冲片的绝缘性能,容易导致铁心熔融等事故。负荷大幅变化,尤其深度调峰时,定转子磁力中心线偏差,发电机定子汽端磁负荷增加,发电机定子端部铁心故障尤其是汽端大幅增加。同时,负荷大幅变化带来的温度变化导致振动加剧、铁心松动。

综上所述,灵活性运行对发电机的影响见表A.1。

表 A.1 灵活性运行对发电机的影响

工况	机理	影响后果
频繁变负荷 快速变负荷 深度调峰	定子温度胀差	定子槽内松动、磨损
		定子铁心松动、磨损、短路
		定子端部松动、磨损、裂纹
		定子绝缘加速老化
	转子温度胀差	转子线圈端部变形
		转子绝缘跑位、磨损、污染
		转子线圈端部滑移受阻、热不平衡
		转子弹簧板等疲劳断裂
	机内温度压力波动	密封件加速老化
		漏氢
	漏油	污染部件
		铁心和定子线圈松动
		转子匝间短路及接地
电流变化、载流不均	集电环温度高、打火	
水系统大幅波动	水系统调节能力不足	
频繁启停 热备盘车	胀差、漏油	加速绝缘材料老化
		加速线圈、结构件磨损及松动
	应力疲劳	转轴高应力区、护环、叶片加快疲劳
长期停备	受潮	绝缘受潮劣化
		金属结构件生锈腐蚀、集电环打火
	转子变形	转子永久弯曲
调压调频	定子铁心磁负荷增加	端部发热损伤

附录 B
(资料性)

EOH

发电机灵活性运行将对零部件寿命产生影响，如深度调峰加速了绝缘老化、EOH 增加，按零部件状态和设计寿命，安排检修周期和更换时间。

EOH 根据发电机常规运行时间、深度调峰时长、热备盘车时长、停备时长、ESST、启停次数等按不同折算系数计算得出，不同工况的折算系数主要根据我国制造商、电厂和电科院等积累的经验总结而来：

$$T_e = K_1 t_1 + K_2 t_2 + k_3 t_3 + k_4 t_4 + n t_5 + \sum N_e t_5 \quad (1)$$

式中：

T_e ——EOH；

t_1 ——30% P_e 以上运行时间，h；

K_2 ——30% P_e 及以下运行等效系数；

t_2 ——30% P_e 及以下运行时间，h；

K_3 ——热备盘车运行等效系数；

t_3 ——热备盘车小时数，h；

K_4 ——停备等效系数；

t_4 ——停备小时数，h；

n ——启停次数；

t_5 ——启停等效时间，h；

N_e ——ESST。

表 B.1 不同功率的系数

额定值	K_1	K_2	K_3	K_4	t_5
$S_N \geq 600\text{MVA}$	1	0.95	1.5	0.3	20
$S_N < 600\text{MVA}$		0.9	1.3	0.2	10

表 B.2 不同负荷的 ESST

发电机负荷	N_e
$50\%P_N \leq P < 30\%P_N$	0.6
$30\%P_N \leq P < 20\%P_N$	0.8
$P \leq 20\%P_N$	1

示例 1：

某电厂 660MW 水氢冷发电机，2008 年投运，2008 年至 2017 年 30% P_N 以上年均运行 7500h、热备盘车 300h，年均启停 10 次；2018 年至 2023 年 30% P_N 以上年均运行 6000h、热备盘车 400h、停备 30 天，调峰日均一个循环、25% P_N 运行 2h，年均启停 20 次。此发电机 2008 年至 2017 年 EOH 计算如下：

$$T_{e1} = 1 \times 7500 \times 10 + 1.5 \times 300 \times 10 + 10 \times 10 \times 20 = 81500 \text{ (h)} = 9.3 \text{ (年)}$$

2018 年至 2023 年 EOH 计算如下：

$$\begin{aligned} T_{e2} &= 1 \times 6000 \times 5 + 1.5 \times 400 \times 5 + 0.3 \times 30 \times 24 \times 5 + 0.8 \times 20 \times 365 \times 5 + 0.95 \times 2 \times 365 \times 5 + 20 \times 20 \times 5 \\ &= 67247.5 \text{ (h)} = 7.7 \text{ (年)} \end{aligned}$$

可知深度调峰加速了发电机零部件劣化速度，主要零部件设计寿命和灵活性运行寿命如下表所示。

表 B.3 主要零部件设计寿命和灵活性运行寿命

零部件	常规运行设计寿命/年	灵活性运行寿命/年
定子线圈	30	20
绝缘引水管	20	15
出线套管	20	15
电流互感器	20	15
转子绝缘	20	15
叶片	20	15
励磁机整流组件、熔断器、阻容元件和励磁调节器板件	15	10