



# 大型汽轮发电机非正常和特殊运行及维护导则

DL/T 970-2005

2005-11-28 发布 2006-06-01 实施

## 前 言

本标准是根据原国家经济贸易委员会《关于下达 2002 年度电力行业标准制定和修订计划的通知》(国经贸电力[2002]973 号文)的要求制定的。

当前我国电力工业已经进入大电网与大机组的阶段。随着电网容量的增加和大容量发电机单机数量的增加,大电网和大机组之间的协调关系日趋重要。

国内外的理论研究和运行实践表明,大电网与大机组的相互影响与协调直接影响电网和发电机组的安全稳定运行。系统扰动或发电机本身突发故障时,可能使发电机进入非正常运行状态,例如,系统振荡、电网频率异常、短暂不对称运行、失磁、短路冲击等,如果处理不当,不仅可能导致发电机的损坏,还可能使电网失去稳定,甚至造成电网崩溃事故。因此,制定发电机非正常运行方式导则是网机协调关系的主要工作内容之一,也是系统稳定措施的重要组成部分。

除电网或发电机在故障状态下的非正常运行方式外,根据电网需求发电机主动或被动进入的某些特殊运行方式,例如,进相运行、调峰运行、连续不对称运行等,也与电网的安全稳定运行关系密切,需要在保证电网安全和发电机组设备安全前提下取用适当的运行参数或保护定值。所以,本标准述及了电网或发电机多种非正常运行方式,也述及了某些属于正常运行范畴的特殊运行方式。

本标准的编制参照了 1980 年国际大电网会议(CIGRE)11.03 工作组提交的《同步发电机导常运行导则草案》。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电机标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位:华北电力科学研究院有限责任公司、国电华北电力设计院工程有限公司。

本标准主要起草人:白亚民、袁季修、吴聚业。



## 1 范 围

本标准规定了汽轮发电机多种非正常运行和特殊运行方式的允许限值以及相关的维护与检修措施。本标准适用于 300MW 及以上容量的汽轮发电机，其他容量机组可以参照执行。对已投入运行但不能完全满足本标准的发电机，可根据实际情况对不能满足的部分条文，参照本标准确定运行条件。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 755—2000	旋转电机定额和性能(idt IEC 60034-1: 1996)
GB/T 7064—2002	透平型同步电机技术要求(neq IEC 60034-3: 1988)
GB/T 14285	继电保护和安全自动装置技术规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1 进相运行 leading phase operation

发电机处于欠励状态，此时发电机相位角超前，要从系统吸收无功。

### 3.2 失步运行 out-of-step operation

由某种扰动引起发电机失去同步，同时仍保持全部或部分励磁。

### 3.3 异步运行 asynchronous operation

发电机失磁引起的非同步运行状态，此时异步转矩等于原动机转矩。

### 3.4 连续不对称运行 continuous asymmetric operation

发电机三相负荷不平衡造成的三相电压和电流不平衡持续运行状态。

### 3.5 短暂不对称运行 temporarily asymmetric operation

发电机因不对称短路或非全相运行造成的短时运行状态。

## 4 技术要求

### 4.1 进相运行

#### 4.1.1 一般要求

进相运行属于正常运行范畴的特殊运行方式。

大型发电机应当具备按照电网需求随时进相运行的能力，以便为系统提供较好的动态无功储备，确保电网的电压质量和经济运行。按照 GB/T7064—2002 中 5.13 的要求，汽轮发电机在设计时已具备了带额定负荷进相运行范围可以达到超前功率因数 0.95 的能力，但设计和制造时仅能考虑励磁调节性能和定子端部附加发热的限制，实际进相运行时还必须考虑发电机与系统之间相关的限制条件，如发电机静稳定、系统电压以及厂用电压降低等。

#### 4.1.2 实际进相能力的确定



进相运行时定子端部的附加发热问题通常已由专门的设计加以解决，但某些早期生产的汽轮发电机(如部分双水内冷发电机)定子端部可能仍存在发热较高的问题；当励磁系统设计适当时，一般都可以满足发电机静稳定的要求；厂用电压的限制则主要取决于系统配置。实际进相运行能力应当通过不同有功负荷下的进相试验(通常在  $0.5P_N \sim 1.0 P_N$  间取 3~4 点)确定安全的进相范围，进相试验的限值如下：

- a) 定子端部发热——按生产厂家提供出力图，或监视端部温度预埋测点，不得超过 GB/T 7064 规定的温度限值。
- b) 发电机静稳定——试验时励磁调节器应投入运行，并能稳定调节，确保发电机不会发生振荡，同时应监视发电机功角变化。功角的控制数值应由电网调度根据电网运行的稳定性和励磁调节器的性能决定，为留有一定的安全裕度一般控制功角不超过  $70^\circ$ 。
- c) 厂用电压——控制在不低于额定电压的 95%。

电厂应根据发电机进相试验绘制指导实际进相运行的出力图，并编制相应的进相运行规程，根据电网的需要进相运行。

#### 4.1.3 有关检修和附属设备配置的规定

对发电机检修不做特殊规定。

新建或设备改造的发电机定子端部压指、屏蔽环及边段铁芯等处宜预埋设检温计。

励磁系统应采用可以在线调整低励限制值的微机型励磁装置。

运行应监视发电机双向无功功率和功率因数。根据要求的进相深度，当静稳定成为限制进相因素时，应监视功角进相运行。

#### 4.2 失步运行

##### 4.2.1 一般要求

失步运行属于应避免而又不可能完全排除的非正常运行状态。

发电机失步往往起因于某种系统故障，故障点到发电机距离越近、故障时间越长，越易导致失步，并且失步的影响越严重。在失步至恢复同步或解列发电机之前，发电机和系统都要经受短时间的失步运行状态。失步振荡对发电机组的危害主要是轴系扭振和短路电流冲击。发电机的失步保护应当考虑既要防止发电机损坏又要减小失步对系统和用户造成的危害。为减轻失步对系统的影响，在一定条件下，应允许发电机短暂失步运行，以便采取措施恢复同步运行或在适当地点解列。

##### 4.2.2 失步运行具体规定

当失步振荡中心在发电机一变压器组内部时，应当立即解列发电机。

当发电机电流低于三相出口短路电流的 60%~70%时(通常振荡中心在发电机变压器组外部)，发电机组允许失步运行 5 个~20 个振荡周期，并应当立即增大发电机励磁，同时减少有功负荷，切换厂用电，争取在短时间内恢复同步或在系统适当地点解列。

现有运行机组如不能完全满足上述规定，应与制造部门协商确定运行条件。

##### 4.2.3 检修维护和附属设备配置规定

对较轻微的失步故障不做特殊的检修规定，仅在发生过严重失步振荡(失步振荡时间超过上述规定)以后应当及时检查发电机组的健康情况，重点检查发电机组的轴系扭振和疲劳寿命损失、联轴器螺栓和轴承裂纹等情况，同时详细检查定子绕组端部的紧固情况，当发现存在松动和磨损以及端部整体动态特性性能劣化时必须及时加以处理。再运行半年至一年后应利用停机机会再一次检查端部紧固情况。

有条件的发电机建议加装扭应力监测和分析设备，对轴系寿命损耗进行在线监视。



### 4.3 失磁异步运行

#### 4.3.1 一般要求

失磁异步运行属于应避免而又不可能完全排除的非正常运行状态。

因发电机失磁瞬间可以从发送无功的正常运行状态，立即阶跃为吸收无功状态，造成对电网非常不利的大幅度无功负荷变化，故应当严格限制失磁异步运行条件。运行实践表明，有限的短时异步运行对发电机组运行是有利的，可能因此恢复励磁，从而避免发电机紧急掉闸对热动力设备的冲击，若不能恢复励磁，短时的异步运行也可以使机组负荷在解列前以适当速度减少以至足以转至其他机组。失磁异步运行对电网的不利影响较大，无论是立即从电网解列还是允许快速减负荷后短时运行，都会对电网造成一定的冲击。

#### 4.3.2 失磁异步运行的限制条件

汽轮发电机失磁异步运行的能力及限值，与电网容量、机组容量、有否特殊设计等有关。

失去励磁的发电机因汽轮机机械转矩大于电机的平均异步转矩可以产生较大的滑差，而异步转矩还因定子电压的下降而减少，所以要维持发电机短时运行，必须快速降负荷。

若有功相应减少，滑差维持在一个较低水平(通常小于 0.5%)，则转子过热不会成为汽轮发电机异步运行的限制因素。通常转子绕组的感应电压数值不会成为限制因素。

如果在规定的短时运行时间内不能恢复励磁，则机组应当与系统解列。

具备如下条件时，可以短时异步运行：

- a) 电网有足够的无功余量去维持一个合理的电压水平。
- b) 机组能迅速减少负荷(应自动进行)到允许水平。
- c) 发电机的厂用电系统可以自动切换到另一个电源。

#### 4.3.3 失磁运行的规定

发电机失去励磁后是否允许机组快速减负荷并短时运行，应根据电网和机组的实际情况综合考虑，电网运营部门应当与电厂就具体机组失磁后可能的运行方式达成协议。

若电网不允许发电机无励磁运行，应由失磁保护立即将发电机与电网解列。

从发电机本身的能力可对失磁异步运行做出如下规定。

由于定子端部温升迅速升高且异步转矩较小，按照 GB/T 7064—2002 中 5.14 的规定，300MW 及以下机组可以在失磁后 60s 内减负荷至额定有功功率的 60%，90s 内降至 40%，在额定定子电压下带 0.4 倍额定有功，定子电流不超过 1.0 倍~1.1 倍时，发电机总的失磁运行时间不超过 15min。600MW 级及以上机组的允许运行时间和减负荷方式应由电网运营部门、用户与制造厂共同协商决定。

#### 4.3.4 相关的检修规定

按规定时间承受短时失磁运行的发电机可以按正常规定进行检修。

对于发生严重失磁运行事故的发电机，例如超过上述规定的负荷和时间，或引起强烈系统振荡，应当尽快对发电机组进行停机检查，重点检查发电机组的轴系扭振和疲劳寿命损失、联轴器螺栓和轴承裂纹等情况，同时详细检查定子绕组端部的紧固情况，当发现存在松动和磨损以及端部整体动态特性性能劣化时必须及时加以处理，再运行半年至一年后应再一次利用停机机会检查端部的紧固情况。

### 4.4 频率异常

#### 4.4.1 一般要求

频率异常属于应避免而又不可能完全排除的非正常运行状态。

电力系统由于某种原因造成有功功率不平衡时，频率将偏离额定值。偏离的程度与系统有功功率不平衡情况及系统的负荷频率特性等因素有关。



限制系统频率降低，一般采用低频减负荷，但由于低频减负荷装置的动作时延和电力系统的惯性，在减负荷后系统频率的恢复有一定的时延。所以，当系统由于某种原因突然出现功率严重短缺时，即使采用了低频减负荷，系统也不可避免地将出现短暂的频率降低。频率降低的程度和持续时间与电力系统的具体情况以及低频减负荷的配置和整定有关。

如果系统频率下降时处理不当而将机组跳闸，则此时机组跳闸造成的系统功率短缺将进一步导致频率降低，因而形成连锁反应，严重时最终导致系统崩溃。所以为防止电网频率异常时发生电网崩溃事故，发电机组应当具有必要的频率异常运行能力。同时，机组低频保护整定必须与系统频率降低特性协调，即系统频率降低不应使机组保护动作而引起恶性连锁反应。

#### 4.4.2 发电机组频率异常的限制因素

限制大机组在频率异常时运行的因素主要为汽轮机叶片谐振。汽轮机叶片的谐振频率和允许时间特性与叶片的长度、断面形状及材质等因素有关。电力系统频率的变化会导致激振频率偏离设计工况，使某些调频叶片落入谐振。因此汽轮发电机组允许频率异常的运行能力主要受汽轮机调频叶片的限制。

#### 4.4.3 频率异常运行的限值

限制机组频率升高是由其调速器来实现的。一般要求系统事故时限制机组的暂态最高转速不超过额定转速的 107%~108%。

新订购汽轮机和发电机(含辅机)，在带负荷运行(不包括启动和停机等)情况下，汽轮发电机组频率异常的运行能力应符合表 1 的规定。

表 1 汽轮发电机组频率异常允许运行时间

频率范围 f Hz	允许运行时间	
	累计 min	每次 S
$51.0 < f \leq 51.5$	>30	>30
$50.5 < f \leq 51.0$	>180	>180
$48.5 \leq f \leq 50.5$	连续运行	
$48.0 \leq f < 48.5$	>300	>300
$47.5 \leq f < 48.0$	>60	>60
$47.0 \leq f < 47.5$	>10	>20
$46.5 \leq f < 47.0$	>2	>5

#### 4.4.4 检修和相关设备配置规定

在上述规定范围内的频率异常运行按常规检修进行。超过上述时间规定的应对汽轮机进行相关检查。

系统的低频减载配置和整定应能保证系统频率动态特性的低频持续时间小于表 1 所规定的每次允许时间，并有一定的裕度。

按 GB/T 14285 的规定，发电机应装设低频保护，保护动作于信号并有低频累计时间显示。特殊情况下当低频保护需要跳闸时，保护动作时间可按汽轮机和发电机制造厂的规定进行整定，但必须符合表 1 规定的每次允许时间。若发电机低频保护动作时间低于规定的每次动作时间，则在发电机低频跳闸时，应在该地区附加切除相应容量的负荷，以避免频率下降的连锁反应。





## 4.5 三相不对称运行

### 4.5.1 一般要求

连续不对称运行属于正常运行范畴的特殊运行方式；短暂不对称运行属于故障状态下的非正常运行方式。

根据 GB/T 7064—2002 中 3.11 的规定，汽轮发电机应能承受一定的连续和短暂负序电流。

发电机在并网、与系统解列或运行过程中可能发生的非全相运行，也属于短暂不对称运行范围。当发电机出口出现不对称短路故障时，在保护动作清除故障以前发电机将承受短暂的不对称运行。在停机或启机过程中，某相高压开关因故障拒动而形成非全相运行；最严重的情况发生在发电机非全相异步启动时，此时因发电机从电网吸收能量，汽轮机可能承受逆功率，发电机转子表层金属部件可能因感应涡流严重烧伤，定子绕组可能因电流冲击而严重过热。

### 4.5.2 不平衡负荷的限制条件

不平衡负荷在发电机上产生以同步速度反方向旋转的负序磁场，由此在转子上感应生成 2 倍工频交变的电流，该电流在转子槽楔、齿部和护环等部件上产生的附加发热是限制发电机带不平衡负荷能力的主要因素。连续不平衡负荷的主要限制条件是转子绕组绝缘等级的热老化极限和槽楔等部件的高温蠕变现象对材料机械性能的破坏，其判据按 IEC 标准用负序电流  $I_2$  (标么值) 表示。短暂不平衡负荷主要考虑对材料机械性能的破坏，其判据按 IEC 标准用负序电流  $I_2$  (标么值) 的平方和持续时间的乘积表示，判据适用的持续时间应限定在 60s 以内 (不考虑散热的影响)。

任何情况下也不允许发电机主动承担非全相运行，因事故进入非全相运行时，应尽快与系统解列。

### 4.5.3 不平衡负荷的限制值

汽轮发电机承受不平衡负荷的限制值按 GB 755—2000 规定，见表 2。

表 2 同步电机不平衡运行条件(圆柱形转子同步电机)

项号	电机型式		连续运行时的 $I_2/I_N$ 最大值	在故障状态下运行的 $(I_2/I_N)^2t$ 最大值s
1	间接冷却的转子绕组		空冷	15
			氧冷	10
2	直接冷却(内冷)转子绕组	$S_N \leq 350\text{MVA}$	0.08	8
		$350\text{MVA} < S_N \leq 900\text{MVA}$	$0.08 \frac{S_N - 350}{S_N - 1050}$	$8 - 0.00545(S_N - 350)$
		$900\text{MVA} < S_N \leq 1250\text{MVA}$	$0.08 \frac{S_N - 1050}{3 \times 10^4}$	5
		$1250\text{MVA} < S_N \leq 1600\text{MVA}$	0.05	5
注： $S_N$ 为额定容量，MVA				

### 4.5.4 检修和发电机配置规定

当连续不平衡负荷在允许范围内时，按常规正常运行检修；超过允许限值时应当对转子绝缘过热情况和槽楔等部件有针对性地进行检查。

发生短暂不平衡故障保护动作以后，即使  $(I_2/I_N)^2 t$  数值低于厂家承诺限值，也应停机检查转子表面的过热情况，必要时进行金相和探伤检查，对因过热烧损的局部进行相应处理。定、转子绕组应当进行全面的电气检查。

短时而轻微的非全相运行不做特殊的检修规定。严重的非全相运行除需要检查转子表面外，还应当检查定子绕组端部的紧固结构，发现问题及时处理，在继续投运半年至一年期间应当再次检查



定子绕组端部的紧固结构。

对经常带较大连续不平衡负荷的发电机，应能监视不平衡负荷运行下的负序电流，避免超限值运行。

#### 4.6 调峰运行

##### 4.6.1 一般要求

调峰运行属于正常运行范畴的特殊运行方式。

调峰运行与电力需求密切相关。正常情况下电网的负荷量呈周期性变化，例如昼夜照明和动力需求的变化、工作日与节假日对电力需求的变化、气温变化引起空调或取暖设备的投运与否等，在电力供应充足的情况下，必然存在电网负荷峰谷差，也就必然存在发电机组的调峰问题，即在负荷低峰期总是有一部分发电机组少发或停机备用，即进行调峰运行。

汽轮发电机的调峰运行分为两种方式，一种是大范围负荷变化的负荷波动式运行，称为“深调运行”，通常带 35%~70%至 100%基本负荷间反复变化；另一种是停机热备用的零负荷至基本负荷频繁交替变化，称为两班制运行。前者一般为较大容量机组，后者通常容量较小，但随负荷峰谷差加大，部分较大容量机组也需要按照两班制运行。

##### 4.6.2 调峰对发电机的影响

调峰运行时负荷的频繁交替变化可能缩短发电机使用寿命，有可能产生的主要问题如下：

- a) 转子绕组铜线变形。
- b) 绕组绝缘提前老化。
- c) 定子绕组端部结构的松动和磨损故障。
- d) 发电机结构件，特别是旋转部件的应力疲劳损伤。
- e) 附属设备电动机、线路开关等故障率增高。

频繁启停机的两班制运行比单纯负荷循环的运行方式对发电机的影响更大。

调峰运行能力与发电机的结构形式、容量大小以及有无特殊设计等因素有关。GB/T 7064-2002 3.16 的规定，按两班制运行设计的发电机应能承受 1 万次启停机。按常规设计带基本负荷连续运行的发电机调峰能力较弱。

##### 4.6.3 调峰发电机订货和运行建议

- a) 按照 1 万次启停机设计和制造，例如定子端部采用有轴向伸缩装置的刚—柔紧固结构、转子绕组采用含银铜线和加滑移层等。
- b) 发电机各部位温升裕度大。
- c) 采用 18Mn18Cr 钢材料护环。
- d) 水内冷发电机宜控制水温减少线棒温度波动。
- e) 氢冷发电机氢气干燥器应配备自循环风机，保证停机期间可以继续除湿。
- f) 停机备用时盘车速度应不低于 50r/min，并增加顶轴油泵以保证低速时油膜厚度。
- g) 主要辅机电动机宜采用软启动装置。
- h) 宜装设定子绝缘局部放电、转子匝间短路等在线监测设备。
- i) 由于当汽轮机少汽或无汽运行时发电机处于零功率运行状态，即迟相或进相运行状态，发电机应通过定子端部结构件温升试验和励磁调节试验作出发电机的 V 形曲线，确定允许极限，根据该极限和系统需要来调节发电机励磁。

##### 4.6.4 两班制运行发电机的检修规定

###### 4.6.4.1 检修期间隔和主要项目

投产一年后应进行第一次大修，以后每隔 5 年抽转子检查一次。



检修项目除常规项目外还应特别注意：

- a) 检查定子绕组端部有无松动和磨损。
- b) 检查定子槽楔是否紧固，必要时用新型锥形短槽楔替换原有槽楔。
- c) 防止转子通风道或水路堵塞的检查。
- d) 对转子中心孔、护环、中心环及槽楔等部件定期进行无损检查。
- e) 检查有无铜粉尘污染转子绕组。
- f) 对辅机系统应注意开关和厂用电机的预防性检修，并创造条件实施状态检修。

#### 4.6.4.2 发电机绝缘系统老化评估

对长期调峰运行的发电机应当定期对定、转子绝缘系统进行老化寿命评估。每天超过 4 次特别频繁启停的机组绝缘系统评估时间间隔宜 5 年左右一次，一般两班制运行机组绝缘老化评估间隔时间不应超过 10 年。