

ICS 29.160

K 21

备案号: 53944-2016

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1523 — 2016

同步发电机进相试验导则

Guide on leading power factor operation test of synchronous generator

2016-01-07 发布

2016-06-01 实施

国家能源局 发 布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 发电机进相试验原则	2
5 发电机进相试验条件	2
6 进相试验内容	3
7 进相试验方法及限值	3
8 对试验方案的要求	4
9 试验报告主要内容	4
附录 A (规范性附录) 发电机温升限值	6
附录 B (资料性附录) 隐极发电机静稳极限的计算方法	8
附录 C (资料性附录) 凸极发电机静稳极限的计算方法	10
附录 D (资料性附录) 同步发电机功角计算	13

前 言

本标准按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

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。

本标准起草单位：中国电力科学研究院、华北电力科学研究院有限责任公司、国网河北省电力公司电力科学研究院、国家电力调度控制中心、国网河南省电力公司电力科学研究院、广东电力科学研究院、国网西北调度控制分中心、甘肃省电力调度控制中心、国网陕西省电力公司电力科学研究院、国网甘肃省电力公司电力科学研究院、四川省电力工业调整试验所、中国大唐集团公司。

本标准主要起草人：何凤军、李志强、王劲松、张建忠、晁晖、常青、濮均、陈强、李晓霞、肖洋、符阳林、牛栓宝、郑伟、夏潮、盛超、孙维本、崔岗。

本标准为首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

同步发电机进相试验导则

1 范围

本标准规定了并网运行的同步发电机进相试验原则、试验条件、试验内容、试验方法、试验方案及试验报告的要求等。

本标准适用于并网运行的同步发电机组，同步调相机及抽水蓄能电机进相试验可参照此标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本文件。

- GB 755 旋转电机 定额和性能
- GB/T 7064 隐极同步发电机技术要求
- GB/T 7409.3 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求
- GB/T 7894 水轮发电机基本技术条件
- GB/T 22264.1 安装式数字显示电测量仪表 第1部分：定义和通用要求
- GB/T 22264.2 安装式数字显示电测量仪表 第2部分：电流表和电压表的特殊要求
- GB/T 22264.3 安装式数字显示电测量仪表 第3部分：功率表和无功功率表的特殊要求
- GB/T 22264.5 安装式数字显示电测量仪表 第5部分：相位表和功率因数表的特殊要求
- GB/T 22264.7 安装式数字显示电测量仪表 第7部分：多功能仪表的特殊要求
- GB/T 28566 发电机组并网安全条件及评价
- DL/T 583 大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件
- DL/T 755 电力系统安全稳定导则
- DL/T 843 大型汽轮发电机励磁系统技术条件
- 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 1040 电网运行准则
- DL/T 1164 汽轮发电机运行导则
- DL/T 1166 大型发电机励磁系统现场试验导则
- DL/T 5153 火力发电厂厂用电设计技术规定
- NB/T 35044 水力发电厂厂用电设计规程

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 power factor operation

发电机机端电流相位超前机端电压，从系统吸收无功功率的运行状态。

3.2

迟相运行 lagging power factor operation

发电机机端电流相位滞后机端电压，向系统发出无功功率的运行状态。

3.3

进相能力 leading power factor ability

由定子端部发热、定子电流、发电机静态稳定极限及厂用电电压等共同确定的不同有功功率下发电机吸收系统无功功率的最大值。

3.4

进相试验 leading power factor test

确定发电机组进相能力，并检验发电机组调压能力而进行的试验。

3.5

进相深度限制值 leading power factor depth limit

由发电机励磁系统中低励限制曲线决定的不同有功功率下发电机吸收系统无功功率的最大值。

3.6

低励限制曲线 under excitation limit curve

在欠励限制器中整定的、发电机允许的最小无功功率与有功功率关系曲线。

3.7

发电机功角 generator power angle

发电机励磁感应电动势相对于机端电压的（时间）相角差。

4 发电机进相试验原则

4.1 根据 GB/T 28566 规定，接入电网的同步发电机应按照电网运行要求进行进相试验。

4.2 当下列条件发生变化时，应重新进行进相试验：

- a) 发电机组增容或通风等冷却系统改造后；
- b) 发电机组接入电网方式等运行条件发生重大改变时。

4.3 励磁系统涉及低励限制功能的升级、改造后，应进行进相深度限制值及低励限制功能的校核试验。

4.4 进相试验宜在系统电压较高的运行方式下进行。

4.5 机组进相试验前应按照 DL/T 755、DL/T 970、DL/T 1040 中的相关规定及电网需求编制试验方案。

4.6 发电机各部分温度（重点是端部铁芯及结构件）限制值应符合 GB 755 和试验电厂机组运行规程，必要时在相关位置预埋测温点。

4.7 发电机进相深度限制值应与发电机失磁保护定值相配合，即发电机进相运行时不应进入发电机失磁保护动作区。

4.8 进相试验宜在发电机自带厂用电源的方式进行，系统有特别要求的电厂可考虑在自带厂用电和备用电源两种方式下分别进行试验。

4.9 进相试验应在自动电压调节（AVR）方式下进行。

4.10 根据进相试验的结果，整定励磁调节器低励限制曲线。

5 发电机进相试验条件

5.1 机组应在下列状态下运行：

- a) 发电机组在自带厂用电方式下能满负荷运行，且可在发电机组正常运行范围内平稳调整有功功率。
- b) 发电机组在满负荷正常运行时，主变压器高压侧母线电压、高/低压厂用电源母线电压应在合理范围内；否则，应在试验前将主变压器及厂用变压器分接头调到合适位置。
- c) 发电机组电气量、非电气量等状态量的指示应完整、准确。如定子端部铁芯和金属结构件的温度测点不完整，试验前应按规定埋设。
- d) 发电机冷却系统运行应正常。
- e) 自动发电控制（AGC）及其他调节发电机有功功率的功能组件应退出运行。

- f) 自动电压控制 (AVC) 退出, 励磁调节器以外的其他影响发电机无功功率调整的功能组件及限制环节应退出或取消, 无功功率应能平滑、稳定调节。

5.2 励磁调节器应符合下列规定:

- a) 励磁调节器性能指标应符合 GB/T 7409.3、DL/T 583、DL/T 843 规定的技术要求。
- b) 励磁调节器欠励限制器模型框图、逻辑说明、参数计算及调整方法等相关技术资料应齐全。
- c) 励磁调节器低励限制功能应完好。
- d) 励磁调节器低励跳闸功能应退出, 其他调节、限制、保护功能应正常投入。
- e) 其他影响进相试验的限制条件应退出。
- f) 进相试验宜在励磁建模及电力系统稳定器 (PSS) 试验完成后进行。

5.3 发电机变压器组保护应符合下列规定:

- a) 发电机变压器组保护应运行正常。
- b) 应确保试验中的最大进相深度不会启动发电机失磁保护, 试验期间失磁保护投入方式应根据具体情况确定, 确保试验期间机组和电网的安全。

5.4 电网运行应符合下列条件:

- a) 应由调度安排试验所需的运行工况。
- b) 同厂陪试机组 AVC 应退出。
- c) 涉网安全稳定措施应按调度批复方案执行。

5.5 仪器仪表应符合下列规定:

- a) 仪器仪表应能实时显示发电机组运行状态。
- b) 仪器仪表应能完整记录扰动过程中发电机有功功率、无功功率波形。
- c) 仪器仪表应满足 GB/T 22264.1、GB/T 22264.2、GB/T 22264.3、GB/T 22264.5、GB/T 22264.7 对测量精度的相关要求。

6 进相试验内容

6.1 进行发电机不同有功功率下的进相能力测试, 要求发电机功角、机端电压、端部铁芯和金属结构件温度、高/低压厂用电源母线电压、主变压器高压侧母线电压应在 GB/T 7064、GB/T 7894、DL/T 5153、DL/T 5164 及试验电厂运行规程规定的范围内。

6.2 应在实测的进相能力范围内, 整定励磁调节器低励限制曲线。

6.3 应检验欠励限制器动作值。

6.4 校核欠励限制器的动态稳定性。

7 进相试验方法及限值

7.1 机组的进相过程可以通过逐渐提高系统电压使被试机组自然进相实现。

7.2 当无法采用 7.1 所述方法测定进相能力时, 可采用人为减励磁的方法实现。

7.3 试验机组选择的有功工况应包括机组正常运行功率的最大值和最小值, 中间点可根据机组稳定运行情况选定, 总工况点不少于三个, 宜由低到高进行试验。

汽轮发电机组进相试验工况宜为 50%、75%、100% 额定有功功率; 水轮发电机组进相试验工况宜为 0%、50%、75%、100% 额定有功功率。

7.4 每一种工况下的试验应包括迟相、零无功、进相三种状态 (进相工况应达到进相限制条件), 在三种状态下分别选择停留点记录发电机状态量。各试验工况下的进相深度应不低于 DL/T 843 中规定的低励限制动作范围。

7.5 温度记录应待温度稳定后进行。

7.6 试验过程中至少应记录如下发电机-变压器组状态量:

- a) 发电机有功功率、无功功率、功角;
- b) 机端电压、机端电流、励磁电压、励磁电流;
- c) 端部铁芯和金属结构件(如阶梯齿、压指、压圈等)温度;
- d) 高/低压厂用电源最低母线电压、主变压器高压侧母线电压,以及同母线陪试机组有功功率及无功功率。

7.7 试验过程中同母线陪试机组的无功功率总和宜保持不变。

7.8 进相深度限制条件应包括下列内容:

- a) 发电机功角、机端电压、机端电流;
- b) 高/低压厂用电源母线电压、主变压器高压侧母线电压;
- c) 端部铁芯和金属结构件温度、发电机进出水温差、冷热风温差等。

7.9 本标准 7.8 的限制条件应根据试验电厂机组运行规程确定,规程中无明确规定宜符合下列要求:

- a) 端部铁芯和金属结构件(如阶梯齿、压指、压圈等)温升不应超过试验电厂机组运行规程或 GB 755、GB/T 7064、GB/T 7894 中的相关规定。各部分温升限值见附录 A。
- b) 依据 DL/T 1164 的规定,汽轮发电机功角不宜大于 70° ;对于水轮发电机,在带不同有功功率时,其极限功角应随有功功率的减小而降低,因此试验前应根据水轮发电机及主变压器参数计算极限功角,在试验过程中功角相对于极限功角留有一定的安全裕度($10^\circ \sim 20^\circ$,零有功工况下裕度可以更小);发电机极限功率、功角计算公式参见附录 B~附录 D。
- c) 机端电压不应小于 DL/T 1164 规定的 90%额定电压。
- d) 机端电流不应大于额定电流。
- e) 火电机组厂用电母线电压不应低于 DL/T 1164 规定的负载额定电压的 95%,水电机组厂用电母线电压限值应符合 GB 755 规定的电动机电压运行的下限值,不应低于负载额定电压的 90%。
- f) 主变压器高压侧母线电压不应低于试验方案要求的电压下限值。
- g) 发电机进出水温差、冷热风温差不应超出试验电厂机组运行规程的允许范围。

7.10 在线修改低励限制值应在确保发电机安全运行的状态下进行。

7.11 欠励限制器的静态限制特性检验应在机组缓慢进相过程中使欠励限制器正常动作,并发出报警信号。

7.12 欠励限制器的动态特性应参照 DL/T 1166 中的方法进行功能性校核检验。通过给定电压下阶跃的方法进行检验,阶跃量不宜大于 4%,发电机有功功率不应出现等幅或发散振荡,无功功率波动次数不应大于 5 次。该过程应对有功功率、无功功率、机端电压、机端电流、转子电压、转子电流等进行录波。

8 对试验方案的要求

8.1 进相试验方案应包括试验项目、试验目的、试验步骤、测试内容、安全技术措施、试验组织机构,以及主要设备参数(发电机-变压器组参数、厂用变压器参数、励磁调节器型号及参数等)、低励限制曲线及设置方式、试验要求的机组工况和条件、进相深度限制条件等。

8.2 进相试验方案应由试验相关单位共同编写,并经电网调度部门审核、确认。

9 试验报告主要内容

9.1 系统条件及机组概况,包括系统接线方式、电厂名称、机组编号、发电机-变压器组参数、励磁系统欠励限制器整定参数及低励限制曲线设置方式、制造厂家等。

9.2 试验时间、试验时的运行方式、试验内容、试验采用的仪器仪表。

9.3 简述试验过程。

9.4 试验结果分析,主要包括下列内容:

- a) 机组的进相能力及限制条件;
- b) 低励限制曲线整定值和实测动作值;

c) 对主变压器高压侧母线调压的分析评价。

9.5 结论和建议，应包括下列内容：

- a) 进相能力（包含各有功工况下发电机进相深度的限制条件）；
- b) 低励限制特性曲线；
- c) 主变压器高压侧母线调压效果；
- d) 问题和建议。

附 录 A
(规范性附录)
发 电 机 温 升 限 值

A.1 空气冷却及水直接冷却的水轮发电机在规定的运行环境条件及额定工况下，定子绕组、转子绕组和定子铁芯等部件的温升限值应不超过表 A.1 的规定。

表 A.1 水轮发电机定子绕组、转子绕组和定子铁芯等部件的温升限值

K

热分级	B			F		
部件	Th	R	ETD	Th	R	ETD
空气冷却的定子绕组		80	85		100	105
定子铁芯		80	85		100	105
水直接冷却的定子绕组、转子绕组和定子铁芯出水	25			25		
两层及以上转子绕组		80			100	
表面裸露的单层转子绕组		90			110	
不与绕组接触的其他部件	这些部件的温升应不损坏该部件本身或任何与其相邻部件的绝缘					
集电环	80			90		

注 1: Th—温度计法; R—电阻法; ETD—埋置检温计法。
 注 2: 水轮发电机在非基准和非定额(海拔超过 1000m, 冷却空气温度超过 40℃及额定电压超过 11 000V 等)运行条件下运行时, 可参考 GB 755 进行修正。
 注 3: 对经常承受周期负载或经常每天启动 2 次以上的水轮发电机, 应考虑对本表中所规定的温升限值降低 (5~10) K。

A.2 不同类型汽轮发电机在规定的运行环境条件及额定工况下，定子绕组、转子绕组和定子铁芯等的温升限值应不超过表 A.2~表 A.4 的规定。

表 A.2 空冷汽轮发电机的温升限值

部件	测量位置和测量方法	冷却介质为 40℃时的温升限值 K	
		热分级 130 (B)	热分级 155 (F)
定子绕组	槽内上下层线圈间埋置检温计法	85	110
转子绕组	电阻法	间接冷却: 90; 直接冷却: 75 (副槽), 65 (横向)	间接冷却: 115; 直接冷却: 100 (副槽), 90 (横向)
定子铁芯	埋置检温计法	80	105
集电环	温度计法	80	105
不与绕组接触的铁芯及其他部件	这些部件的温升在任何情况下都不应达到使绕组或邻近的任何部位的绝缘或其他材料有损坏危险的数值		

表 A.3 氢气间接冷却汽轮发电机的温升限值

部件	测量位置和测量方法	氢气绝对压力 (MPa)	冷却介质为 40℃时的温升限值 K	
			热分级 130 (B)	热分级 155 (F)
定子绕组	槽内上下层线圈间埋置 检温计法	0.15MPa 及以下	85	105
		>0.15MPa 且 ≤0.2MPa	80	100
		>0.2MPa 且 ≤0.3MPa	78	98
		>0.3MPa 且 ≤0.4MPa	73	93
		>0.4MPa 且 ≤0.5MPa	70	90
转子绕组	电阻法		85	105
定子铁芯	埋置检温计法		80	100
不与绕组接触的 铁芯及其他部件	这些部件的温升在任何情况下都不应达到使绕组或邻近的任何部位的绝缘或其他材料有损坏 危险的数值			
集电环	温度计法		80	100

表 A.4 氢气和水直接冷却汽轮发电机的温升限值

部件	测量位置和测量方法	冷却方法和介质		温度限值 ℃	
				热分级 130 (B)	热分级 155 (F)
定子绕组	直接冷却有效部分的出口处的冷却 介质检温计法	水		90	90
		氢气		110	130
	槽内上下层线圈间埋置检温计法	水		90 ^a	90 ^a
转子绕组	电阻法	氢气直 接冷却 转子全 长径向 出风区 数目 ^b	1 和 2	100	115
			3 和 4	105	120
			5~7	110	125
			8~14	115	130
			14 以上	120	135
定子铁芯	埋置检温计法			120	140
不与绕组接触的 铁芯及其他部件	这些部件的温升在任何情况下都不应达到使绕组或邻近的任何部位的绝缘或其他材料有损坏 危险的数值				
集电环	检温计法			120 ^c	140 ^c
^a 应注意用埋置检温计法测得的温度并不表示定子绕组最热点的温度,如冷却水和氢气的最高温度分别不超过有效部分出口处的限制(90℃和 110℃),则能保证绕组最高点温度不会过热,埋置检温计法测得的温度还可以用来监视定子绕组冷却系统的运行。 在定子绝缘引水管出口端未装设水温检温计时,则仅靠定子绕组上下层间的埋置检温计来监视定子绕组冷却水的运行,此时,埋置检温计的温度限值不应超过 90℃。 ^b 采用氢气直接冷却的转子绕组的温度限值,是以转子全长上径向出风区的数目分级的。端部绕组出风在每端算一个风区,两个反方向的轴向冷却气体的共同出风口应作为两个出风区计算。 ^c 集电环的绝缘等级应与此温度限值相适应。					

附录 B

(资料性附录)

隐极发电机静稳极限的计算方法

B.1 假设 E_q 为发电机内电势, X_d 为发电机同步电抗, U_i 为发电机端电压, X_T 为主变压器电抗, X_l 为线路电抗, U 为系统电压。由于系统电压不易确定, 对大系统、大容量、上网线路短、电压等级高 (500kV 及以上) 的线路, 归算下来的线路电抗 X_l 也比较小, 计算中可近似地将主变压器高压母线电压作为系统电压; 对线路电抗不能忽略的并网机组, 可根据线路电抗的估算值折算至主变压器电抗中。功角 δ 指发电机励磁电动势 $\dot{E}_q$ 与系统电压 $\dot{U}$ 之间的夹角, φ 指 $\dot{U}$ 和母线注入电流 $\dot{I}$ 之间的夹角, 各电气量之间的相互关系如图 B.1 所示。隐极机电磁功率表达式及静态稳定的功角限制为

$$P = \frac{E_q U}{X_d + X_T} \sin \delta \quad (\text{B.1})$$

$$\delta < 90^\circ \quad (\text{B.2})$$

B.2 设 $\dot{U} = U \angle 0^\circ$, $\dot{E}_q = E_q \angle \delta$, 则

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_q - \dot{U}}{j(X_d + X_T)} \quad (\text{B.3})$$

B.3 从发电机同步电势来看, 送出的功率为

$$\dot{S} = \dot{E}_q \dot{I}^* = \dot{E}_q \left[\frac{\dot{E}_q - \dot{U}}{j(X_d + X_T)} \right]^* = \frac{E_q U}{X_d + X_T} \sin \delta + j \left(\frac{E_q^2}{X_d + X_T} - \frac{E_q U}{X_d + X_T} \cos \delta \right) \quad (\text{B.4})$$

其中 $\dot{I}^*$ 为 $\dot{I}$ 的共轭相量。而由系统电压 U 侧看, 送出的功率为

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^* = \dot{U} \left[\frac{\dot{E}_q - \dot{U}}{j(X_d + X_T)} \right]^* = \frac{E_q U}{X_d + X_T} \sin \delta + j \left(\frac{E_q U}{X_d + X_T} \cos \delta - \frac{U^2}{X_d + X_T} \right) \quad (\text{B.5})$$

以上两式可表达为 $S = P + jQ$ 。

B.4 当处于静稳定极限 $\delta = 90^\circ$ 时, 由式 (B.4)、式 (B.5) 得

$$Q_q = \frac{E_q^2}{X_d + X_T} \quad (\text{B.6})$$

$$Q = -\frac{U^2}{X_d + X_T} \quad (\text{B.7})$$

B.5 由机端送出的无功功率 Q_G 与它们的关系是

$$Q_G = Q_q - I^2 X_d \quad (\text{B.8})$$

$$Q_G = I^2 X_T + Q \quad (\text{B.9})$$

B.6 在式 (B.8)、式 (B.9) 两端分别乘以 X_T 、 X_d 可得

$$Q_G X_T = Q_q X_T - I^2 X_d X_T \quad (\text{B.10})$$

$$Q_G X_d = I^2 X_T X_d + Q X_d \quad (\text{B.11})$$

B.7 将式 (B.10)、式 (B.11) 相加并将式 (B.6)、式 (B.7) 代入可得

$$Q_G = \frac{Q_q X_T + Q X_d}{X_d + X_T} = \frac{E_q^2 X_T - U^2 X_d}{(X_d + X_T)^2} \quad (\text{B.12})$$

B.8 根据静稳极限条件, 则

$$Q_G(X_d + X_T)^2 = E_q^2 X_T - U^2 X_d \quad (\text{B.13})$$

B.9 用已知量发电机端电压 U_t 、有功功率 P 及机端无功功率 Q_G 表示 E_q^2 与 U^2 , 并参考相量图 B.1 得

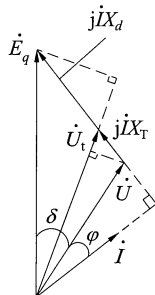


图 B.1 隐极同步发电机电压、电流相量图

$$E_q^2 = \left(U_t + \frac{Q_G}{U_t} X_d \right)^2 + \left(\frac{P}{U_t} X_d \right)^2 \quad (\text{B.14})$$

$$U^2 = \left(U_t - \frac{Q_G}{U_t} X_T \right)^2 + \left(\frac{P}{U_t} X_T \right)^2 \quad (\text{B.15})$$

B.10 将式 (B.14)、式 (B.15) 得到的 E_q^2 、 U^2 代入式 (B.13), 整理后得静稳定极限条件下的功率圆方程

$$P^2 + \left[Q_G - \frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 = \left[\frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \quad (\text{B.16})$$

B.11 由图 B.2 可见, 在 P - Q 直角坐标图上, 该圆图的圆心在 $P=0$, $Q_G = \frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_d} \right)$ 处, 功率圆的半径为 $\frac{U_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_d} \right)$ 。最大进相无功功率点为 $P=0$, $Q_G = \frac{U_t^2}{X_d}$; 当无功功率 $Q_G=0$ 时, 对应的最大有功功率点为 $P_{\max} = U_t^2 \sqrt{\frac{1}{X_T X_d}}$, 由此可得一条如图 B.3 所示的静态稳定限制线, 试验中低励限制曲线设定时不可低于此限制线。

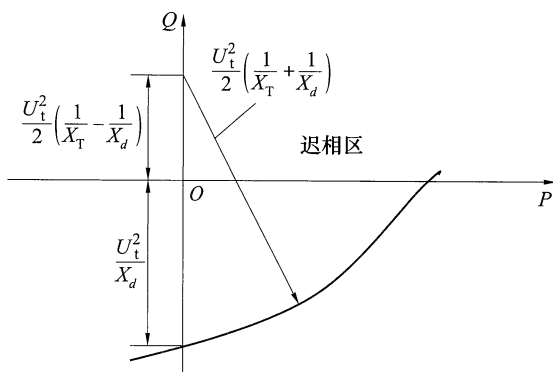


图 B.2 功率圆图

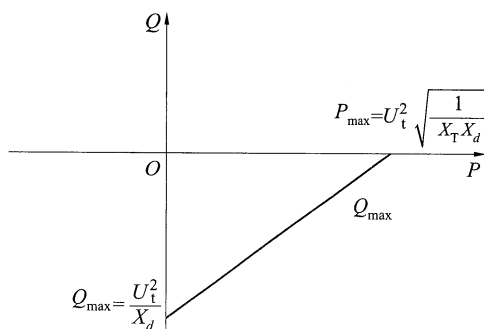


图 B.3 静态稳定限制线

附 录 C
(资料性附录)

凸极发电机静稳极限的计算方法

C.1 假设 E_q 为发电机内电势, X_d 为发电机同步电抗, U_t 为发电机端电压, X_T 为主变压器电抗, X_q 为 q 轴电抗, X_l 为线路电抗, U 为系统电压。由于系统电压不易确定, 对大系统、大容量、上网线路短、电压等级高 (500kV 及以上) 的线路, 归算下来的线路电抗 X_l 也比较小, 计算中可近似的将主变压器高压母线电压作为系统电压; 对线路电抗不能忽略的并网机组, 可根据线路电抗的估算值折算至主变压器电抗中。功角 δ 指发电机励磁电动势 $\dot{E}_q$ 与系统电压 $\dot{U}$ 之间的夹角, φ 指 $\dot{U}$ 和母线注入电流 $\dot{i}$ 之间的夹角, $\dot{E}_q$ 为 q 轴虚拟电动势, 各电气量之间的相互关系如图 C.1 所示。根据图 C.1 所示关系可得凸极发电机电磁功率表达式为

$$P = \frac{E_q U}{X_d + X_T} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_T)(X_q + X_T)} \sin 2\delta \quad (C.1)$$

C.2 令 $X_{d\Sigma} = (X_d + X_T)$, $X_{q\Sigma} = (X_q + X_T)$, 则式 (C.1) 可写成如下形式

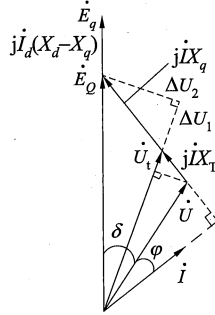


图 C.1 凸极发电机各电气量关系示意图

$$P = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (C.2)$$

C.3 在励磁电压和系统电压不变的情况下, 发电机输出的功率由功角唯一确定, 由于最大电磁功率处有 $dP/d\delta = 0$, 据此可求得对应于最大电磁功率处的功角。

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \cos \delta + \frac{U^2 (X_d - X_q)}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \cos 2\delta = 0 \quad (C.3)$$

C.4 将式 (C.3) 乘以 $\tan \delta$ 可得

$$\frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + U^2 \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} (\sin \delta \cos \delta - \sin^2 \delta \tan \delta) = 0$$

进一步化简为

$$\frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta = U^2 \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin^2 \delta \tan \delta \quad (C.4)$$

C.5 式 (C.4) 左侧正好为电磁功率表达式, 由此可知在最大电磁功率点有

$$P = U^2 \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin^2 \delta \tan \delta \quad (C.5)$$

C.6 由图 C.1 可得 $\tan \delta$ 的表达式为

$$\tan \delta = \frac{IX_{q\Sigma} \cos \varphi}{U + IX_{q\Sigma} \sin \varphi} = \frac{UIX_{q\Sigma} \cos \varphi}{U^2 + UIX_{q\Sigma} \sin \varphi} = \frac{X_{q\Sigma} P}{U^2 + X_{q\Sigma} Q} \quad (C.6)$$

其中, Q 为主变压器高压侧母线输出的无功功率, 将式 (C.6) 代入式 (C.5) 可得

$$P = U^2 \frac{P(X_d - X_q)}{X_{d\Sigma}(U^2 + X_{q\Sigma}Q)} \sin^2 \delta \quad (C.7)$$

C.7 由图 C.1 可得 $\sin \delta$ 的表达式为

$$\sin \delta = \frac{IX_{q\Sigma} \cos \varphi}{E_Q} = \frac{UIX_{q\Sigma} \cos \varphi}{E_Q U} = \frac{X_{q\Sigma} P}{E_Q U} \quad (C.8)$$

C.8 将式 (C.8) 代入式 (C.7) 并整理可得

$$(X_d - X_q)(X_{q\Sigma} P)^2 = X_{d\Sigma} E_Q^2 (U^2 + X_{q\Sigma} Q) \quad (C.9)$$

C.9 设 Q_G 为发电机机端输出的无功功率, φ' 为机端电压与机端电流之间的夹角, 则图 C.1 中 ΔU_1 、 ΔU_2 可表示为

$$\begin{cases} \Delta U_1 = IX_q \sin \varphi' = \frac{X_q U_t I \sin \varphi'}{U_t} = \frac{X_q Q_G}{U_t} \\ \Delta U_2 = IX_q \cos \varphi' = \frac{X_q U_t I \cos \varphi'}{U_t} = \frac{X_q P}{U_t} \end{cases} \quad (C.10)$$

C.10 由此可得 E_Q^2 、 U^2 、 Q 的表达式为

$$E_Q^2 = \left(U_t + \frac{X_q Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_q P}{U_t} \right)^2 \quad (C.11)$$

$$U^2 = \left(U_t - \frac{X_T Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_T P}{U_t} \right)^2 \quad (C.12)$$

$$Q = Q_G - \left(\frac{P}{U_t} \right)^2 X_T - \left(\frac{Q_G}{U_t} \right)^2 X_T \quad (C.13)$$

C.11 将式 (C.11) ~ 式 (C.13) 代入式 (C.9) 可得

$$\begin{aligned} (X_d - X_q)(X_{q\Sigma} P)^2 &= X_{d\Sigma} \left[\left(U_t + \frac{X_q Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_q P}{U_t} \right)^2 \right] \cdot \\ &\left\{ \left[\left(U_t - \frac{X_T Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_T P}{U_t} \right)^2 \right] + X_{q\Sigma} \left[Q_G - \left(\frac{P}{U_t} \right)^2 X_T - \left(\frac{Q_G}{U_t} \right)^2 X_T \right] \right\} \end{aligned} \quad (C.14)$$

C.12 进一步整理可得凸极发电机静态稳定极限时机端有功功率和无功功率的关系式为

$$\begin{aligned} X_{d\Sigma} \left[\left(U_t + \frac{X_q Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_q P}{U_t} \right)^2 \right] &\left\{ \left[\left(U_t - \frac{X_T Q_G}{U_t} \right)^2 + \left(\frac{X_T P}{U_t} \right)^2 \right] + \right. \\ X_{q\Sigma} \left[Q_G - \left(\frac{P}{U_t} \right)^2 X_T - \left(\frac{Q_G}{U_t} \right)^2 X_T \right] &\left. \right\} - (X_d - X_q)(X_{q\Sigma} P)^2 = 0 \end{aligned} \quad (C.15)$$

C.13 可以证明, 式 (C.15) 同时适用于隐极发电机。由于式 (C.15) 过于烦琐很难直接应用, 下面导出凸极发电机静稳极限时系统侧方程。参照式 (C.11) 可以得到由系统电压和功率表示的 E_Q 表达式为

$$E_Q^2 = \left(U + \frac{X_{q\Sigma} Q}{U} \right)^2 + \left(\frac{X_{q\Sigma} P}{U} \right)^2 \quad (C.16)$$

C.14 将式 (C.16) 代入式 (C.9), 可得凸极发电机静态稳定极限时系统侧功率方程为

$$\begin{aligned} (X_d + X_T)[U^2 + (X_q + X_T)Q] \{ [U^2 + (X_q + X_T)Q]^2 + [(X_q + X_T)P]^2 \} \\ - (X_d - X_q)[U(X_q + X_T)P]^2 = 0 \end{aligned} \quad (C.17)$$

C.15 进一步整理后可得简化后的静态稳定极限时系统侧功率方程为

$$P^2 \left(\frac{U^2}{X_{d\Sigma}} + Q \right) = - \left(\frac{U^2}{X_{q\Sigma}} + Q \right)^3 \quad (\text{C.18})$$

C.16 由于进相试验时系统电压可近似认为不变, 因此对于一个确定的有功功率, 通过求解一元三次方程的卡尔丹法或盛金公式不难计算出相应的极限无功功率。由方程 (C.18) 可以看出, 方程在实数域内有解的充分必要条件是 $-U^2/X_{q\Sigma} \leq Q < -U^2/X_{d\Sigma}$ 。

C.17 由于进相试验的工作场所通常在发电机机端, 系统无功功率和系统电压通常难以实时监视和测量, 因此在对方程 (C.18) 求解后还需将系统侧的电气量转换为机端电气量以便于现场监视。参照式 (C.12)、式 (C.13) 可得机端电气量表达式为

$$U_t^2 = \left(U + \frac{X_T Q}{U} \right)^2 + \left(\frac{X_T P}{U} \right)^2 \quad (\text{C.19})$$

$$Q_G = Q + \left(\frac{P}{U} \right)^2 X_T + \left(\frac{Q}{U} \right)^2 X_T \quad (\text{C.20})$$

C.18 根据式 (C.18) ~ 式 (C.20) 可得不同系统电压情况下发电机静稳极限功率曲线, 如图 C.2 所示。

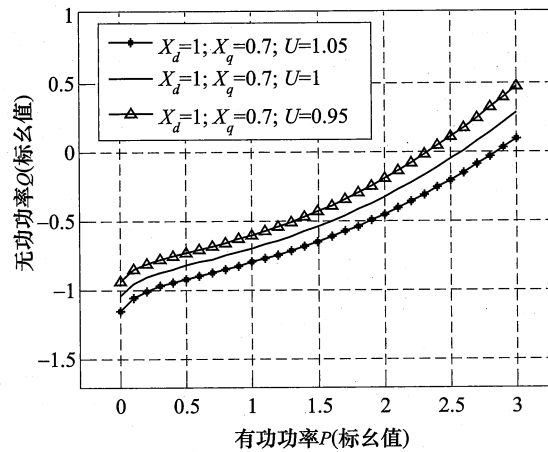


图 C.2 凸极发电机在不同系统电压下的极限功率

C.19 根据静稳极限下发电机的有功功率、无功功率关系可进一步计算出凸极发电机的极限功角 δ_g , 如图 C.3 所示, 其中功角的计算参见附录 D。

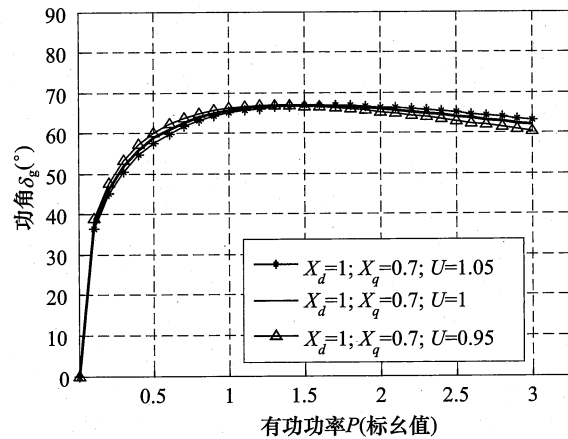


图 C.3 凸极发电机在不同系统电压下的极限功角

附录 D
(资料性附录)
同步发电机功角计算

D.1 在进相试验中, 往往需要在调整无功功率前预先估算目标工况下发电机的功角, 以便确定试验的工况是否会对发电机的静态稳定构成威胁。如图 D.1 所示为凸极同步发电机正常运行时的电压、电流相量图。

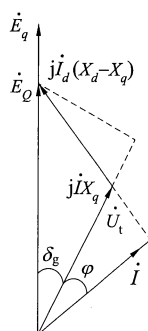


图 D.1 凸极同步发电机正常运行时的电压、电流相量图

D.2 根据同步发电机相量图可得如下关系式

$$\tan \delta_g = \frac{IX_q \cos \varphi}{U_t + IX_q \sin \varphi} \quad (\text{D.1})$$

D.3 当采用机端的有功功率、无功功率计算发电机功角时, 可将式 (D.1) 右侧分子分母同时乘以 U_t , 考虑到 $P = U_t I \cos \varphi$, $Q_G = U_t I \sin \varphi$ 可得

$$\tan \delta_g = \frac{U_t IX_q \cos \varphi}{U_t^2 + U_t IX_q \sin \varphi} = \frac{PX_q}{U_t^2 + Q_G X_q} \quad (\text{D.2})$$

D.4 发电机功角的表达式为

$$\delta_g = \tan^{-1} \left(\frac{PX_q}{U_t^2 + Q_G X_q} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{IX_q \cos \varphi}{U_t + IX_q \sin \varphi} \right) \quad (\text{D.3})$$

D.5 对于隐极同步发电机, 可认为 $X_d = X_q$, 参照式 (D.3) 可得隐极机的功角计算公式

$$\delta_g = \tan^{-1} \left(\frac{PX_d}{U_t^2 + Q_G X_d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{IX_d \cos \varphi}{U_t + IX_d \sin \varphi} \right) \quad (\text{D.4})$$

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
同步发电机进相试验导则

DL/T 1523 — 2016

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 1印张 27千字

印数 0001—1000册

*

统一书号 155123·3082 定价 9.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

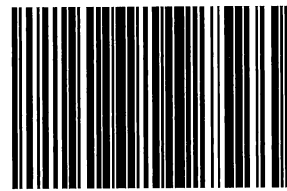
版 权 专 有 翻 印 必 究



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



155123.3082