

938123

15.10.442
10347.2

高等学校教材

大型同步发电机运行

(第二版)

天津大学 黄纯华 主编



高等学校教材

大型同步发电机运行

(第二版)

天津大学黄纯华 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书深入浅出地阐明了大型同步发电机运行的基本理论,并对其各种特殊运行方式的条件及现场试验等有关问题做了比较全面的论述。第一版发行后,受到高校及社会读者的广泛欢迎,对大型发电机运行理论的深入研究和试验起了良好作用。现根据读者要求和近年来国内、外大电网与大型发电机组运行协调配合的成功经验及理论研究成果,对第一版内容进行了较大的修改和补充,并增加了新的章节。

本书共分七章,包括现代电力系统对大型同步发电机的要求和发电机数学模型,同步发电机的正常运行,进相运行、不对称运行、失磁异步运行等特殊运行方式,次同步谐振,电力系统故障运行时汽轮发电机的冲击转矩。

该书是高等学校“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业高年级学生及研究生选修课教材,并可供从事电力系统、发电机科研、设计、制造和运行部门的工程技术人员参考。

高等学校教材

大型同步发电机运行

(第二版)

天津大学 黄纯华 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.25印张 205千字

1982年7月第一版

1992年6月第二版 1992年6月北京第二次印刷

印数4591—7380册

ISBN 7-120-01478-1/TM·410

定价2.50元

第二版前言

本书是根据高等学校电力工程专业教材编审出版计划，为“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业编写的选修课教材。

自本书第一版发行以后，电力工业发展迅速，大电网与大型发电机组运行协调配合已成为国内外专家所关注的重大技术问题，大型发电机各种运行方式的理论研究与现场试验，都已取得了很大进展，同时现代电力系统运行对大型发电机组也提出了新的要求。为此，在第二版中，增加了新的章节，并对原书各章节内容做了较大修改和增减。全书修改内容如下：

(1) 针对现代电力系统对大型发电机组的要求、大电网与大机组运行协调配合中若干技术政策，重新编写了第一章，新增第1-1、1-2节，并将第一版第一章的内容，删减改编为1-3节。

(2) 新增“进相运行试验及在电网运行中的应用”（第3-5节）和“失磁异步运行的试验及其应用条件”（第5-5节）。并对第一版同步发电机失磁异步运行一章作了适当的修改和增减。

(3) 新增“次同步谐振”一章。这是大系统大电机出现后提出的新问题。

(4) 新增汽轮发电机冲击转矩“数据举例”一节（第7-8节），并对第一版第八章（现第七章）进行了较多删改。

(5) 增加了实际大型汽轮发电机“ $P-Q$ 容量图”和“V形曲线”的介绍（在第2-3节中）。

(6) 由于本教材篇幅所限，因而删去了第一版中的第六章同步发电机自励磁和第七章励磁系统全部内容。

第二版《大型同步发电机运行》共七章，分别由天津大学刘维仲副教授（第三章第3-1至3-4节和第四章）、东北电力试验研究院李伟清高级工程师（第三章第3-5节、第五章第5-5节和第七章第7-8节）、黄纯华副教授（除上述章节外的其他章节全部内容）执笔编写，黄纯华主编。全书由重庆大学阎超教授详细审阅。

在教材编写过程中，曾得到中国电力企业联合会科技部姚抚城主任、东北电业管理局调度通讯局黄英矩总工程师、华北电力学院杨以涵教授和毛晋副教授等的指教。重庆大学华智明副教授对该书提出了宝贵意见，在此一并深表谢意。

由于编者水平所限，书中错误和不妥之处，欢迎读者指正。

编 者

1991年2月

文字符号说明

1. 主要符号的意义

A ——定子绕组、定子线负荷、直流分量衰减 因数、常数	Q ——无功功率
AVR——励磁调节器	R ——电阻、调速器调定率
a ——距离、系数	r ——电阻
B ——磁感应强度	S ——视在功率
C ——电容	s ——滑差
D ——阻尼系数	SCR——短路比
d ——直径	SC——短路
$E(e)$ ——电势	T ——变压器、转矩、温度
F ——励磁机、磁势	t ——时间
f ——频率	$U(u)$ ——电压
$G(g)$ ——发电机	v ——速度
H ——发电机组惯性常数	W ——能量、热能、齿的平均幅度
HP——汽机高压缸	x ——电抗
h ——穿透深度	Z ——阻抗
$I(i)$ ——电流	θ ——电角度
IP——汽机中压缸	δ ——功率角
J ——转动惯量	η ——效率
K ——弹性系数、变比、常数	τ ——时间、温升
L ——电感、输电线路	ϕ ——磁通、机械角度、相
LP——汽机低压缸	φ ——功率因数角
l ——长度	ψ ——磁链
M ——互感	ω ——电角速度
m ——质量	Ω ——机械角速度
N ——匝数	α ——机械角加速度
n ——转速、极对数	λ ——常数
P ——有功功率、磁导	σ ——饱和系数
p ——代表 $\frac{d}{dt}$ 算子、特征方程的根	β ——常数
	τ ——时间常数

2. 主要下标符号意义

a ——有功、A相、电枢反应	av ——平均
ap ——非周期	$B(b)$ ——基值、B相
as ——异步	bal ——平衡

C ——电容性、 C 相
 cr ——临界
 D ——阻尼绕组纵轴
 max ——最大值
 min ——最小值
 n ——额定值
 per ——周期
 Q ——阻尼绕组横轴
 q ——横轴
 re ——整流
 s ——外部
 sc ——短路
 d ——纵轴
 e ——电、电磁
 $F(f)$ ——转子、励磁绕组

$G(g)$ ——发电机
 i ——电流
 imp ——冲击
 L ——负荷、电感性
 l ——漏抗、线路
 m ——幅值、原动机
 SY ——同步
 t ——时间
 ϕ ——相
 $*$ ——标么值
 0 ——零序
 2 ——负序
 1 ——正序
(2)——两相短路
(3)——三相短路

目 录

第二版前言

文字符号说明

第一章 现代电力系统对大型同步发电机的要求和发电机数学模型	1
1-1 大型同步发电机主要参数的特点	1
1-2 现代电力系统运行对大型同步发电机的要求	2
1-3 同步发电机数学模型	6
1-3-1 同步发电机的基本方程	6
1-3-2 转矩和功率方程	10
1-3-3 标么制	11
1-3-4 发电机转子运动方程(摇摆方程)	11
第二章 同步发电机的正常运行	14
2-1 稳态运行分析和电压相量图	14
2-1-1 稳态运行分析和凸极机电压相量图	14
2-1-2 隐极机电压相量图	16
2-2 输出功率和功角的关系	17
2-2-1 隐极机功角特性及稳定判据	17
2-2-2 凸极机功角特性	19
2-3 同步发电机的安全运行极限	21
2-3-1 凸极同步发电机安全运行极限(又称容量曲线)	21
2-3-2 隐极同步发电机安全运行极限	23
2-4 同步发电机工作状态与励磁调节的关系	25
2-4-1 发电机空载($P=0$)	26
2-4-2 发电机有功功率为常量	26
2-5 同步发电机工作状态与有功功率调节的关系	28
2-6 电压变化与发电机工作状态的关系	30
2-7 外部阻抗对发电机运行的影响	32
第三章 同步发电机的进相运行	34
3-1 进相运行的基本概念	34
3-2 进相运行应注意的问题	34
3-2-1 静态稳定性的降低	35
3-2-2 端部漏磁的发热	36
3-2-3 厂用电电压的降低	38
3-2-4 定子电流的限制	38

3-3 端部发热的计算	39
3-3-1 铁芯端部的等温度上升线图	39
3-3-2 温度上升计算法	40
3-4 减少端部损耗和温升的措施	43
3-5 进相运行试验及在电网运行中的应用	43
3-5-1 进相运行的试验方法	43
3-5-2 进相运行方式在电网运行中的应用	44
第四章 同步发电机的不对称运行	48
4-1 概述	48
4-2 不对称运行的计算	49
4-2-1 已知电源电势的计算方法	49
4-2-2 已知负荷电流的计算方法	54
4-3 发电机的不对称运行	59
4-3-1 负序电流对发电机的危害	59
4-3-2 运行中不对称的可能值	60
4-3-3 发电机不对称负荷的容许范围	61
4-3-4 汽轮发电机容许不对称负荷的确定	63
4-3-5 水轮发电机不对称运行的分析	66
4-4 减少负序电流的方法	68
4-4-1 减少负序电流的一般方法	68
4-4-2 发电机侧接入附加阻抗	68
4-4-3 调节变压器分接头法	71
第五章 同步发电机失磁异步运行	72
5-1 概述	72
5-2 发电机失磁后的机电暂态过程	74
5-2-1 发电机的失步	74
5-2-2 异步运行	75
5-2-3 再同步过程	78
5-2-4 失磁后观察到的现象	79
5-3 汽轮发电机失磁异步运行数学分析	80
5-3-1 励磁回路开路时的异步运行特性	80
5-3-2 励磁回路短路时的异步运行特性	82
5-4 失磁异步运行的数值仿真	85
5-4-1 简单系统的失磁异步运行数值仿真	85
5-4-2 三机系统的失磁异步运行数值仿真	94
5-5 失磁异步运行的试验及其应用条件	96
5-5-1 失磁试验方法	96
5-5-2 汽轮发电机允许采用异步运行方式的条件	98
第六章 次同步谐振	100

6-1 概述	100
6-1-1 串联电容引起的次同步谐振	100
6-1-2 有源电力设备引起的次同步振荡 (SSO)	103
6-2 研究次同步谐振的统一机电模型	103
6-2-1 质量弹簧系统的基本方程	103
6-2-2 汽轮机和调速器系统	105
6-2-3 电容补偿的输电线	106
6-2-4 同步发电机	107
6-2-5 励磁系统	108
6-2-6 状态变量方程和非状态变量	108
6-3 用特征值法分析SSR的示例	109
6-4 扭转振荡的模式和模式形状	112
6-5 SSR的防止措施	113
第七章 电力系统故障运行时汽轮发电机的冲击转矩	115
7-1 概述	115
7-2 突然三相短路的电磁转矩	115
7-2-1 突然三相短路的电流方程	115
7-2-2 磁链方程	116
7-2-3 突然三相短路时的交变电磁转矩	117
7-2-4 突然三相短路的单向电磁转矩	118
7-2-5 突然三相短路的电磁转矩表达式	118
7-3 突然两相短路的电磁转矩	119
7-3-1 突然两相短路的电流	119
7-3-2 突然两相短路的交变电磁转矩	120
7-3-3 突然两相短路的单向电磁转矩	120
7-3-4 突然两相短路的电磁转矩表达式	121
7-4 非同期并列时发电机的电磁转矩	121
7-4-1 非同期并列的电流	121
7-4-2 非同期并列时的电磁转矩	123
7-5 简化的二质点模型	124
7-6 在不同频率的电磁转矩作用下转轴机械力矩的灵敏度	125
7-7 线路三相短路故障重合闸动作对转轴机械力矩的影响	127
7-8 数据举例	133
7-8-1 发电机满载跳闸	133
7-8-2 单相对地故障	134
7-8-3 引出线三相短路故障	135
7-8-4 重复冲击	135
7-9 降低机组轴应力及减少转轴损伤的措施	136
主要参考文献	138

第一章 现代电力系统对大型同步发电机的要求和发电机数学模型

当前,我国电力工业已进入大电力系统、大机组和高电压的发展阶段。至1990年底,全国发电装机容量已达13789万kW,年发电量达6213亿kW·h。发电机最大单机容量,火电机组为60万kW,水电机组为32万kW,核电机组为90万kW,抽水蓄能机组为20万kW。形成7个跨省电网,其中华东、华中、东北电网装机容量均已超过2000万kW,各主网相继建成了500kV的输电网架,500kV输电线总长已达7117km,±500kV直流输电线路,于1989年投入运行。

为了保证电力系统的安全稳定运行,必须执行《电力系统安全稳定导则》的有关规定,其中电力系统与大型同步发电机的运行协调配合尤为重要,包括与发电机、汽轮机(原动机)和锅炉等方面的协调配合问题。本书重点论述大型同步发电机为适应电力系统运行需要的各种运行方式及其承受能力和有关现场试验。

在这一章中,主要介绍大型发电机参数的特点、现代电力系统对发电机的要求和同步发电机数学模型。

1-1 大型同步发电机主要参数的特点

大型机组与中、小型机组相比具有明显的经济效益,但也带来一些新问题,由于机组容量增大,其结构、参数和运行特性均发生了显著变化。

对于发电机的视在功率,可由下式表示:

$$S = kAB_p d_i l n \quad (1-1)$$

$$A = I_n \frac{N_n}{t_1} \quad (1-2)$$

式中 k ——系数,通常取1.1;

A ——定子线负荷,可由式(1-2)计算;

I_n ——定子额定电流;

N_n ——槽内有效导体数;

t_1 ——沿定子圆周的槽距;

B_p ——气隙中的磁通密度;

d_i ——定子膛的直径;

l ——有效铁芯长度;

n ——转速。

为了提高发电机的单机容量,必须增大式(1-1)中各量数值。但是转速是由电网频率和转子极对数决定的; B_p 只能在比较小的范围内变动,取决于所使用电工钢特性;定

子、转子铁芯尺寸的增加,受到铁路运输尺寸及现代冶金锻造技术可能性的限制。因而,发电机容量的增加,主要依靠改善发电机冷却方法(采用直接冷却方式等)来增大发电机定子线负荷 A 。大型发电机组参数变化主要如下:

1. x_d 、 x'_d 、 x''_d 增大

由于发电机有效材料的利用率提高,线负荷增大,导致与线负荷成正比电抗 x_d 增大(短路比SCR减小),如表1-1。

表 1-1

国产大型汽轮发电机电抗及惯性常数

型 式	短 路 比 SCR	暂 态 电 抗 x'_d (标么值)	飞 轮 转 矩 GD^2 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	惯 性 常 数 H (s)	冷 却 方 式
TQN-100-2	0.614	0.224	13	2.72	氢 冷
QFQS-200-2	0.549	0.243	23	2.4	水 氢 冷
QFS-300-2	0.475	0.269	29.5	2.06	双水内冷
QFSSQ-600-2		<0.38	49	1.7	双水氢冷

x_d 的增大导致发电机静过载能力减小,因而在系统受到扰动时,易于失去静稳定。

电抗的增大,还使发电机平均异步转矩降低,例如中小型汽轮发电机的平均异步转矩的最大值可达额定转矩的2~3倍,而大型机组的平均异步转矩的最大值一般约为额定转矩。因此大型发电机组失磁异步运行时,滑差大、从电力系统吸收感性无功功率多,允许异步运行的负载小,时间短。

2. 定子电阻相对减小,定子时间常数 τ_a 增大

一般中小型发电机 $\tau_a \approx 0.10 \sim 0.16\text{s}$,而国产60万kW汽轮发电机的 τ_a 为0.7s。

τ_a 的增大,使定子非周期电流的衰减变慢,从而对电力系统安全、可靠运行提出了更为严峻的条件,并且恶化了电流互感器和断路器等元器件的运行条件。

3. 机组惯性常数 H 降低

大容量发电机组的体积并不随其容量成比例增大,采用气体或液体直接冷却的绕组与间接冷却绕组相比,有效材料利用率高,在定子和转子的尺寸没有明显增大的情况下,汽轮发电机的单机容量急剧增大,因而导致发电机组惯性常数明显降低,如表1-1所示。机组惯性常数 H 是一个重要参数,当其他条件相同时,在过剩转矩作用下, H 愈小,角度 δ 改变愈快,发电机易于失去同步。 H 值增大,技术上复杂且造价昂贵。

1-2 现代电力系统运行对大型同步发电机的要求

对于大型同步发电机,既要制约于电机制造的技术经济条件,又要满足电力系统的运行要求。具体地说,在不影响发电机本身寿命和可靠性的基础上,同样重要的是应能适应大电力系统安全、稳定运行的要求。

所谓电力系统的稳定性,就是电力系统受到一定的扰动后能否恢复正常运行能力。

而扰动有大有小，为了研究方便将电力系统稳定问题分成小扰动的稳定性和大扰动的稳定性。

1) 小扰动的稳定性(静态稳定性)。所谓静态稳定性是指正常运行的电力系统承受微小的、瞬时出现但又立即消失的扰动后，恢复到它原有运行状况的能力；或者这种扰动虽不消失，但可用原有的运行状况近似地表示可能的新运行状况。

2) 大扰动的稳定性(动态稳定性)。它指的是正常运行的电力系统承受大的并经短暂持续继而消失的扰动后，恢复到近似它原有运行状况的能力；或者，这种扰动虽未消失，但系统可从原来的运行状况过渡到新的运行状况的能力。换言之，它是指系统在急剧扰动下的稳定性。有时又依据在扰动后所经历的时间为8s、5min和20min分别称之为短期、中期和长期三种。另一种分类又把短期问题称为“暂态稳定”，而把中、长期稳定这一大类称为“动态稳定”。

有关保证整个电力系统和单个发电机的稳定问题，在许多教科书和专著中已有详细论述。这里仅从现代电力系统运行需要出发，对大型同步发电机提出如下要求。

1. 应具备调峰能力

由于电网的发展及负荷性质的变化，调峰是一个愈来愈严重的问题，全国各大电力系统峰谷差均较大，有时甚至在高峰拉闸限电的情况下，峰谷差仍占最大负荷的30%，有的达50%。目前，除水轮发电机无例外地参加调峰外，10万kW和12.5万kW汽轮发电机组也要承担调峰任务，部分这类机组已试行两班制运行。部分20万kW的汽轮发电机组也已变动负荷运行。今后将有更多的大机组参加调峰及建设更多的抽水蓄能电站承担调峰。国外电力系统调峰手段比我国要多，但仍不可避免地要用汽轮发电机组承担调峰任务。

因而，发电机组在设计制造时应考虑到调峰的要求，并按冷态起动1000~10000次设计，发电机在结构上采用一些适应于负荷大幅度变动和频繁起停工况、防止老化、疲劳、变形、磨损等因素的技术措施。

2. 应具备低励磁或进相运行的能力

高电压大电网的一个主要特点是线路充电功率大，轻负荷时出现无功功率大量过剩(据500kV线路实测资料，每100km，无功功率约为100Mvar)，以致造成电压升高。因而近年来，当电力系统有功功率低时，愈来愈多采用发电机低励磁或进相运行方式($\cos\varphi$ 可达0.9、0.95以上，甚至变为超前)，以便吸收电感性无功功率，实现无功补偿分层分区就地基本平衡。这是保持电网应有的电压水平既经济、又合理的措施，世界各国均已广泛采用。

需注意的是，发电机在低励磁或进相运行时，由励磁产生的发电机电势较小(通常小于端电压)，因此对应于这一电势的电磁转矩最大值远小于过励磁方式运行时的电磁转矩。与此同时，在最低负荷期间为了减少运行机组台数，和由于大幅度地减小负荷的技术困难，通常保持每台尚在运行的发电机带较大的有功负荷，结果引起运行的发电机电势相对于电网电压有很大的角位移，这时如果电力系统发生大干扰，则保证系统稳定运行将有一定困难。

除需注意电力系统的稳定问题外，对发电机本身来说，可能会导致定子铁芯端压板和

边缘铁芯温度急剧升高,在设计时应予采取防范措施(详见第三章)。

3. 应具有承受不对称运行的能力

电力系统中的负荷不对称运行或发生不对称短路时,发电机定子绕组存在负序电流,使转子出现倍频电流和倍频谐振,产生局部过热甚至转子损坏。水轮发电机在负序电流作用下转子发热情况比汽轮发电机轻得多。

70年代以来,我国发电机曾多次由于不对称电流造成转子损坏事故。例如,1985年3月,姚孟电厂300MW汽轮发电机转子本体中部产生4条横向裂纹及转子槽楔螺钉过热飞脱了94只。在研究事故原因时,得知该机于1984年停运操作时,其主变压器220kV侧断路器A相跳不开,引起较大负序电流,连续时间长达9min。1985年9月杨柳青电厂100MW发电机,由于升压变压器110kV侧断路器一相触头断裂,两相运行2min,造成转子槽楔烧化的严重事故。这些事故不仅说明电力系统非全相运行对机组的危险影响,而且说明大机组出现后的安全问题更加突出,应采取全面的防范措施。

发电机的容许不平衡负荷能力有长时和短时两种,按国家设计制造标准规定,其值列于表1-2中。

表 1-2 发电机容许最大负序电流 I_2 值

转子冷却 方 式	冷却介质或 功 率	长期运行 I_2/I_n	短时运行 $(I_2/I_n)^2 t$	转子冷却 方 式	冷却介质或 功 率	长期运行 I_2/I_n	短时运行 $(I_2/I_n)^2 t$
间接冷却	空 气	0.10	30	直接冷却	300MW及以下	0.08	6
	氢 气	0.10	15		600MW	0.07	7

注 表中 I_n 为发电机定子额定电流, t 为运行时间(s)。

对于短时不对称运行,除满足表1-2中容许值外,尚应满足发电机每相电流不超过额定电流 I_n 。世界各国容许最大负序电流值与表1-2相接近,详见第四章。

4. 应具备失磁异步运行的能力

据历年统计,汽轮发电机失磁故障所占故障比例最大,如1983年全国100MW及以上机组212台,由于励磁系统故障使发电机失磁跳闸发生了22台·次,机组失磁的故障率达10.4次/百台年。又如东北系统1982~1984年100~200MW机组36台,共发生失磁29台·次,故障率高达26.9次/百台年。若一旦发生失磁就使机组跳闸,甩掉负荷以后还要重新起动,不但操作复杂、费时,而且在安全及经济上也都不利。总结国内外经验,除水轮发电机失磁时应立即跳闸外,对于汽轮发电机组应在电网、快速减负荷和厂用电设计及运行等方面创造条件,使发电机在失磁时,能快速、自动减小有功功率到允许水平,并尽快恢复励磁或转移有功功率。在一定时间内还恢复不了励磁,才将失磁发电机组切除。近年来又组织了在一批100、125及200MW机组上进行失磁异步运行试验,积累了不少经验,在大量研究及试验的基础上,使大机组失磁保护动作后自动减有功功率,尽量排除故障,恢复励磁,重新恢复同步运行,已取得较好的成果。

为此,要求现代大型直接冷却汽轮发电机具备承受失磁异步运行的能力。在失磁时,

于30s内将有功功率减到0.6标么值,在2min内减到0.4标么值。在接近额定电压时,异步运行可带0.4标么值的有功功率,转子电流不应大于1.0~1.1倍额定值,异步运行时间允许10min(详见第五章)。

5. 对汽轮发电机轴系自然扭振的要求

(1) 次同步谐振 发电机组大轴在某些不利情况下发生扭振问题,引起了国内外专家的关注。美国Mohave电厂790MW机组曾于1970年和1971年连续两次因次同步谐振(29.5Hz)使大轴严重损坏;加拿大安大略电力公司试验一台机组快速励磁的电力系统稳定器(PSS)时也发生了次同步谐振;联邦德国一台770MW机组由于可控硅控制的电动机反馈,造成15.75Hz次同步谐振。

为了预防次同步谐振损坏大机组,要求制造厂提供大机组每一轴段的自然扭振频率数据,以便电网在采用直流输电、串联电容补偿、电力系统稳定器及带可控硅控制的一次设备时考虑防范措施。

(2) 工频和两倍工频谐振 1985年台湾核电900MW机组,由于电网的不平衡电流,使转子产生倍频(120Hz)扭转,造成两倍工频机电谐振,叶片脱落引起火灾,损失严重。另外,在电厂的出线附近发生故障或并列时,有可能出现直流分量的电流,使转子产生工频频率的扭转。

为了防止故障时故障电流的非周期分量或负序电流分量(包括不平衡负荷),激发电气与机械相互作用的工频和两倍工频谐振损坏大机组,大机组每一轴段的自然扭振频率不应处在工频的0.9~1.1倍(45~55Hz)及1.9~2.1倍(95~105Hz)范围内。

6. 大机组应具备承受电网振荡冲击的能力

由于电网稳定破坏是运行中不可避免,要求大机组在其升压变压器阻抗假定为15%,联接的系统短路容量为43000MVA(对500kV,相当于50kA)时,能承受20个振荡周期的失步运行。

7. 应具备承受误并列能力

误并列应避免,但毕竟仍客观存在。作为大机组的设计标准,很多国家都已有相应规定。结合我国实际,要求大机组在升压变压器阻抗假定为15%,联接系统短路容量为43000MVA时,机组在保证寿命期间应能承受180°误并列5次,120°误并列2次。当大机组具有这一能力时,也同时可以承受电网其他各种各样的实际可能冲击,从而提高了大机组的可靠性。

8. 应具备承受高压线路单相重合闸能力

根据一般定量分析,大电厂高压线出口发生三相故障且重合闸不成功时,对大机组是最危险(虽然几率很低)的故障冲击。至于单相故障,虽几率较大,但即使重合闸不成功,在最不利条件下,根据电网故障时的实测和理论分析结果,轴系疲劳损耗最大值也不会超过0.1%,因而在汽轮发电机整个运行寿命期间,由于采用单相重合闸而积累的疲劳损耗大约为1%左右。故由电力系统运行需要,要求大机组能承受单相重合闸冲击而不影响其可靠性。

以上各项要求,是为适应现代电力系统运行需要所必须的。

1-3 同步发电机数学模型

同步发电机是电力系统的主要元件之一，它在电力系统运行中起着核心作用。关于同步发电机的数学模型，在“电机学”及“电力系统分析”课中均已详细讲述。本节仅给出该书所采用的数学模型，限于篇幅略去对该数学模型的推导。

1-3-1 同步发电机的基本方程

1. 坐标系统

本书各章均采用与转子做同步旋转坐标系统，即 d 、 q 、 0 坐标系统。 d 轴是沿转子磁场绕组纵轴方向，称之为纵轴或直轴； q 轴是沿转子磁场绕组的横轴方向，称之为横轴或交轴； 0 轴是沿转子轴线方向，被称为静止轴。同时，假定 q 轴的正方向超前于 d 轴的正方向 90° 。如图1-1所示。

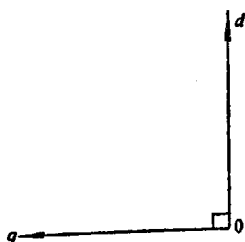


图 1-1 坐标

2. 同步发电机电路

图1-2 为一具有阻尼绕组的同步发电机电路图，共有六个回路，即定子 a 相、 b 相、 c 相三个回路，转子励磁回路（ F ），纵轴等值阻尼回路（ D ）及横轴等值阻尼回路（ Q ）。

图1-3表示同步发电机电路及轴线示意图。三相电机有相差 120° 的对称分布的三个定子绕组，定子绕组与外部三相网络连接。在转子上有一个励磁绕组，其中流过直流电流 i_F ，和两个等效阻尼绕组，分别流过 i_D 和 i_Q ，转子极对称轴称为纵轴，两极之间的对称轴称为横轴。

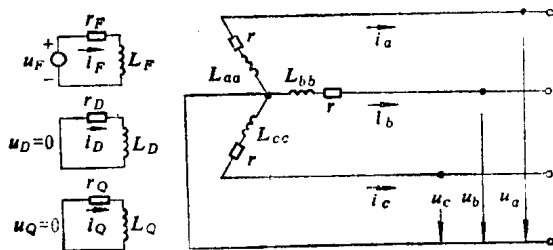


图 1-2 同步发电机电路图

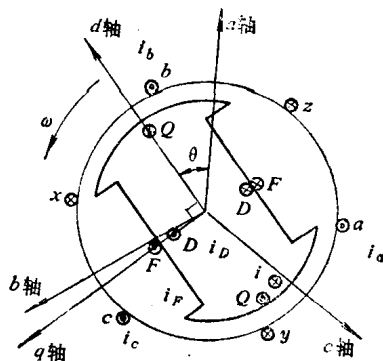


图 1-3 同步发电机示意图

关于磁链、电流和电压的正方向，在定子方面采用定子各相轴线的正方向作为各相绕组的磁链正方向；由绕组中性点流向电机端点的方向，作为定子电流的正方向；同时定子各相电流产生的磁力线方向与该相轴线方向相反，即定子各相正值电流产生该相负值磁链（如 $\psi_a = -L_{aa}i_a$ ）。定子各相端电压的正方向如图1-2所示，向负荷方面看，电压降的正方向与电流的正方向一致。

在转子方面, 选择励磁绕组磁链的正方向与转子纵轴方向一致。当励磁绕组中的电流所产生的磁力线方向与纵轴方向一致时, 则该电流为正值, 即正值的励磁电流产生正值的励磁绕组的磁链 ($\psi_F = L_{FF} i_F$)。励磁电压的正方向如图1-2所示, 向励磁绕组方面看, 电压降的正方向与励磁电流的正方向一致。用类似研究励磁绕组的方法来选择两组等值阻尼绕组的磁链、电流及电压的正方向。

3. 同步发电机基本方程式

根据以上规定, 可写出“理想电机”电压方程和磁链方程式如下:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\psi_a \\ p\psi_b \\ p\psi_c \\ p\psi_F \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \\ 0 & r_F & 0 \\ 0 & 0 & r_D \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中 ψ_a, ψ_b, ψ_c ——a、b、c各相的磁链;

i_a, i_b, i_c ——a、b、c各相电流;

u_a, u_b, u_c ——a、b、c各相端电压;

r ——a、b、c各相电阻;

ψ_F, ψ_D, ψ_Q ——励磁绕组、纵轴阻尼绕组、横轴阻尼绕组磁链;

i_F, i_D, i_Q ——励磁绕组及阻尼绕组中的电流;

r_F, r_D, r_Q ——励磁绕组及阻尼绕组电阻;

u_F ——励磁绕组端电压;

L ——电感, 当下标 $j=k$ 时, L_{jk} = 自感; 当 $j \neq k$ 时, L_{jk} = 互感。且在所有情况下 $L_{jk} = L_{kj}$ 。在式(1-4)中习惯用的下标标记, 小写字母表示定子量, 大写字母表示转子量。式中大部分电感是转子位置角 θ 的正弦函数;

p ——算子, $p = \frac{d}{dt}$ 。

由上可知, 同步发电机有六个电路并建立了六个电压方程, 是带有周期性变化的变系数微分方程式, 求解这些方程式异常困难。因而想到用一些新的变量来代替旧的变量, 以

简化方程式便于研究同步发电机的运行问题。

派克变换,就是将以 a 、 b 、 c 相坐标表示的三相电磁量(电流、电压、磁链等),变换到以转子纵轴 d 、横轴 q 及静止轴 0 为坐标轴的 d 、 q 、 0 坐标系(如图1-3),使按相坐标建立的变系数微分方程变换为按 d 、 q 、 0 坐标表示的常系数微分方程。

经过派克变换,式(1-4)可转换为具有常系数的磁链方程式为

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{aF} & M_{aD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{aQ} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{aF} & 0 & 0 & L_F & M_{FD} & 0 \\ M_{aD} & 0 & 0 & M_{DF} & L_D & 0 \\ 0 & M_{aQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

在使用标么值时,电抗与电感数值相等,即 $x = \omega L$,当同步转速时, $\omega = 1$,则 $x = L$ 。

若以相应的电抗替换式(1-5)中各电感,又得到以下表达式

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{aD} & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aQ} \\ 0 & 0 & x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & 0 & x_F & x_{FD} & 0 \\ x_{aD} & 0 & 0 & x_{FD} & x_D & 0 \\ 0 & x_{aQ} & 0 & 0 & 0 & x_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

如前所述,同步发电机电压方程(1-3)可简写为

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ \text{---} \\ u_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\psi_{abc} \\ p\psi_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

在一般的情况下, $r_a = r_b = r_c = r$,所以可定义 $R_{abc} = rU_{10}$ 。

式中 U_{10} 是 3×3 阶单位矩阵。

同样,将式(1-7)进行派克变换,两侧同时左乘 $\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_1 \end{bmatrix}$,并且定义 P 为

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

上式称为派克变换矩阵,这个矩阵的行列式不等于零,因而是非奇异矩阵,其逆矩阵 P^{-1} 是存在的。

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (1-9)$$