

ELECTRICAL MACHINES

高等学校教材

谢应璞 主编

电机学 下册

四川大学出版社



举报电话 8008699555 或
02586631855 或 1655 或 1656 或 1657
移动 3389 联通 9331 电信 1655
四川大学出版社

ELECTRICAL MACHINES

高等学校教材

谢应璞 主编

电机学

下册

四川大学出版社



责任编辑:韩 果
封面设计:罗 光
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

电机学(上、下册)/谢应璞主编. —成都:四川大学出版社,
2007.7

ISBN 978-7-5614-3757-5

I. 电… II. 谢… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 111749 号

书名 电机学(上、下册)

主 编 谢应璞
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号(610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-3757-5/TM·1
印 刷 成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 29
字 数 652 千字
版 次 2007 年 7 月第 1 版
印 次 2007 年 7 月第 1 次印刷
印 数 0 001~3 000 册
定 价 38.00 元(上、下册)

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电 话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065
◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

版权所有◆侵权必究

◆网址: www.scupress.com.cn

前 言

本书是电力类各专业的大学本科教材,内容符合国家教委所规定的电力类电机学课程的基本要求。

按照电力类各专业的特点,本书主要阐述各类电机的基本原理、基本分析方法、运行特性和参数。

全书按照变压器、异步电机、同步电机和直流机的顺序分为上、下册。上册以变压器为重点,并将交流电机的共同基础部分作为一篇单独列出。下册以同步电机为重点,适当压缩直流电机内容。各章具有相对独立性,具体讲授时秩序可以改变。为了补充和加强学习电机的基础知识,特将磁性材料和磁路诸定律安排在绪论中讲授。

结合我国国情和学生实际,在编著本书过程中,力求作到由浅入深,循序渐进。尽量使物理概念清楚,叙述简洁易懂,便于学生阅读理解和掌握。为便于学生复习和自学,每章有小结、思考题和习题,书末附有习题答案。

本书是在原电机学试用教材的基础上,经过多年的教学实践,补充和修正试用教材中的不足,重新正式出版的。教材的各部分由以下教师编写:变压器由廖正菁副教授编写,直流电机由方康勋副教授编写。异步电机及本书的全部思考题及习题由曾德纯副教授编写,同步电机及其余部分由谢应璞教授编写。苏异德高工为本书编写了实验指示书。

本书由谢应璞教授主编、黄耀群教授主审。曾德纯副教授对全书文字图表和符号进行了终审和修正,并提供了习题答案。

本书编写过程中,得到教研室全体同志和电力系领导的大力支持和帮助,并提供了许多宝贵意见。许多同志为本书的编辑、排印和校对等工作都付出了辛勤的劳动,对此,编写者表示衷心的感谢。同时,本书在编写时博采众长,参阅和引用了有关专家关于电机学和电机理论的论述和文献资料,在此一并向有关作者致以谢意!

由于水平有限。时间仓促,错误和不当之处,在所难免。欢迎读者指正。

编者

1994 年

目 录(下册)

第四篇 同步电机

第十六章 同步发电机的基本电磁关系	(1)
16-1 同步电机的基本工作原理	(1)
16-2 同步电机的构造特点	(2)
16-3 同步电机的额定值	(5)
16-4 同步电机的空载运行	(6)
16-5 对称负载时的电枢反应	(9)
16-6 隐极同步电机的电枢反应磁通、电枢反应电抗和同步电抗	(14)
16-7 凸极同步电机的电枢反应磁通、直轴同步电抗和交轴同步电抗	(16)
小 结	(18)
思考题	(19)
习 题	(19)
第十七章 同步发电机对称运行时的特性	(21)
17-1 同步发电机的基本特性	(21)
17-2 对称负载时隐极同步发电机的方程式、相量图和等效电路	(21)
17-3 对称负载时凸极同步电机的方程式和相量图	(25)
17-4 同步发电机的短路特性、同步电抗和短路比的求取	(29)
17-5 零功率因数负载特性	(31)
17-6 同步发电机的运行特性	(34)
17-7 同步电机电压变化率及额定励磁电流的求取	(36)
17-8 稳态参数的测定	(39)
小 结	(40)
思考题	(41)
习 题	(41)

第十八章 同步发电机与电网并联运行	(43)
18-1 概 述	(43)
18-2 投入并联运行的条件和方法	(43)
18-3 同步发电机的功角特性	(47)
18-4 并网运行时同步发电机有功功率的调节和静态稳定	(51)
18-5 无功功率的调节和 U 形曲线	(53)
18-6 调节有功功率对发电机运行状态的影响	(56)
18-7 同步发电机与有限容量的电网并联运行	(57)
小 结	(60)
思考题	(61)
习 题	(61)
第十九章 同步发电机的不对称运行	(63)
19-1 概 述	(63)
19-2 正序、负序和零序阻抗	(63)
19-3 各相序的基本方程和等效电路	(68)
19-4 三相同步发电机的不对称稳定短路	(69)
19-5 不对称运行的影响、阻尼绕组的作用	(73)
小 结	(75)
思考题	(75)
习 题	(76)
第二十章 同步发电机的突然短路	(77)
20-1 概 述	(77)
20-2 超导体磁链守恒原理	(77)
20-3 三相突然短路时的磁链和电流的分析	(78)
20-4 同步电机的瞬变和超瞬变电抗	(80)
20-5 三相突然短路电流	(84)
20-6 时间常数	(87)
20-7 突然短路与同步电机及电力系统的关系	(90)
小 结	(91)
思考题	(92)
习 题	(92)
第二十一章 同步电动机	(94)

21-1 概 述	(94)
21-2 由同步发电机过渡到同步电动机	(94)
21-3 同步电动机的基本电磁关系	(95)
21-4 同步电动机的电磁功率、电磁转矩及功角特性	(98)
21-5 同步电动机的无功功率及有功功率调节	(99)
21-6 同步调相机	(104)
21-7 同步电动机的起动和制动	(107)
21-8 特殊同步电动机	(111)
小 结	(116)
思考题	(116)
习 题	(116)
第二十二章 同步电机的冷却方式及励磁方式	(118)
22-1 同步电机的发热和冷却	(118)
22-2 同步发电机的励磁方式	(121)
小 结	(126)
思考题	(126)

第五篇 直流电机

第二十三章 直流电机的作用原理和结构	(127)
23-1 直流电机的基本原理	(127)
23-2 直流电机的结构和额定值	(130)
23-3 直流电机的励磁方式	(132)
23-4 直流电枢绕组	(133)
思考题	(140)
习 题	(141)
第二十四章 直流电机的磁势、电势和基本方程式	(142)
24-1 直流电机空载时的磁路和磁势	(142)
24-2 直流电机负载时电枢的磁势和磁场	(144)
24-3 直流电机的电枢反应	(146)
24-4 电枢绕组的感应电势	(150)
24-5 直流电机的电磁转矩	(151)
24-6 直流电机的基本方程式	(152)

小 结	(156)
思考题及习题	(156)
第二十五章 直流电机的运行特性	(158)
25-1 直流发电机的运行特性	(158)
25-2 直流电动机的运行特性	(165)
小 结	(172)
思考题	(172)
习 题	(174)
第二十六章 直流电动机的起动、调速和制动	(175)
26-1 直流电动机的起动	(175)
26-2 直流电动机的调速	(177)
26-3 直流电动机的制动	(182)
思考题	(186)
习 题	(186)
第二十七章 直流电机的换向	(188)
27-1 换向过程及换向元件中的电流变化规律	(188)
27-2 产生火花的原因	(191)
27-3 改善换向的方法	(192)
27-4 环火的产生及其防止措施	(194)
小 结	(195)
思考题	(196)
习题答案	(197)
主要符号表	(200)

第四篇 同步电机

同步电机的基本特点是：同步电机转子的转速 n 恒等于定子旋转磁场的同步转速 n_1 ，它和电网频率 f_1 之间严格遵守下式的关系：

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{P} (\text{r/min})$$

同步电机即由此得名。我国电网工业频率规定为 $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ，而电机极对数 P 是整数，因此，对某一台同步电机，其转速总为一固定值。例如，二极同步电机的转速为 3000 r/min ，四极同步电机的转速为 1500 r/min ，依此类推。

同步电机主要用来作为产生三相交流电的发电机，现代工农业所用的交流电能几乎全由同步电机供给，所以同步电机的作用和价值是极其重要的。

同步电机和其他所有电机一样，从原理上讲也是可逆的，它不仅可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行。

同步电机的另一种特殊运行方式为同步调相机，或称同步补偿机，专门用来向电网发送滞后无功功率，以改善电网的功率因数。

对于电力类各专业，同步电机甚为重要。本篇主要介绍同步电机的结构特点、分析方法、运行特性和它的各种参数。

第十六章 同步发电机的基本电磁关系

16-1 同步电机的基本工作原理

同步电机主要分定子和转子两部分。一般同步电机的定子(又称电枢)与异步电机的定子相同，在定子铁心内腔均匀冲槽，槽中嵌放对称三相绕组。同步电机的转子结构与异步电机转子完全不同，如图 16-1 所示。图中定子只画出 A 相的两个等效集中绕组 $A_1 - X_1$ 和 $A_2 - X_2$ 。转子为凸极式。

同步电机的转子由铁心和励磁绕组构成，励磁绕组靠外接直流电源供给励磁电流。当励磁绕组中流过直流电流后，产生磁

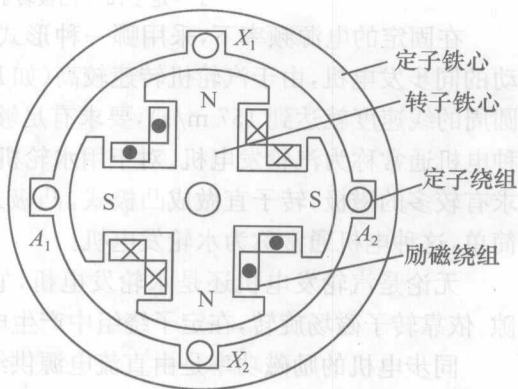


图 16-1 同步电机结构原理图

极磁场,或称为励磁磁场,原动机拖动转子旋转时,主磁场同转子一起旋转,就得到一个机械旋转磁场,该磁场对定子发生相对运动,在定子绕组中感应出三相对称的交流电势。由于定子三相对称绕组在空间相差 120° 电角度,因此三相电势也在时间上相差 120° 电角度,分别用 e_{QA}, e_{QB}, e_{QC} 表示,则

$$\left. \begin{aligned} e_{QA} &= E_m \sin \omega t \\ e_{QB} &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ e_{QC} &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (16-1)$$

如果同步发电机接上负载,就有三相电流流过,这时同步发电机将机械能转换为电能。接入电网的同步发电机,在一定条件下也可作电动机运行,这时同步电动机便将电能转变为机械能。

16-2 同步电机的构造特点

现代同步电机绝大部分都是做成电枢固定而磁场旋转的,称为转场式;如有特殊要求时,可作为转枢式,如交流励磁机。

在旋转磁极式的同步电机中,按磁极的形状又可分为隐极式和凸极式两种,如图 16-2 所示。

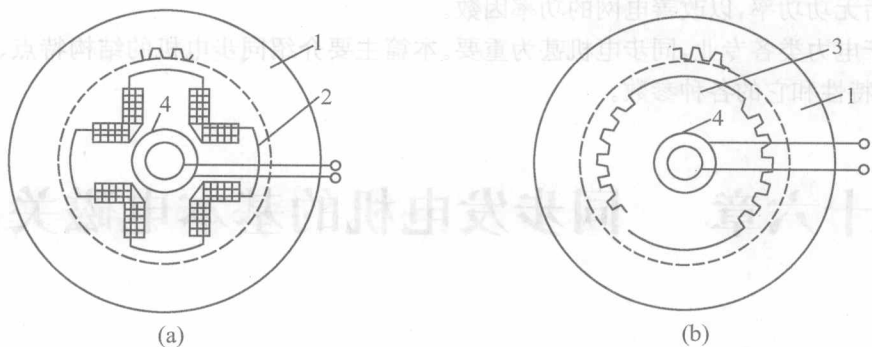


图 16-2 同步电机的基本型式
(a) 凸极式 (b) 隐极式
1—定子;2—凸极转子;3—隐极转子;4—滑环

在固定的电源频率下,采用哪一种形式的转子和电机的转速有关。对于用汽轮机拖动的同步发电机,由于汽轮机转速较高(如 $P=1, n=3000 \text{ r/min}$, 转子直径为 1 m 时转子圆周的线速度就达到 157 m/s),要求有足够的机械强度,所以转子磁极宜做成隐极式,这种电机通常称为汽轮发电机。对于用水轮机拖动的发电机,由于水轮机转速较低,因而要求有较多的磁极,转子宜做成凸极式。凸极式的转子在结构和加工工艺上比隐极式的简单,这种电机通常称为水轮发电机。

无论是汽轮发电机还是水轮发电机,它们都有共同的三个部分,即定子、转子和气隙。依靠转子磁场旋转,在定子绕组中产生电磁感应,实现能量转换。

同步电机的励磁功率是由直流电源供给的,而不像异步电机那样由电网供给无功励磁功率。为了满足同步电机运行性能的要求,电机应具有较大的气隙。按容量大小不同,

气隙长度约在 0.5 cm ~ 8 cm 范围内,而异步电机气隙较小,其长度很少有超过 0.3 cm 的。

同步电机的定子铁心和绕组就其结构和原理而言,与异步电机没有本质的区别,只是由于同步电机容量大,电压高,因而要求一些特殊的通风冷却和绝缘结构以及专门的加工工艺。

下面我们着重介绍汽轮发电机和水轮发电机转子的结构特点。

一、汽轮发电机

由于原动机的要求,汽轮发电机均为横轴式(卧式)。图 16-3 为汽轮发电机转子装配图。图 16-4(a) 和 (b) 为两极汽轮发电机转子铁心横剖面图。

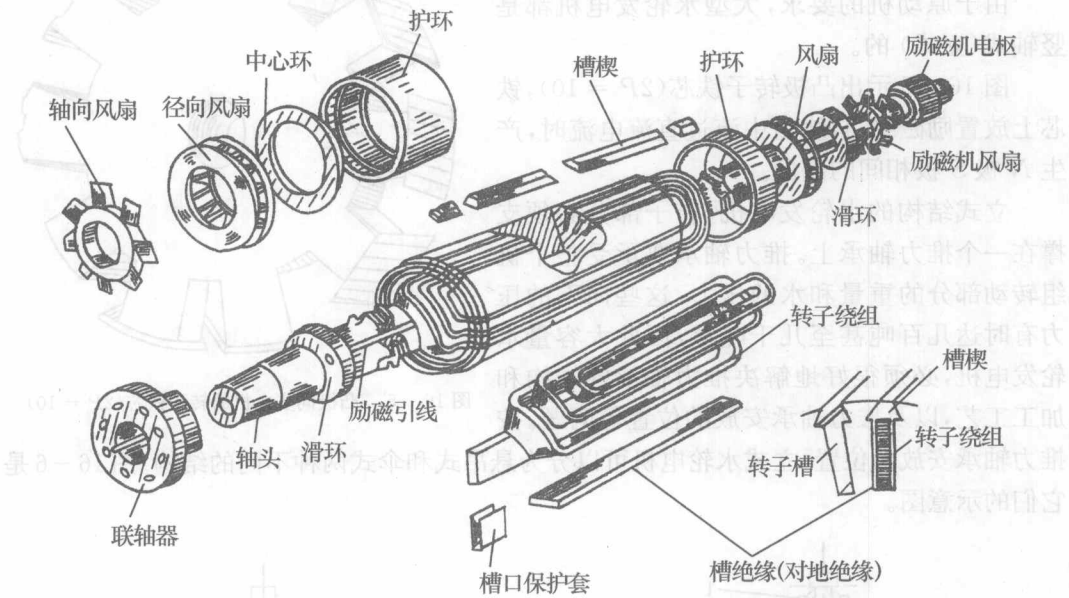


图 16-3 两极空气冷却汽轮发电机的转子装配图

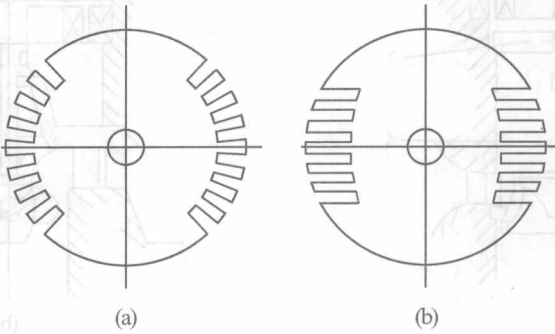


图 16-4 两极汽轮发电机转子铁芯横剖面图

(a) 幅射形槽 (b) 平行槽

对于转子铁心,要求它的导磁性能好,一般由高强度和导磁较好的合金钢锻成,并且

和转轴做成一个整体。转子铁芯上开槽较多,齿较窄的部分叫小齿,这部分约占圆周的三分之二(安放励磁绕组),另一部分没有开槽,形成大齿(磁极部分)。汽轮发电机都做成一对或两对磁极,转子上只有两个或四个大齿。在转子槽里放上励磁绕组,励磁绕组通入直流电时,就在大齿上形成N极和S极,大齿的正中就是磁极的中心。由于转速高,为避免产生过大的离心力,转子直径受到一定限制,一般不超过1 m,为了提高单机容量,只能增加转子的长度,因此汽轮发电机的转子是一个细而长的圆柱体,现代汽轮发电机的定子内径D与转子长度L之比($\frac{D}{L}$)约为 $\approx 0.17 \sim 0.5$ 。

二、水轮发电机

由于原动机的要求,大型水轮发电机都是竖轴式(立式)的。

图16-5示出凸极转子铁芯($2P = 10$),铁芯上放置励磁绕组,绕组中流过直流电流时,产生N极S极相间的磁极。

立式结构的水轮发电机,转子部分必须支撑在一个推力轴承上。推力轴承要承受整个机组转动部分的重量和水的压力,这些向下的压力有时达几百吨甚至几千吨重,因此大容量水轮发电机,必须很好地解决推力轴承的结构和加工工艺,以及推力轴承安放的位置等问题。按推力轴承安放的位置,立式水轮电机可以分为悬吊式和伞式两种不同的结构。图16-6是它们的示意图。

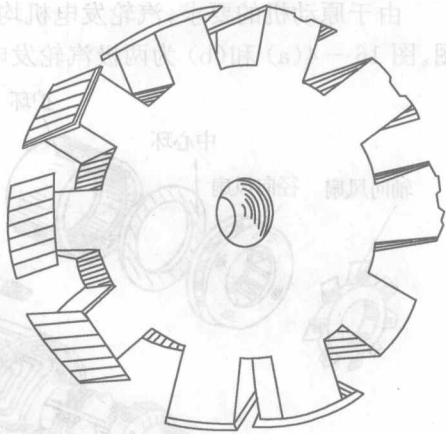


图16-5 凸极同步电机的转子铁芯($2P = 10$)

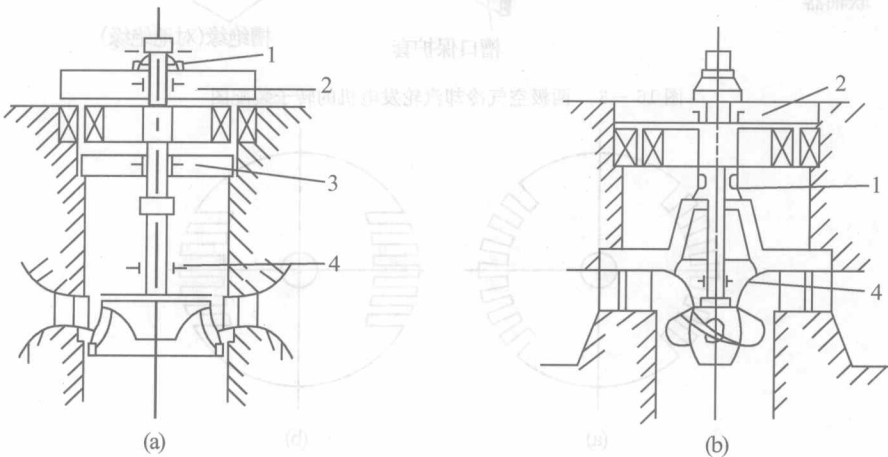


图16-6 立式水轮发电机

(a) 悬吊式 (b) 伞式

1—推力轴承;2—上导轴承;3—下导轴承;4—水轮机导轴承

悬吊式是推力轴承放在转子的上部,整个转子都悬挂在推力轴承之上,见图16

—6(a);伞式是把推力轴承放在转子的下部,见图16—6(b)。悬吊式稳定性好,用在转速高的水轮发电机里;伞式轴向长度小,可以降低厂房的高度,用于低速水轮发电机里。除了推力轴承外,还装有导轴承,其目的是为了保持机组运行稳定。

由于极数多,转速低,故水轮发电机的特点是转子直径大,长度短。在低速水发电机中 D/L 可达5~7或更大。例如我国生产的300 MW水轮发电机,转速为125 r/min, $2P = 48$, $D = 35.6$ m, $L = 2.75$ m, $D/L = 13$,由此可见整个机组外形是短而胖的,与瘦而长的汽轮发电机正好相反。

凸极同步电机的转子磁极上,除装有励磁绕组外,还装有阻尼绕组,如图16—7所示。它与鼠笼型异步电动机的笼型结构相似,整个阻尼绕组由插入极靴阻尼槽内的铜条和端接短路铜环焊接组成,形成半鼠笼状(或全鼠笼状)。阻尼绕组可以减小负序电抗和当同步发电机产生不稳定运行时抑制转子的振荡。对同步电动机,阻尼绕组主要作为起动绕组用。

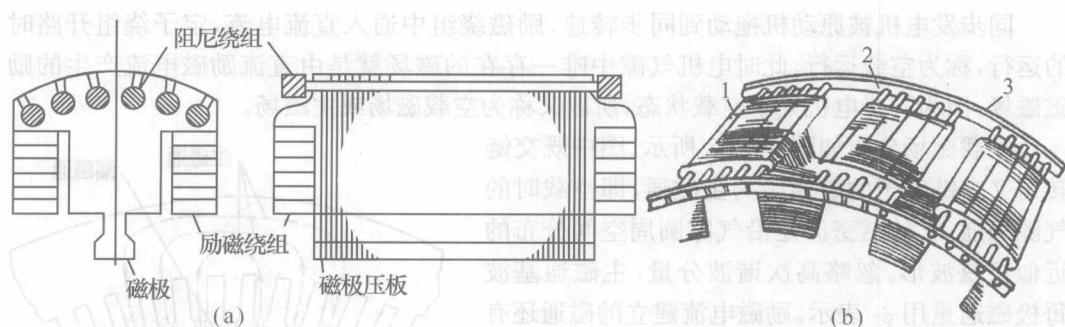


图16—7 阻尼绕组

(a) 磁极及阻尼条 (b) 阻尼绕组装配

1—极靴;2—阻尼铜条;3—端接短路铜环

16—3 同步电机的额定值

同步电机的额定值主要有以下几个:

(1) 额定容量(S_N)或额定功率(P_N):指电机长期安全运行的最大允许输出功率。对发电机来说,是指出线端输出的电功率,以有功功率(千瓦)或视在功率(千伏安)表示。对电动机来说是指轴上输出的机械功率,以千瓦来表示。对于调相机来说,则是指出线端输出的无功功率,以千乏为单位。

(2) 额定电压(U_N):指电机长期安全运行时的最高电压,通常用线电压来表示,单位为伏或千伏。

(3) 额定电流(I_N):指电机正常连续运行的最大工作电流,通常用线电流来表示,单位为安或千安。

(4) 额定功率因数($\cos\varphi_N$):同步电机的额定功率因数是指额定有功功率和额定视在功率的比值。一般来说,铭牌上标有有功功率和 $\cos\varphi_N$,或者视在功率和 $\cos\varphi_N$ 。

(5) 额定转速(n_N):指额定运行时电机的转速。对同步电机而言,即为同步转速。

(6) 额定频率(f_N):指额定运行时电势的频率。我国标准工频规定为 50 Hz。

(7) 额定效率(η_N):指电机额定运行时的效率。

上述额定值,它们之间存在一定的联系,如果知道其中几个量,就可以求出其余的量。例如,对于三相发电机来说

$$P_N = S_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \quad (16-2)$$

对于三相电动机来说

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N \quad (16-3)$$

16-4 同步电机的空载运行

一、空载磁场

同步发电机被原动机拖动到同步转速,励磁绕组中通入直流电流,定子绕组开路时的运行,称为空载运行。此时电机气隙中唯一存在的磁场就是由直流励磁电流产生的励磁磁场,因为同步电机处于空载状态,所以又称为空载磁场或主磁场。

空载磁场分布如图 16-8 所示。图中既交链转子又交链定子的磁通称为主磁通,即空载时的气隙磁通。它的磁密波是沿气隙圆周空间分布的近似正弦波形。忽略高次谐波分量,主磁通基波每极磁通量用 ϕ_0 表示。励磁电流建立的磁通还有一小部分是仅交链励磁绕组本身,而不穿过气隙与定子绕组交链,称主极漏磁通,用 $\phi_{f\sigma}$ 表示,它不参与电机的机电能量转换。

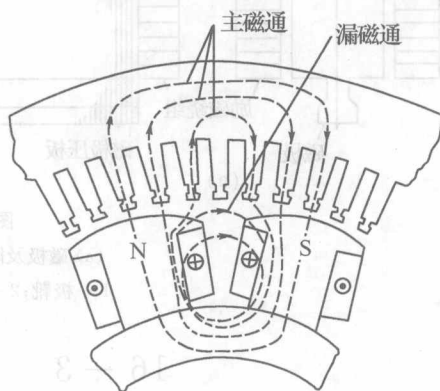


图 16-8 凸极同步电机的磁路

主磁通所经路径称为主磁路。它由主极铁心 → 气隙 → 电枢齿 → 电枢磁轭 → 电枢齿 → 气隙 → 另一主极铁心 → 转子磁轭形成闭合磁路。漏磁通的路径主要由空气和非磁性材料等组成,两者相比,主磁路的磁阻要小得多,所以在磁极磁势的作用下,主磁通远大于漏磁通。

二、空载特性

在原动机驱动下,转子以同步速度 n_1 旋转,主磁通切割定子绕组,感应出频率为 f 的三相基波电势,感应电势的有效值为

$$E_0 = 4.44 f \omega K_{w1} \phi_0 \quad (16-4)$$

式中 ϕ_0 —— 磁极的基波每极磁通,单位 Wb;

E_0 —— 基波电势,单位 V;

K_{w1} —— 基波绕组系数;

ω —— 每相定子绕组串联匝数。

$$f = \frac{P n_1}{60} \quad (16-5)$$

由于 $E_0 \propto \phi_0$, $F_f \propto I_f$, 因此在改换适当比例尺后, 空载特性曲线 $E_0 = f(I_f)$ 即可表示主磁通 ϕ_0 和励磁磁势 F_f 之间的函数关系, 即 $\phi_0 = f(F_f)$, 即为电机的磁化曲线。这就说明 F_f 与 ϕ_0 二者具有内在的联系。因此任何一台电机的空载特性实际上也反应了它的磁化特性。从图 16-9 可以看出, 当磁通较小时, 磁路不饱和, 磁化

$$K_s = \frac{F_{f0}}{F_\delta} = \frac{\overline{ac}}{\overline{ab}} = \frac{\overline{dn}}{\overline{dc}} \quad (16-6)$$

空载特性曲线可以用标么值来表示,以额定电压 U_N 为电势的基值, I_{f0} 为励磁电流的基值(I_{f0} 为电机空载时 $E_0 = U_N$ 的励磁电流)。不同电机用标么值绘出的空载特性都相差不多,故可认为有一条标准的空载特性曲线存在。标准空载特性曲线的数据如表 16—1 所示。

励磁电流 I_{f*}	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
空载电热 E_0^*	0.58	1.0	1.21	1.33	1.40	1.46	1.51

空载特性虽然很简单,但它却是电机中一条最基本的特性曲线,它的用途很广,通过

空载特性还可以检验电机励磁系统的工作情况,电枢绕组联接是否正确,空载特性代表了电机中磁和电两方面的联系,表达了由励磁磁势产生感应电势的能力。在有负载的情况下,如果能获得磁路中的总磁势,也可利用这个特性来求取气隙磁通在电枢绕组中所感应的气隙电势。

三、对空载电势的要求

现代交流发电机要求其产生的电势是:(1)三相对称;(2)频率恒定;(3)波形接近于正弦;(4)具有一定的幅值。这几项要求标志着发电机输出电能的质量。另外,从设计和制造的角度来看,还要求:(1)制造加工容易;(2)节约材料;(3)维修方便,保证电机运行性能等。然而对发电机输出电能质量上的要求和制造上的经济性有时是会发生矛盾的,因此,必须从整体来看问题,不能片面地强调某一方面。事实上要求电能质量绝对化,既是不可能的,而且也没有必要,反而会给发电机的制造带来困难,增加不必要的制造费用。根据国家标准 GB755—81 规定,允许电势波形和电势的不对称程度有一定范围的偏差。

(一) 对电势波形的要求

同步发电机空载线电压的波形应在额定电压和额定转速情况下测定。空载线电压波形与正弦波形的偏差程度,一般用所谓电压波形正弦性的畸变率来表示。根据国家标准 GB755—81 规定,电压波形正弦性畸变率 K_u ,可按式(16-7)算出

$$K_u = \left(\frac{100}{u_1} \sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \cdots + u_n^2} \right) \% \quad (16-7)$$

式中 u_1 ——基波电压有效值,也可用线电压的有效值来代替;

u_n —— n 次谐波电压的有效值。

对于额定功率在 300 kVA 以上的发电机, K_u 要求不超过 5%;对于额定功率在 10 kVA ~ 300 kVA 的发电机, K_u 要求不超过 10%。

畸变率的数值可用波形畸变率测量仪测定,也可用示波器拍摄电压波形,然后用数学分析法确定各次谐波的数值,再按(16-7)式算出畸变率。当前采用计算机辅助设计程序来求电压波形畸变率是较好的方法。

事实上,如果所测电压波形曲线与其基波分量的最大瞬时偏差 ΔE 不超过基波幅值 E_{1m} 的 5% 时,即可认为实际上是正弦波形(如图 16-10 所示)。

如果电势波形正弦性畸变率太大,将产生许多不良后果,例如使发电机本身和由它所供电的电动机的损耗增加和效率降低等。因此,对正弦波形畸变率应有足够的重视。

(二) 在三相系统中对电势对称的要求

在三相系统中电势要对称,即要求各相电势幅值相等而相位相差 120° 电角度。这就要求三相绕组中每相应具有相同的匝数,并且安置在恰当的位置上。按 GB755—81 规定:多相系统中,如电压的负序和零序分量均不超过正序分量的 2% 时,即称为实际对称电压系统。国家标准要求

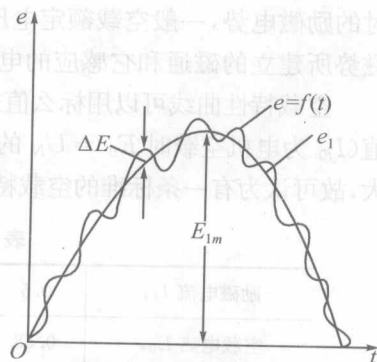


图 16-10 电势波形

三相发电机的输出电压能满足实际对称系统的要求。

16-5 对称负载时的电枢反应

空载时同步电机只有一个同步速旋转的转子磁场,即励磁磁场,它在电枢绕组中感应出三相对称电势,称励磁电势 E_0 。由于空载,所以定子每相电端压 $U = E_0$ 。但当定子接上对称的三相负载后,情况就不同了。这时负载电流产生了第二个磁势——电枢磁势。电枢磁势与励磁磁势相互作用形成负载时气隙中的合成磁势并建立负载时的气隙磁场。这时尽管励磁电流未变,但气隙磁场已不同于原来的励磁磁场,所以气隙中感应电势已不再是 E_0 ,并且由以后分析可知,此时的端电压 U 也明显地不同于 E_0 ,且在 U 不同于 E_0 的诸因素中起决定性作用的是电枢磁势的影响。本节的主要任务就是研究对称负载时电枢磁势的基波对主极磁场基波的影响,简称对称负载时的电枢反应。

鉴于无论转子磁场还是电枢磁场两者都不是静止的,所以首先要弄清楚它们之间的运动关系。电枢磁场的转速 n_1 是由定子绕组中流过频率为 f 的电流而产生的,在定子绕组中形成 P 对极的旋转磁场,它们之间的关系为 $n_1 = \frac{60f}{P}$ 。

转子的转速 n 是按转子磁势在定子绕组中感生的电势(从而产生电流)频率应为 f 的要求决定的,并且转子的极对数与定子的极对数是相等的,故原动机应将发电机转子转速拖到 n ,并且使 $n = n_1$ 。

这说明电枢基波磁势的转速与转子磁势的转速是相等的。另外,由于电枢磁势基波的转向决定于电枢三相电流的相序,而后者又决定于转子磁势的旋转方向,不难看出,电枢磁势基波的转向必定和转子转向一致。由此可见,电枢磁势的基波与转子磁势基波同方向、同速率,两者在空间位置上处于相对静止状态,也就是说,这两个磁场的合成结果,不随时间而变化,在任何瞬间都是相同的。所以,我们在分析电枢反应时可以选取任一瞬间来分析。

在以后的分析中还可以知道,正是由于这种相对静止,使电机能产生稳定的气隙磁场和平均电磁力矩,实现机电能量转换。实际上这也是所有电磁感应型旋转电机能够正常运行的基本条件。

电枢反应的性质(助磁、去磁或交磁)取决于电枢磁势基波与励磁磁势基波的空间相对位置。而分析表明,这一相对位置与励磁电势 E_0 和电枢电流 I 之间的相位差,即角度 φ 有关(φ 称为功率因数角),下面就 φ 角的几种情况,分别讨论电枢反应的性质。

在分析中假设气隙是均匀的,并且空间矢量和时间相量均是基波正弦量。

一、 I 和 E_0 同相($\varphi = 0$) 时的电枢反应

图 16-11(a) 是一台两极同步发电机的示意图。为简单计,图中电枢绕组每一相都用一个集中线圈来表示,主磁极画成凸极式。电枢绕组中电势和电流的正方向规定为从首端流出,用 $\odot$ 表示,尾端流入,用 $\otimes$ 表示。