

TONG BU FA DIAN JI YUN XING JI SHU YU SHI JIAN

周德贵 巩北宁 编著

同步发电机

运行技术与实践

TONG BU FA DIAN JI YUN

TONG BU FA DIAN JI YUN

TONG BU FA DIAN JI

同步发电机运行技术与实践

中国电力出版社

TM341.06

中国电力出版社

291664-
391664

同步发电机运行技术与实践

周德贵 巩北宁 编著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书针对当前电力系统的运行实际,并应从事发电机运行工作的有关人员急需而写作。书中紧密结合发电机的运行实践,集中、系统地介绍和分析了同步发电机正常运行、进相运行、失磁异步运行和不对称运行技术的基本理论、运行特点、限制因素、运行条件及对电力系统的作用和影响。汇集了发电机运行技术的科研成果,反映了发电机现代运行技术的新概念与新水平。

本书可供从事同步发电机运行技术的专业人员阅读使用,亦可供从事发电机设计的专业人员和大专院校电气专业有关的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

同步发电机运行技术与实践/周德贵,巩北宁编著. -北京:中国电力出版社,1996

ISBN 7-80125-085-0

I. 同… II. ①周… ②巩… III. 同步发电机-运行 IV. TM341.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 20306 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

x

1996 年 5 月第一版 1996 年 5 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 334 千字

印数 0001—4070 册 定价 15.20 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着电力系统发展和单机容量的增大，对同步发电机的运行性能提出了新的和更高的要求。

同步发电机最基本的运行方式是正常运行，通常保持其迟相运行状态。随着电网输电容量增大和电压提高，电网充电功率增加，在负荷低谷网络电压过高时，利用发电机进相运行，能有效地抑制电压升高。技术进步和经济的发展，促使轧钢、铁道电气化等单相电力负荷激增。负荷不平衡和发生不对称短路时，各型发电机承受负序电流的实际能力及其失磁时具备的异步运行能力、特点、运行技术等问题，都需要进一步地认识、掌握并广为运用。

充分有效地应用发电机运行技术，完善调度、操作，使发电机和电网能在技术和经济最合理的状态安全运行，可以获得最好的经济效益和社会效益。

为此电力部对同步发电机运行技术下达了科研课题。推动和促进了国内电网在同步发电机正常运行、进相运行、失磁异步运行与不对称运行的方式与性能等方面，作了大量富有成效的研究工作并已应用于电力生产。

为适应电网运行的需要，我们曾多次举办“同步发电机运行技术”研讨班，总结现场工作实践，介绍和运用专业有关最新科研成果。由此引起了专业人员的兴趣和关注，并希望有一本全面系统地集中论述同步发电机运行技术理论与实践的实用书籍。应此需求和促进，我们写作出本书。书中列有不少实践数据、图表，有助于理解同步发电机运行理论，了解各种运行性能并掌握其运行技术。

本书第一章第一节～第五节、第二章由重庆电业局中心试验所巩北宁编著，第一章中第六节、第三章、第四章由四川电力试验研究院周德贵编著，全书由周德贵统稿。

本书在写作过程中曾得到高级工程师张国权等同行的支持和帮助，原水利电力部生产司周庆昌总工程师对全书进行了审阅，并提出了许多宝贵意见。在此我们表示衷心的感谢。

我们殷切期望读者的指正和帮助，以期获得改进和提高。

编著者

1995年4月

目 录

前 言

第一章 同步发电机正常运行	1
第一节 发电机正常运行状态分析	1
第二节 发电机正常运行时的功率调节与稳定	11
第三节 发电机正常运行时的损耗、发热和冷却方式	24
第四节 发电机正常运行时的温度分布	40
第五节 发电机正常运行时的出力限额	58
第六节 发电机正常运行时转子绕组的残余变形	66
第二章 同步发电机进相运行	77
第一节 发电机进相运行的必要性	77
第二节 同步电机进相运行状态分析与运行特点	83
第三节 发电机运行容量图与进相限额	97
第四节 发电机进相运行实践与分析	108
第三章 同步发电机失磁异步运行	112
第一节 发电机失磁后的机电暂态过程	113
第二节 发电机的异步转矩与再同步过程	120
第三节 发电机失磁异步运行的特点	129
第四节 发电机失磁异步运行实践与分析	139
第四章 同步发电机不对称运行	152
第一节 发电机三相不对称运行状态分析	152
第二节 发电机三相不对称运行时负序电流计算	166
第三节 负序电流对发电机和电力系统的危害	174
第四节 发电机的负序能力及其确定因素	183
第五节 发电机不对称运行实践与分析	189
第六节 不对称运行时转子部件的涡流与温度分布	206
第七节 提高发电机负序能力的措施与效果	215
附录一 国产及部分进口汽轮发电机的主要参数	223
附录二 同步发电机的参数(参考值)	226
参考文献	229

第一章 同步发电机正常运行

同步发电机最基本的工作方式是正常运行。正常运行是指发电机按照制造厂规定的技术条件和铭牌数据,以及在这些条件和数据允许变化范围内的运行方式。此时,发电机处于同步转速、三相电气量对称的稳定运行状态。当发电机按照制造厂铭牌规定数据运行时,即为额定运行方式。此方式是同步发电机带三相对称感性负荷保证长期连续运行的最大值。此时,发电机转矩稳定、损耗小、效率高,充分有效地利用了发电设备的能力,从而获得最大的经济效益,发电机的寿命也可以达到预期的使用年限,因而在技术上和经济上是最有利的,所以现场运行、调度部门都力求安排并保持发电机能在额定工况运行。

本章针对同步发电机开机至带三相对称感性负荷稳定运行这一电力生产过程,简要介绍其电磁关系、电势相量图、电磁功率与功角特性;讲述发电机有功功率和无功功率的调节、运行中的稳定性、损耗与发热、冷却与温升;说明发电机主要部件运行温度分布规律的实测研究结果及其出力限额的确定方法等,这是发电机运行技术的基本问题。

第一节 发电机正常运行状态分析

一、电磁关系与电势相量图

本章是分析三相同步发电机的三相同步稳定运行状态,转子若有阻尼绕组此时也不会发生影响,故可以不考虑它的存在。下面简要分析其定子绕组与转子励磁绕组间的电磁关系。

(一) 空载运行时的电磁关系

1. 励磁电流建立的空载磁场

发电机运行值班员执行开机操作后,待发电机的转速接近或达到额定值时加励磁,转子励磁绕组内即通入直流电流,在电机中产生励磁磁势并建立磁场。根据其磁通的路径和作用性质,穿过定、转子之间的气隙与定子绕组和转子绕组同时相链的磁通称为主磁通或励磁磁通,它是发电机空载运行时气隙中唯一的磁通;仅与励磁绕组本身相链的磁通称为励磁绕组漏磁通。发电机励磁电流建立的空载磁场与其磁路如图 1-1 所示。

由于励磁磁场随着转子被原动机驱动旋转而成为一个旋转磁场,其主磁通切割静止的定子绕组(导体),故在定子绕组中感应电势。因为设计制造发电机时采取了一系列旨在改善电势正弦波形的措施,如改善凸极电机转子磁极极靴的外形;改善隐极电机励磁绕组的分布;定子绕组采用短矩、分布绕组或分数槽绕组;改进槽口、槽楔等,尽量在结构上做到使磁通密度沿气隙圆周空间接近正弦规律分布,因此定子导体的感应电势是随时间按正弦规律变化的交变电势。其瞬时值 $e = Blv = B_m l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t$ 。式中: B_m 为切割定子导

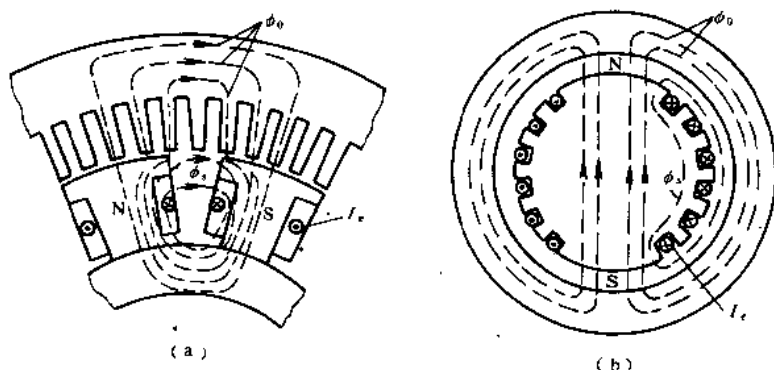


图 1-1 发电机励磁电流建立的空载磁场与其磁路

(a) 凸极发电机；(b) 隐极发电机

I_f —励磁电流； ϕ_0 —主磁通； ϕ_l —漏磁通

体的磁通密度最大值，空载时其数值仅由转子励磁磁势（电流）决定； l 为被磁力线切割的定子导体有效长度； v 为磁力线切割定子导体的相对线速度； ω 为旋转角速度， $\omega=2\pi f$ ， f 为电势的频率； E_m 为感应电势最大值。

由于定子三相绕组在定子铁芯内圆按相序规律对称排列分布，故按此相序先后被转子励磁磁场的磁力线切割，由此便确定了定子绕组三相电势的相位。又由于同步发电机定子绕组三相出线联接成星形，且能满足发电机在空载额定状态时，其线电压波形的正弦性畸变率不超过 5%^①，即获得电压波形近似正弦波（含有高次谐波，但为分析简便，下面若无特别说明则均指基波分量）。

2. 空载（励磁）电势

发电机空载运行时，主磁通在定子绕组中感应的对称三相电势称为空载电势。空载电势与定子绕组结构及励磁电流有关，每相空载电势有效值为

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= 4.44NKf\Phi \\ f &= \frac{pn}{60} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 E_0 ——空载电势有效值，V；

N ——每相定子绕组串联的匝数；

K ——绕组系数，其数值决定于定子绕组结构；

f ——感应电势的频率，Hz；

p ——转子磁极对数；

n ——转子转数，r/min；

Φ ——每极的磁通量，其数值决定于励磁磁势，Wb。

汽轮发电机转子一般为一对磁极，转子旋转一周，定子绕组中感应电势的波形变化一

^① 国标 GB755-81《电机基本技术要求》规定：额定容量为 300kVA 以上为 5%。

周。转子有 p 对磁极其每分钟转速为 n 时, 感应电势每秒交变的次数即为频率 f (Hz)。我国电网的额定频率为 50Hz, 一对磁极的汽轮发电机, 要求额定转速达到 3000r/min。水轮发电机的转速低, 因此磁极对数相应增多。

同步发电机三相绕组出线一般都采用星形接线, 其出线端之间的空载电压有效值为

$$U_0 = \sqrt{3} E_0 \quad (1-2)$$

由此可见, 同步发电机的空载电压值, 决定于定子绕组的匝数 N 、绕组系数 K 、转速 n 和励磁电流产生的主磁通 ϕ 。对运行中的发电机, 其 N 和 K 已成定值, 开机后保持额定转速, 调节励磁电流即可改变定子电压值。

(二) 正常运行时的电磁关系

1. 定子电流建立的电枢磁场

发电机带三相对称负荷后, 定子绕组内便流过三相对称的交流电流, 同时建立电枢、磁势。该磁势产生的磁通大部分经过气隙进入转子磁路, 故同时与定子绕组和转子绕组相链, 称为气隙磁通, 显然, 其磁路与转子励磁磁通的路径相同; 另一小部分只与定子绕组相链而不进入转子磁路, 称为定子漏磁通。定子电流建立的电枢磁场及其磁路如图 1-2 所示。

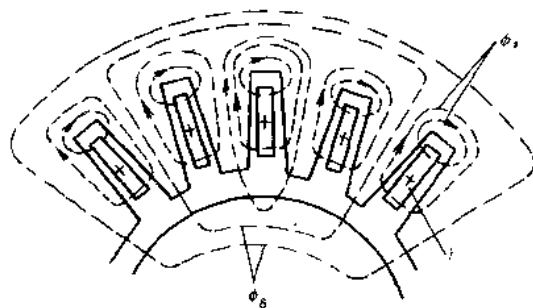


图 1-2 定子电流建立的电枢磁场及其磁路

i —定子电流; $+$ —电流方向;

ϕ_g —气隙磁通; ϕ_s —漏磁通

定子电流是随时间按正弦规律变化的 50Hz 交流电流, 它在定子绕组中产生的磁势沿气隙圆周的分布与绕组各线圈在空间的位置有关, 且是以电流的频率随时间按正弦规律变化, 其振幅始终位于相绕组的中心线上。这种空间位置而定不动, 但其波幅的大小和正负却随时间而变化的磁势称为脉振磁势。对于汽轮发电机常规的定子绕组结构, 其单相脉振磁势的振幅值为

$$F_m = 0.9 \frac{IN}{p} K \quad (1-3)$$

式中 I ——相电流有效值;

其它符号含义同前。

定子三相电流产生的电枢、磁势是三个单相绕组脉振磁势的合成。当定子绕组流过三相对称的交流电流时, 由于定子三相绕组的三条轴线在空间彼此相差 120° 电角度, 三相负荷电流在时间相位上也彼此相差 120° 电角度, 因此, 三个单相脉振磁势的合成磁势是一个沿空间正弦分布、幅值恒定的旋转磁势。其波幅位于电流最大一相的轴线上, 数值为单相磁势幅值的 1.5 倍, 即三相旋转磁势的幅值为

$$F_{am} = 1.5 F_m = 1.35 \frac{IN}{p} K \quad (1-4)$$

可见, 其值也与该机定子绕组的匝数 N 、绕组系数 K 和极对数 p 值有关。对于运行中的发电机, 则仅决定于带负荷的轻重, 即定子电流值。磁势基波旋转的方向与定子三相电流的相序相同, 是沿着超前电流的相绕组轴线转向滞后电流的相绕组轴线, 即相序为 $A-B-C-A$,

而其旋转速度则决定于定子电流的频率。由于设计电机时将定子绕组的极对数与转子磁极的极对数相等,因此电枢的转速与励磁磁势的转速(即发电机转子的转速)一定相等,故为同步转速。

2. 电枢反应

由上述可知,发电机空载运行时,气隙中仅有转子励磁电流建立的励磁磁场。而发电机带三相对称负荷后,情况就不同了,此时定子三相对称交流电流产生了电枢磁势。电枢磁势和励磁磁势的转速、转向均相同,故彼此在空间始终保持相对静止的关系。因此,它们相互作用,共同建立起发电机带对称负荷运行时的气隙磁势,并产生气隙磁场。此时尽管励磁电流不变,其气隙磁场也不同于该电机空载运行时的气隙磁场。通常将电枢磁势的基波对励磁磁势基波的影响称为电枢反应。电枢反应作用的效果,取决于电枢磁势与励磁磁势基波在空间的相对位置,这决定于负荷电流的性质和大小。发电机在功率因数滞后(带感性负荷运行)时,电枢反应起去磁作用;在功率因数超前(带容性负荷运行)时,电枢反应起助磁作用,故发电机带负荷后定子绕组的感应电势与空载时不同,因而使机端电压有所改变。

(三) 电势平衡方程式

以上说明了发电机在三相对称稳定运行时气隙中的合成磁势与磁场。发电机带负荷时的运行过程完全由该合成磁场确定,其强弱和分布发生变化,则影响它在定子绕组的感应电势。下面以发电机在迟相对称稳定运行时的电势平衡关系,来说明发电机带负荷后机端电压的变化。分析时不计发电机铁芯饱和,因此可以利用叠加原理,认为各磁势分别作用而产生磁通,并各自在定子绕组感生电势。

1. 凸极发电机的电势方程式

凸极同步发电机的气隙是不均匀的,一般极弧下最大气隙与最小气隙之比为 $1.5 \sim 2.0$,极靴宽度与极距之比为 $0.7 \sim 0.75$ 。因此,同一电枢磁势作用在不同位置时,对励磁磁场的影响就不一样(即电枢反应不一样),故必须予以分别考虑。下面按转子结构规定两个方向:将磁极轴线的方向(也是励磁绕组的纵轴方向)定为 d 轴,又称纵轴或直轴、极轴;将极间中心线的方向(也是励磁绕组的横轴方向)定为 q 轴,又称横轴或交轴、极间轴。 q 轴的正方向沿转子旋转方向超前 d 轴正方向 90° 的电角度。这样负荷电流和电枢磁势可分解为纵轴和横轴分量来讨论,然后再把纵轴和横轴电枢反应叠加起来,这就是通常称的凸极发电机双反应原理。

定子三相电流产生的漏磁通也对端电压产生影响。定子漏磁通按其路径分为两部分:横穿定于槽的称为槽漏磁通;仅与定子绕组端部交链的称为端部漏磁通。由于漏磁通与转子位置无关,故不须按 d 、 q 轴分别考虑。

凸极发电机迟相运行时的任一瞬间,各磁势单独作用时,在定子每一相绕组中产生的磁通及其感应的电势如下。

(1) 由转子励磁电流 I_f 建立的励磁磁势 F_f ①,产生主磁通 Φ 及其感应的空载电势

① 绕组磁势的基波是沿气隙空间按正弦规律分布的,以空间矢量表示,量的符号用黑体。电势、电流等是随时间按正弦规律变化的量,以相量表示,其量的符号上加“ $\cdot$ ”。

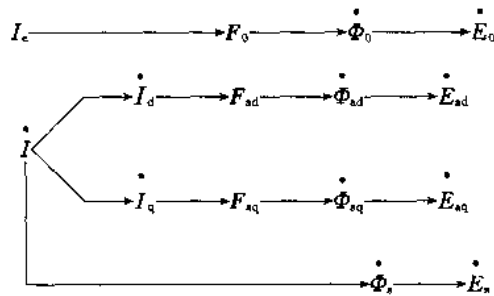
$\dot{E}_0$ 。

(2) 定子三相电流的纵轴分量 $\dot{I}_d$ (即 $\dot{I}_{dA}$ 、 $\dot{I}_{dB}$ 、 $\dot{I}_{dC}$ 的合成量) 建立的纵轴电枢磁势 F_{ad} , 产生纵轴电枢反应磁通 $\dot{\Phi}_{ad}$ 及其感应的纵轴电枢反应电势 $\dot{E}_{ad}$ 。

(3) 定子三相电流的横轴分量 $\dot{I}_q$ (即 $\dot{I}_{qA}$ 、 $\dot{I}_{qB}$ 、 $\dot{I}_{qC}$ 的合成量) 建立的横轴电枢磁势 F_{aq} , 产生横轴电枢反应磁通 $\dot{\Phi}_{aq}$ 及其感应的横轴电枢反应电势 $\dot{E}_{aq}$ 。

(4) 定子漏磁通 $\dot{\Phi}_s$ 在定子一相绕组感应的漏电势 $\dot{E}_s$ 。

由此可将各关系示意如下



规定各电势的正方向与相电流的相同, 根据电路定律, 这些电势的总和减去定子相绕组的电阻压降 $\dot{I} R_s$, 即为发电机定子相电压 $\dot{U}$ 。其关系式为

$$(\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_s) - \dot{I} R_s = \dot{U}$$

或写为

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I} R_s \quad (1-5)$$

式 (1-5) 为凸极发电机迟相对称稳定运行时, 定子绕组一相的电势方程式。

发电机的各部分磁通, 由于各自的磁路与磁阻不同, 对应的电抗值也不同。对应纵轴和横轴电枢反应磁通的是纵轴电枢反应电抗 X_{ad} 和横轴电枢反应电抗 X_{aq} , 对应漏磁通的是漏电抗 X_s 。电流在电抗上的压降与同一部分磁通在绕组感应电势的关系为

$$\dot{E}_{ad} = -j \dot{I}_d X_{ad} \quad (1-6)$$

$$\dot{E}_{aq} = -j \dot{I}_q X_{aq} \quad (1-7)$$

$$\dot{E}_s = -j \dot{I} X_s \quad (1-8)$$

由此, 式 (1-5) 也可写为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_s + j \dot{I}_d X_{ad} + j \dot{I}_q X_{aq} + j \dot{I} X_s \quad (1-9)$$

如果把漏抗压降也分为纵轴和横轴两个分量, 则上式可写为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_s + j \dot{I}_d (X_{ad} + X_s) + j \dot{I}_q (X_{aq} + X_s) \quad (1-10)$$

或写为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + \dot{I}_d X_d + \dot{I}_q X_q \quad (1-11)$$

式中: X_d 称为凸极发电机的纵轴同步电抗, $X_d = X_{ad} + X_s$; X_q 称为凸极发电机的横轴同步电抗, $X_q = X_{aq} + X_s$ 。因 $X_{ad} > X_{aq}$, 所以 $X_d > X_q$ 。 X_d 与 X_q 之比反映了凸极同步发电机气隙不均匀的特征。其值大小反映了电枢磁场分别在纵轴和横轴方向上对定子相电势影响的大小。

2. 隐极发电机的电势方程式

隐极发电机的转子为圆形, 认为气隙大致均匀, 磁路磁阻随着转子位置不同而发生的变化较小, 不必将电枢反应视为两个分量, 故其电势方程式为

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I} R_a \quad (1-12)$$

在纵轴和横轴方向上, $X_{ad} \approx X_{aq} = X_s$ 称为电枢反应电抗。电枢反应电势 $\dot{E}_a = -\dot{I} X_a$, 因此, 式 (1-12) 可写为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + \dot{I} X_a + \dot{I} X_s \quad (1-13)$$

或写为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + \dot{I} X_d \quad (1-14)$$

式中: $X_d = X_a + X_s \approx X_q$, 称为隐极发电机的同步电抗, 通常只用 X_d 表示。其值大小反映了三相对称定子电流建立的电枢磁场对定子相电势影响的大小。

式 (1-14) 即为隐极发电机对称稳定运行中, 定子绕组一相的电势平衡方程式。

在大型发电机中, 定子绕组的电阻值较同步电抗值小到可以忽略不计, 其定子绕组电阻压降小于定子端电压的 1%; 在中型发电机中也只有端电压的 1%~2%。因此, 在实用中可将上述方程式简化。

对于凸极发电机, 式 (1-11) 可简化为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}_d X_d + \dot{I}_q X_q \quad (1-15)$$

对于隐极发电机, 式 (1-14) 可简化为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} X_d \quad (1-16)$$

电势平衡方程式 (1-15)、式 (1-16), 表明了发电机与所联接电力系统的关系, 是分析发电机运行问题的基本公式。

(四) 电势相量图

上面分析并导出了凸极和隐极同步发电机带三相对称感性负荷同步稳定运行时的电势平衡方程式, 据此作出的相量图能直观地表达各电气量的大小和相位关系, 可看出电枢反应对定子电压产生影响的结果。

凸极同步发电机带对称感性负荷稳定运行时, 不计铁芯饱和影响的电势相量图, 如图 1-3 所示。图中 (a)、(b)、(c) 分别与方程式 (1-9)、式 (1-11)、式 (1-15) 相对应。 φ 角为功率因数角, 它决定于负荷阻抗, 反映了负荷的性质; ψ 角称内功率因数角, 由发电机所

带负荷大小和性质决定,同时还与发电机定子绕组的阻抗有关,图中 $0^\circ < \psi < 90^\circ$; δ 角称为功角; δ_1 角为 $\dot{E}_0$ 与 $\dot{E}_s$ 间的夹角, $\dot{E}_0$ 为气隙电势; $\dot{\Phi}_s$ 为电枢反应磁通。

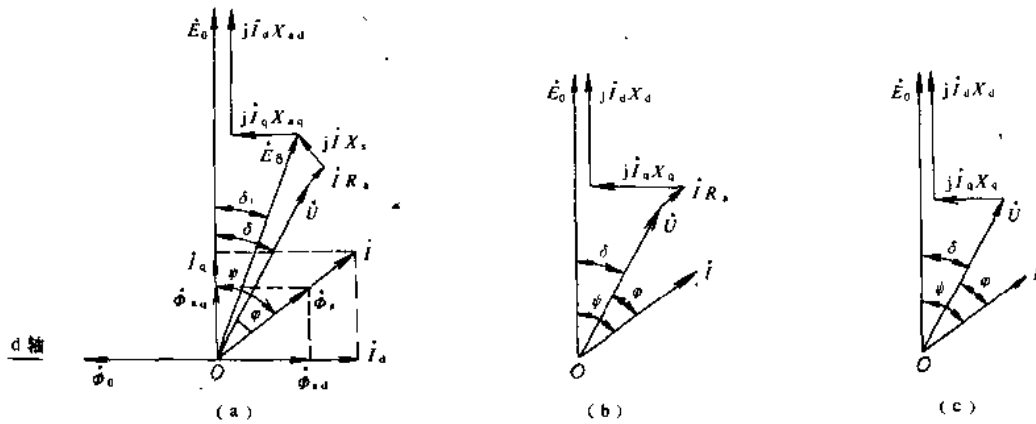


图 1-3 凸极同步发电机电势相量图 ($\varphi > 0$)

隐极同步发电机带对称感性负荷运行时,不计及铁芯饱和影响的电势相量图,见图 1-4。其中图 (a)、(b) 和 (c) 分别与式 (1-13)、式 (1-14)、(1-16) 相对应。

在图 1-4 (a) 中,励磁磁通 $\dot{\Phi}_0$ 和电枢反应磁通 $\dot{\Phi}_s$ 的相量和,即为带负荷运行时实际存在的气隙磁通 $\dot{\Phi}_s$ (即 $\dot{\Phi}_s = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_s$)。显然,其幅值大小和分布都较空载时的主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 发生了变化, $\dot{E}_s$ 即为此气隙磁通感应的电势。再考虑定子绕组的电阻和漏抗,则气隙电势 $\dot{E}_s$ 与漏电势 $\dot{E}_s$ 的相量和,就可以视为定子绕组内实际存在的相电势,再减去定子电流在一相绕组上的电阻压降,即为发电机定子的相电压 $\dot{U}$ 。显然,它比空载电势 $\dot{E}_0$ 不仅数值上降低,相位也发生了变化。

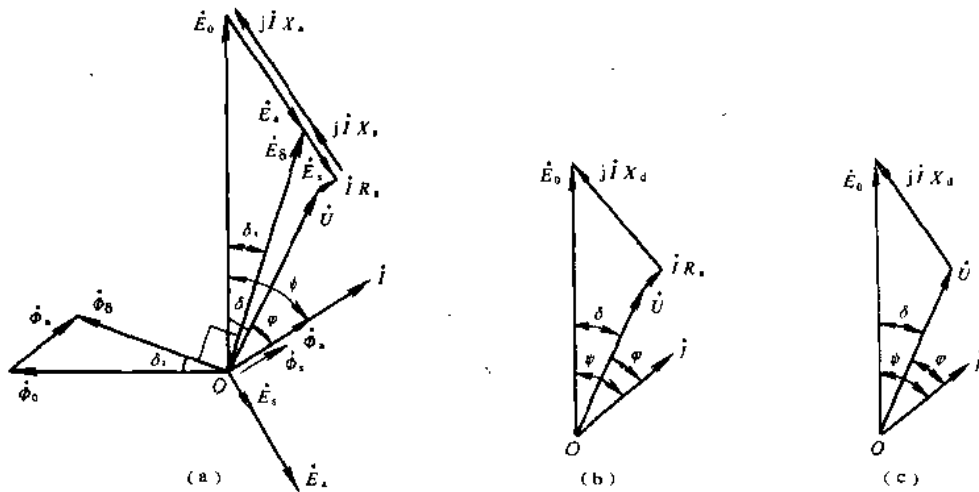


图 1-4 隐极同步发电机电势相量图 ($\varphi > 0$)

图 1-3 (c)、图 1-4 (c) 示出凸极和隐极发电机的简化电势相量图，在理论分析中经常使用，是分析发电机对称稳定运行的基本相量图。同步电抗是发电机的特征参数，对于不同型式的发电机，其数值不同，该数值影响发电机端电压随负荷波动的程度。而运行中的发电机端电压随负荷变化的程度，则取决于负荷电流的大小和性质（即功率因数 $\cos\varphi$ 值）。

上述分析说明了发电机带负荷运行时，要维持端电压稳定，必须随负荷变化调节励磁电流，以调节励磁磁势和磁通，克服电枢反应随着定子电流变化而发生的改变，以及由此造成的气隙磁场大小和分布的变化，从而保持气隙磁通与它所决定的感应电势和端电压的稳定。

需指出，同步发电机在额定电压下运行时，多数情况下磁路已处于接近饱和的状态。因此，在设计计算和对电机运行进行定量分析计算时，需考虑饱和的影响。

二、电磁功率与功角特性

对于运行中的发电机，转轴上输入的原动机的机械功率，是通过电磁感应从转子传递到定子而转变为电功率供给负荷的。发电机能够稳定输出电功率的能力与本身的参数和电磁量的关系，可用功角特性来表述。

（一）功率、转矩的平衡关系

发电机空载运行时，输入的机械功率 P_1 完全消耗于空载损耗 P_0 ，此时 $P_1 = P_0$ 。发电机带三相对称负荷时，需增加输入功率 P_1 ，其中少部分消耗于空载损耗 P_0 ，剩余功率从转于方面经气隙合成磁场传递到定子上的，称为电磁功率 P_e 。至于其励磁损耗还与励磁系统的形式有关，若带同轴励磁机运行， P_1 中还要扣除输入同轴励磁机的功率（如果用单独的励磁系统励磁则励磁损耗与 P_1 无关）。再除去负荷电流在定子绕组的铜损耗 P_c ，余下的为该机输出的有功功率 P ，即发电机带负荷稳定运行时的功率平衡关系为

$$P_1 - P_0 = P_e = P + P_c \quad (1-17)$$

这是从能量角度来表述发电机转换机电能量的过程。

对于大、中容量的同步发电机，额定负荷时定子铜损所消耗的功率不到额定功率的 1%，因此电磁功率近似等于发电机输出的有功功率，故有

$$P_e \approx P = 3UI\cos\varphi \quad (1-18)$$

式中 U 、 I ——发电机相电压和相电流；

φ ——功率因数角。

各功率与转矩间存在 $P = \omega M$ 关系。式中： ω 为发电机转子的机械角速度， $\omega = 2\pi \frac{n_c}{60}$ ， n_c 为同步转速。在发电机轴上，对应于各功率，存在驱动转矩 M_1 ，损耗制动转矩 M_0 ，电磁制动转矩 M_e 。因此，发电机稳定运行时的转矩平衡关系为

$$M_1 = M_0 + M_e \quad (1-19)$$

式 (1-19) 表示了发电机与所联机械系统的关系。

（二）电磁功率的功角特性及其意义

由式 (1-18) 可知，忽略定子绕组铜损时该机输出的有功功率等于它的电磁功率。利用图 1-3 (a) 和 (c) 可导出凸极同步发电机电磁功率与功角的关系式如下

$$P_e = 3UI \cos \psi = 3I \cos(\psi - \delta) = 3UI(\cos \psi \cos \delta + \sin \psi \sin \delta) \quad (1-20)$$

$$\text{由于} \quad I_d = I \sin \psi, \quad U_d = U \cos \delta = E_0 - I_d X_d$$

$$I_q = I \cos \psi, \quad U_q = U \sin \delta = I_q X_q$$

$$\begin{aligned} \text{故} \quad P_e &= 3(U \cos \delta I_q + U \sin \delta I_d) \\ &= 3 \left(U \cos \delta \frac{U \sin \delta}{X_q} + U \sin \delta \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} \right) \\ &= 3 \left[\frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] \end{aligned}$$

用标么值表示，则上式为

$$P_e = \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta = P_{e1} + P_{e2} \quad (1-21)$$

式中： P_{e1} 称为基本电磁功率，它与励磁有关； P_{e2} 称为附加电磁功率，它与励磁无关，而与电网电压和纵、横轴同步电抗有关，即当转子无励磁时，只要 $U \neq 0$ ， $\delta \neq 0$ 就会产生 P_{e2} ，它完全是由于 d 、 q 轴方向磁阻不等所引起的，因此也称为磁阻功率或凸极功率，其幅值随 X_d 与 X_q 值之差增大而增加，与 P_{e2} 对应的转矩称为磁阻转矩或凸极转矩。

对于隐极发电机，因 $X_d \approx X_q$ ，此时 $P_{e2} \approx 0$ ，故有

$$P_e = \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta \quad (1-22)$$

由式(1-22)可见，电磁功率随 δ 角成正弦函数而变化。电磁功率随 δ 角而变化的关系称为功角特性或功率特性。此特性说明，在电网电压恒定并保持并网运行发电机的励磁电流恒定（即 E_0 、 U 为常数）时，电磁功率的大小只取决于功角 δ 值。同步电机的功角特性曲线如图1-5所示。

(1) 隐极电机的功角特性曲线如图1-5(a)所示。

1) 当 $0^\circ < \delta < 90^\circ$ 时，电磁功率 P_e 随 δ 角增大而增加；当 $90^\circ < \delta < 180^\circ$ 时，随着 δ 角增大， P_e 反而减小；当 $\delta = 90^\circ$ 时，电磁功率达到极限值 P_{em} ，其值为

$$P_{em} = \frac{E_0 U}{X_d} \quad (1-23)$$

2) 当 δ 角为正时， P_e 为正，表明同步电机供给电网有功功率而作发电机运行。反之，当 δ 角为负时， P_e 为负，则表明从电网吸收有功功率，该电机作电动机运行。

(2) 凸极同步电机作发电机运行时的功角特性曲线，如图1-5(b)所示。该特性除正弦波外，还有两倍于正弦波频率的二次谐波，它使凸极发电机在功角 $\delta < 90^\circ$ 时，即达到功率极限值。

同步发电机运行时功角 δ 的意义。

(1) δ 是时间相角。它表明了时间相位上感应电势 $\dot{E}_0$ 超前端电压 $\dot{U}$ 的角度，其值随该机带负荷的轻重和负荷性质的改变而不同（见图1-3，1-4）。

(2) δ 是空间夹角。因为电机的漏电抗和电阻很小，近似的可看成 $\delta = \delta_s$ [见图1-3(a)及

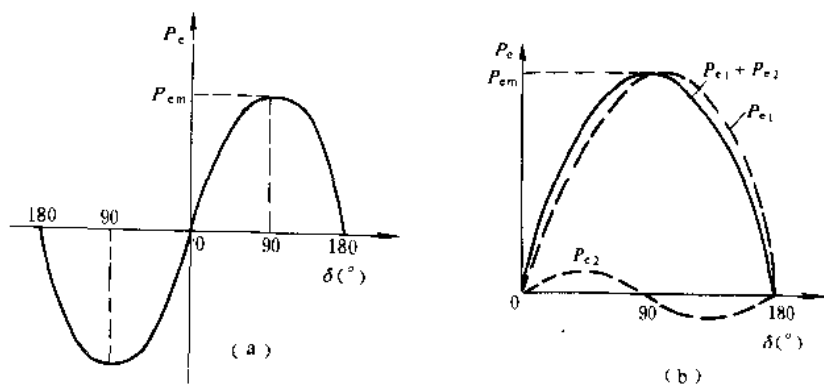


图 1-5 同步电机的功角特性曲线

(a) 隐极电机; (b) 凸极电机

P_{e1} —基本电磁功率; P_{e2} —附加电磁功率

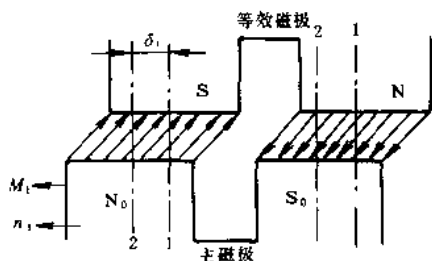


图 1-6 功角为空间角示意图

(发电机状态)

1—气隙合成磁场的等效磁极轴线;

2—转子磁极轴线;

S、N—定子等效磁极的南、北磁极;

S_0 、 N_0 —转子磁极的南、北磁极;

M_1 、 n_1 —转子轴驱动转矩与转速

(三) 无功功率与功角的关系

由上所述, 功角是反映发电机内部能量转换的一个重要参数。它的改变要引起有功功率的变化, 也要引起无功功率的改变。用类似有功功率的推导方法, 可获得发电机无功功率的功角特性。

(1) 凸极发电机。因无功功率 $Q = 3UI \sin \varphi$, 由图 1-3 (c) 可得^①

$$Q = \frac{3E_0 U}{X_d} \cos \delta - \frac{3U^2}{2} \times \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{3U^2}{2} \times \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta \quad (1-24)$$

① 推导在此从略。

(2) 隐极发电机。由于 $X_d \approx X_q$ ，于是上式变为

$$Q = \frac{3E_0 U}{X_d} \cos \delta - \frac{3U^2}{X_d}$$

采用标么值，则得隐极发电机输出无功功率与功角的关系式为

$$Q = \frac{E_0 U}{X_d} \cos \delta - \frac{U^2}{X_d} \quad (1-25)$$

由式 (1-25) 可见，对于运用中的隐极发电机，因 X_d 值已确定，当电网电压稳定，保持并网运行的隐极发电机励磁电流不变时， $Q=f(\delta)$ 为余弦函数。其曲线形状如图 1-7 所示。

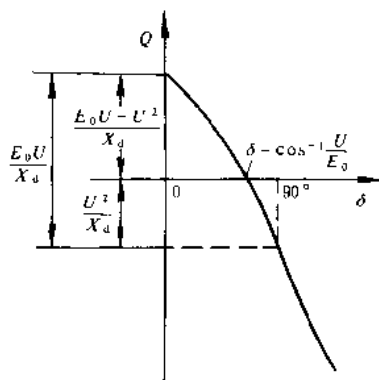


图 1-7 隐极发电机 $Q=f(\delta)$ 的关系曲线

第二节 发电机正常运行时的功率调节与稳定

一、有功功率的调节与静稳定

电能的发、输、用是一个同时实现的过程，因此，发电机输出的电能应随负荷的需要而调节，以保持电能与负荷平衡，维持电力正常生产。调度部门根据负荷的需要，按照电网经济运行的原则和系统稳定运行的要求，编制计划，分配各电厂的有功和无功功率。各电厂据此控制本厂发电机的有功和无功功率。

调节原动机输入的功率，就可以改变同步发电机的有功功率，达到加负荷和减负荷的目的。若原动机或负荷侧的参数受到微小的扰动，同步发电机也会自动调节和维持功率平衡，保持同步运行。下面说明发生这些情况时，对发电机内部产生什么影响和引起什么变化，即分析调节有功功率的物理过程和同步发电机的静稳定。

(一) 调节有功功率的物理过程

1. 电磁制动转矩

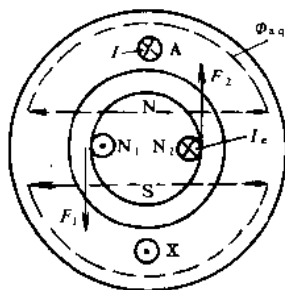


图 1-8 发电机电磁转矩作用方向示意图

如前所述，同步发电机对称稳定运行时，忽略定子绕组的铜损，发电机输出的有功功率则等于从转子传递到定子方面的电磁功率。与此对应的电磁转矩，对转子运动产生作用力矩的方向，用图 1-8 解析。假设图中转子沿顺时针方向旋转，当转子励磁绕组 N_1-N_2 中流过直流电流 I_c 时，建立起转子磁场的极性用 $N-S$ 表示，它在定子绕组 $A-X$ 中感应电势的方向，按右手定则判定，是由绕组 A 端进 X 出。发电机有功电流 I 的方向与定子绕组感应电势同相。有功电流产生横轴电枢反应磁通 Φ_{aq} 与励磁电流相互作用，产生电磁力 F_1 和 F_2 ，其方向按左手定则判定，如图所示。这一对力构成力

矩, 欲使转子沿反时针方向旋转, 因此成为阻止转子旋转的阻力矩, 称其为电磁制动转矩。显然, 有功功率愈大, 电磁转矩的制动作用愈大。

2. 增加有功功率的物理过程

现针对并入无限大电网的发电机进行分析。无限大电网指容量极大, 其电压、频率的波动在合格范围内而视为常数, 并不因本台机并网及其功率调节受到影响, 这对于具有灵敏的电压和频率自动调节装置的电力系统是符合实际情况的。这样可以只针对本台机的功率调节进行分析。当本台发电机欲增加有功功率时, 随着加负荷操作的完成, 该机内部发生的物理过程如下。

运行人员逐渐开大汽轮机的汽门增加进气量或开大水轮机的导水叶增加进水量时, 便增加了输入机组的机械功率 P_1 , 其转子轴上获得的驱动转矩 M_1 随之增大。

旋转物体转速的变化, 决定于作用在轴上的转矩平衡状况, 其运动方程式为

$$J\alpha = \Sigma M \quad (1-26)$$

式中 J ——旋转物体的转动惯量;

α ——角加速度;

ΣM ——作用于旋转物体的转矩总和。

由式 (1-19) 可得该发电机此时轴上转矩的总和为 $M_1 - (M_0 + M_e) = \Delta M$ 。由于驱动转矩 M_1 增大, 在发电机有功功率尚未增加的瞬间, 电磁制动转矩 M_e 未变, 转轴上的转矩平衡被破坏, 出现剩余转矩 $\Delta M > 0$, 于是产生角加速度, 促使转子加速 (相对于同步转速)。而气隙合成磁场的转速却受电网频率的牵制保持不变, 故超前的转子磁极轴线 (d 轴) 和主磁通 Φ_0 又向前移动 (图 1-6)。相应的电势 $\dot{E}_0$ 与端电压 $\dot{U}$ 之间的夹角 δ 增大, 引起电磁功率 P_e 和电磁转矩 M_e 也增加, 直到所产生的电磁转矩 (功率) 与输入转矩 (功率) 相平衡, 其剩余转矩 $\Delta M = 0$ 为止, 转子不再加速, 功角不再增加。此时发电机便在已增大的功角和电磁功率值稳定运行, 实现了有功功率增加, 即发电机已进入一个新的平衡稳定运行状态。

3. 用功角特性说明发电机有功功率的调节过程

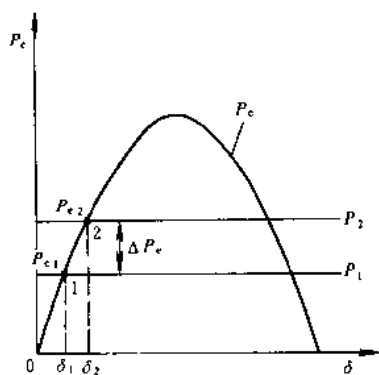


图 1-9 用功角特性曲线说明发电机有功功率的调节

上述调节有功功率的过程, 也可用功角特性曲线说明。

在实用运行分析中, 一般不考虑发电机转子为凸极或隐极的差异, 而用隐极发电机的特性说明 (见图 1-9), 其概念对凸极发电机也完全适用。

在图 1-9 中, P_1 为汽轮机汽门在某一开度值时输入到发电机的机械功率, 发电机输出的有功功率等于电磁功率 P_{e1} , 对应的功角为 δ_1 , 发电机的工作点在 1。若再缓慢增大汽门开度至某一数值, 便增加了进气量, 使输入功率增至 P_2 , 即增加了输入转矩。在发电机输出有功功率尚未改变的瞬间, 功率差 ΔP 对应的剩余