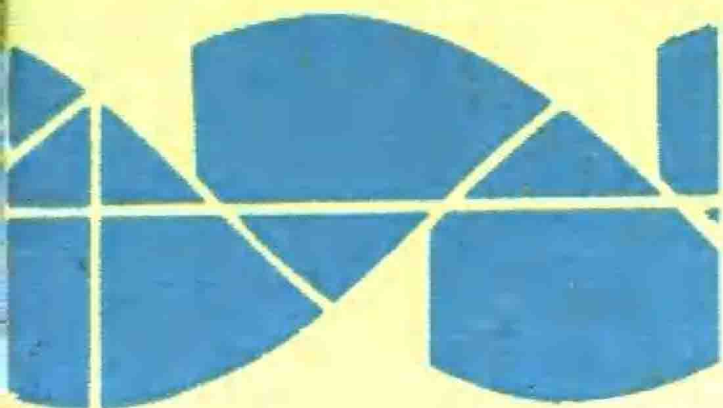


现代同步发电机 整流器励磁系统

李 基 成



水利电力出版社

内 容 提 要

本书集世界各国所发展应用的整流器励磁系统于一体,较全面地介绍了现代同步发电机各种整流器励磁系统的工作原理、线路特征、参数选择和计算、运行特性、发电机灭磁以及转子过电压保护等方面的内容,这些励磁系统包括他励静止二极管整流器励磁系统、无刷励磁系统、感应式高频发电机励磁系统、具有自励调压式交流励磁机励磁系统、他励可控硅整流器励磁系统、自并励励磁系统、交流侧并和串联自复励励磁系统、功率复励励磁系统等。对于具有正和负励磁电流的整流器励磁系统的特征也作了论述。

此外,本书还阐述了与励磁系统特性分析有关的发电机基本稳态与暂态特性、自动调节励磁系统的基本概念、励磁调节对电力系统稳定的影响以及整流器的各种换弧工作状态等内容。

为了力求理论与实际相结合,本书中还列入了大量计算实例以加深读者对励磁系统设计和应用的理解。

读者对象:发电厂设计、运行人员,从事与励磁系统研究、制造、应用有关的技术人员以及大专院校有关专业的师生。

现代同步发电机整流器励磁系统

李 基 成

*

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 21.75印张 490千字

1987年12月第一版 1987年12月北京第一次印刷

印数0001—5300册 定价7.00元

书号 15143·6452

序

随着电力系统的发展及单机容量的增大,五十年代以来,很多国家对同步发电机励磁系统的研究与改进,给予了很大的重视。

为了提高电力系统在大干扰后的稳定性,五十年代中期,有些国家在同步发电机中采用了高强励电压顶值倍数的快速励磁系统。苏联学者发展了快速离子励磁系统,并提出了多变量反馈的励磁控制概念,向所谓强力式励磁调节的方向发展,就是明显的例子。

正如实践所表明的,应用高强励顶值快速励磁控制系统对电力系统运行有一定的技术效果,但却易使发电机进入振荡型不稳定状态。由于这种系统所选用的一、二次微分环节的抗干扰能力较差,同时又没有一整套有效的设计方法使所引入的诸反馈量达到协调配合,从而使这种多变量反馈励磁控制方式的运用受到了限制。

为了解决这一问题,世界各国的许多科技工作者都进行了研究。在这方面,美国学者首先作出了积极的贡献。他们根据单机系统线性化传递函数的结构图,运用经典控制理论,设计了具有一个附加变量(发电机转速偏差)超前补偿的励磁控制器,并称之为电力系统稳定器(简称PSS)。经过一系列的研究和实践,现在这种电力系统稳定器已经获得了较多的应用,我国科技工作者在这种类型的励磁控制器方面也做了不少富有成效的工作。

现代控制理论及大系统理论的发展,以及测量与信号传输技术的进步,为采用全部或主要状态量或输出量以实现线性优化或次优化的励磁控制规律提供了新的可能。在同步发电机多变量优化励磁控制的研究方面,我国起步不晚。1978年清华大学电机系已在这方面取得了初步的研究成果,目前,已经进入了工业应用的阶段。

由于同步发电机和电力系统非线性因素的影响,以及运行方式和网络参数可能发生较大范围的变化,有必要进一步提高励磁系统的性能和改进励磁控制方式。看来,开展自适应励磁控制系统的研究,探索非线性励磁控制的新途径,已经是更加必要了。

技术进步的实践说明,发电机励磁控制系统的改进和革新,对现代化的电力系统的运行,具有十分重要的作用,并要求有比较全面而系统地介绍励磁及励磁控制系统的专著。《现代同步发电机整流器励磁系统》一书的问世,在一定程度上弥补满足了这方面的要求。

对本书有以下几点值得提出:

- 一、比较系统地介绍了各种励磁方式的原理、参数选择及运行特性,并且附有实例。全书重点突出、层次清楚,有助于读者对励磁系统的全面了解。
- 二、全书以论述整流器励磁系统为中心,并围绕这一中心,讨论了励磁系统对发电机运行稳定性等重要特性的影响,体现了现代励磁技术的前沿。
- 三、取材广泛。介绍了各种励磁系统,诸如无刷可控硅整流器励磁系统、美国通用电气公司的Alterrex系统和Genërex系统,以及依泰普电站的正、负励磁电流的励磁系

统等。

作者三十余年来从事大型水轮、汽轮发电机励磁系统的设计及研究工作，积累了大量实践经验。作者在撰写本专著的过程中，坚持了理论和实际结合的原则，突出了科学技术的新成就。全书论述比较全面，内容比较丰富。相信本书的出版将会对我国励磁系统的技术发展起到促进作用，并受到有关科技工作者的欢迎。

高景德

1986年12月23日于清华大学

前 言

随着电力系统的发展，对同步发电机励磁系统的运行性能，提出了更高的要求。

在五十年代初期，励磁系统的主要作用局限在维持发电机端电压恒定这一要求上，亦即励磁系统的作用除供给发电机必需的励磁功率外，只涉及到自动电压调节这一功能上。

其后，为了满足远距离输电的需要，使励磁调节作用由维持发电机端电压恒定扩展到改善电力系统动态和暂态稳定性这一要求上。

当代，随着电子计算技术、模拟和仿真计算技术的发展，使励磁系统的功能更有所改进与提高。现代同步发电机的励磁系统对改善发电机的运行性能，提高电力系统稳定性方面的重要作用，已经是公认的事实了。

但是，在另一方面感到不足的是，在国内外，比较完整、系统和全面地论述励磁系统的专著至今还很少见。目前，有关励磁系统的论文多散见于各种国际会议报告、专业杂志以及论文集中，而论述的内容多集中于某一系统的特征，使读者难以从这些繁多的文献中，比较完整系统地了解到有关励磁系统性能的全貌。

有鉴于此，多年来作者一直在探索与尝试，期望写作一本比较全面和系统地介绍当代为世界各国所发展和应用的各种励磁系统性能的专著，以补当今之不足。

此外，虽然在励磁系统中广泛地采用了电子计算技术以及现代控制理论的分析方法，但是考虑到对励磁系统接线方式的分析、参数的选择以及运行特性的探讨，仍是研究现代同步发电机的基础，为此本书在写作中即以此部分内容为重点。对于自动励磁调节部分，亦作了辅助性的说明。

不言而喻，写作这一专著的难度是极大的。首先必须对国内外繁多的有关文献取舍得当，集众家之说为一体，整理得顺理成章。同时，为了补其不足，言人之所不言，以避免雷同，其难度就更大了。

现在本书终于问世了，但是对作者来说，深感心有余而力不足。作者衷心期望广大读者给予指正与帮助，以期再版时有所改进。

本书在写作过程中，许多学术界先辈、同人给予了作者极大的鼓励与支持，对本书的定稿起了极大的推动作用。

清华大学黄眉教授，对书稿进行了审阅，提出了宝贵的意见；清华大学校长高景德教授，在百忙中为本书写了序言。这些，对一个才疏学浅的作者来说，是极为难得的。

在此，作者表示衷心的感谢。

李基成

1986年12月哈尔滨

目 录

序

前 言

第一章 同步发电机的基本特性	1
1.1 同步发电机的稳态特性	1
1.1.1 相量图	1
1.1.2 短路比	3
1.1.3 功率特性曲线	4
1.1.4 运行容量特性曲线	8
1.1.5 外接电抗对运行容量曲线的影响	10
1.1.6 励磁调节特性	12
1.2 同步发电机的暂态特性 ^[6]	16
1.2.1 暂态电抗 x_d'	16
1.2.2 暂态电势 E_d'	18
1.2.3 转子励磁回路的暂态方程式	20
1.2.4 三相短路时的暂态电势变化	21
1.2.5 励磁电压变化对暂态电势的影响	22
1.3 发电机静态稳定功率极限的推导	25
第二章 自动调节励磁系统的基本概念	30
2.1 励磁系统的发展	30
2.2 自动励磁调节 ^[1]	34
2.2.1 强力式励磁调节 ^[3]	34
2.2.2 电力系统稳定器 ^[4,5]	36
2.2.3 逻辑控制励磁	38
2.2.4 按大扰动和小偏差调节励磁 ^[7]	40
2.2.5 最优励磁控制 ^[8]	41
2.3 励磁系统的基本暂态性能 ^[9]	43
2.3.1 大信号扰动下励磁系统的暂态性能	43
2.3.2 小信号偏差下励磁系统的暂态性能	48
2.4 励磁电压响应比的计算	51
第三章 励磁调节对电力系统稳定的影响	55
3.1 稳定性的分类和定义	55
3.2 励磁调节对电力系统稳定的影响 ^[15]	56
3.2.1 励磁调节对静态稳定的影响	56
3.2.2 励磁调节对动态稳定的影响 ^[15]	57

3.2.3 励磁调节对暂态稳定的影响	58
3.3 快速励磁改善暂态稳定效果的对比	59
第四章 三相桥式整流线路的基本特性	69
4.1 整流器外特性 ^[18]	69
4.1.1 整流器第I种换弧状态	69
4.1.2 整流器第II种换弧状态	72
4.1.3 整流器第III种换弧状态	74
4.2 三相半控桥式整流线路	77
4.2.1 控制角 α 与换弧角 γ 的关系式	79
4.2.2 空载整流电压	80
4.2.3 换弧电压降	80
4.3 三相全控桥式整流线路	82
4.3.1 纯电阻负载	82
4.3.2 电感负载	83
4.3.3 三相全控桥式整流线路的逆变	85
4.4 三相高、低压桥式整流线路	87
4.5 换弧角 γ 与负载电阻 r_f 及换弧电抗 x_γ 的关系式	90
4.6 整流变压比 β_u 和变流比 β_i	91
4.7 功率因数	93
4.8 反向电压	95
第五章 他励静止二极管整流器励磁系统	96
5.1 交流电流的谐波分析	96
5.2 等效换弧电抗及非畸变正弦电势	98
5.2.1 问题的提出	98
5.2.2 用简化法确定等效换弧电抗及非畸变正弦电势	99
5.3 具有整流负载的交流励磁机稳态计算	100
5.4 励磁机通用外特性	103
5.5 具有整流负载的交流励磁机暂态过程	105
5.6 具有整流负载的交流励磁机暂态简化数学模型	106
5.6.1 利用整流器外特性简化计算法	107
5.6.2 利用励磁机外特性简化计算法	107
5.7 发电机励磁电流按小偏差变化时的励磁机暂态过程	109
5.8 二极管整流器对发电机励磁回路时间常数的影响	112
5.9 供电给二极管整流器的交流励磁机励磁电压响应	113
5.9.1 交流励磁机空载时的励磁电压响应	114
5.9.2 交流励磁机负载时的励磁电压响应	114
5.9.3 发电机三相短路时的励磁电压响应	116
5.10 交流励磁机二极管励磁系统的安-秒特性计算	117

5.10.1 整流器直流侧突然短路 ^[6.41]	117
5.10.2 发电机端突然三相短路时暂态转子电流自由分量的确定	122
5.11 交流励磁机额定参数的计算	123
5.11.1 非畸变正弦电势 E_x 以及额定功率 P_N 的确定	123
5.11.2 交流励磁机额定参数确定	124
第六章 无刷励磁系统	126
6.1 概述	126
6.1.1 交流励磁机和整流发电机	126
6.1.2 无刷励磁系统的测量及检测	129
6.1.3 无刷励磁系统典型接线	130
6.2 稳态小偏差时无刷励磁系统快速性的提高	134
6.3 暂态大扰动时无刷励磁系统快速性的提高	136
6.3.1 串联附加电阻	136
6.3.2 提高励磁机励磁绕组的强励电压	136
6.3.3 两种措施的对比	137
6.4 无刷励磁系统的模型 ^[22]	138
6.4.1 励磁系统模型的发展	138
6.4.2 饱和系数的确定	138
6.5 1型模型	141
6.5.1 1型模型的方框图	141
6.5.2 1型模型的推导	141
6.5.3 小信号条件下的交流励磁机模型的线性化	143
6.6 AC-1模型	144
6.7 AC-2模型	150
第七章 感应式高频发电机励磁系统^[18]	153
7.1 高频发电机励磁系统概述	153
7.2 感应发电机	156
7.2.1 作用原理	156
7.2.2 感应发电机的参数	159
7.3 高频励磁系统的稳态计算	160
7.4 高频励磁系统的暂态特性	162
7.5 高频励磁系统的运行特性	165
第八章 具有自励调压式交流励磁机的他励静止二极管整流器励磁系统^[23]	168
8.1 自励调压式励磁系统的特征	168
8.2 稳态基本特性	169
8.3 暂态基本特性	172
8.4 二机励磁系统的运行特性	175
8.4.1 交流励磁机空载运行	175

8.4.2	交流励磁机负载运行	176
8.4.3	发电机空载运行	176
8.4.4	发电机负载运行	177
8.4.5	发电机异常运行	177
8.5	二机励磁系统的空载稳定性	180
8.5.1	等效方框图及特征方程式的确定	180
8.5.2	系统动态品质	185
8.5.3	微分负反馈校正环节参数的确定	186
8.6	二机励磁系统的静态误差	189
第九章	他励可控硅整流器励磁系统^[3]	191
9.1	概述	191
9.2	他励可控硅励磁系统的特征	191
9.2.1	水轮发电机 ^[25, 42]	191
9.2.2	汽轮发电机 ^[26]	193
9.3	谐波电流负载对辅助发电机电磁特性的影响 ^[33]	196
9.3.1	谐波电流磁势	196
9.3.2	谐波磁势对无阻尼绕组发电机电压波形的影响	198
9.3.3	谐波磁势对有阻尼绕组发电机电压波形的影响	199
9.3.4	阻尼绕组的损耗及容许值	200
9.3.5	定子绕组及铁芯的损耗	201
9.3.6	电枢反应和功率因数	202
9.4	他励可控硅励磁系统主要参数计算	203
9.4.1	辅助发电机	203
9.4.2	不同运行情况下的可控硅整流器控制角计算	204
9.4.3	均流电抗器	205
9.5	具有高、低压桥式整流线路的他励可控硅励磁系统 主要参数计算 ^[42]	206
9.6	他励可控硅励磁系统的瞬变过程	210
第十章	自励可控硅励磁系统	214
10.1	自励可控硅励磁系统的特征	214
10.1.1	概述	214
10.1.2	自励可控硅励磁系统的功率电源	215
10.1.3	自励可控硅励磁系统性能对继电保护特性的影响	216
10.1.4	发电机接线方式对自励可控硅励磁系统性能的影响	216
10.1.5	自励可控硅励磁系统的稳定工作点	217
10.2	自励可控硅励磁系统的参数计算	218
10.2.1	自励可控硅励磁系统的正常参数 ^[27, 28, 43]	218
10.2.2	自励条件的确定	219
10.2.3	三相短路时的自励系统暂态特性	220

10.3 自励可控硅励磁系统的逆变灭磁	227
第十一章 交流侧并联的相补偿式自复励整流器励磁系统	229
11.1 并联式相补偿自复励励磁系统	229
11.1.1 相补偿式励磁系统的基本接线	229
11.1.2 交流侧并联的相补偿式励磁系统特性分析 ^[19]	229
11.1.3 非线性因素对相补偿励磁系统特性的影响	231
11.1.4 相补偿励磁系统的校正	232
11.2 自复励励磁系统的模型	234
11.2.1 概述	234
11.2.2 同步发电机方框图	235
11.2.3 发电机电力系统方框图	236
11.2.4 励磁系统方框图	237
11.2.5 励磁调节回路方框图	238
11.2.6 励磁装置与励磁系统回路的结合点	238
11.2.7 不同换弧状态的整流变换系数	239
11.3 并联式自复励交流发电机的短路电流计算	243
11.3.1 空载及短路时自复励交流发电机的短路电流计算	243
11.3.2 功率变流器的励磁电抗	245
11.3.3 等效发电机的时间常数	245
11.3.4 自复励发电机的空载短路电流计算 ^[41]	246
11.3.5 自复励发电机的负载短路电流计算	246
11.4 Generrex型自复励励磁系统 ^[33,34]	249
11.4.1 概述	249
11.4.2 励磁装置的结构特征	250
11.4.3 分路可控硅整流器的控制特性	251
第十二章 交流侧串联的相补偿式自复励可控硅整流器励磁系统	254
12.1 串联式相补偿自复励励磁系统 ^[29,30,31,32]	254
12.2 按相量图确定交流侧串联的自复励励磁系统参数	255
12.2.1 等效励磁绕组交流电阻	256
12.2.2 功率变压器的参数	257
12.2.3 电流-电压变换器的参数	258
12.3 按临界强励电压倍数确定串联式自复励励磁系统的参数	258
12.3.1 确定临界强励电压倍数	258
12.3.2 功率变压器和电流-电压变换器参数的确定	259
12.3.3 确定最佳换弧角	261
12.4 按图解法确定串联式自复励励磁系统的参数	264
12.5 三相短路时串联式自复励励磁系统的瞬变过程	267
12.6 串联式自复励励磁系统在不对称短路条件下的特征	272
12.7 电流-电压变换器的结构特征及特性分析	275

12.7.1	电流-电压变换器的特性	275
12.7.2	电流-电压变换器的结构	275
12.7.3	电流-电压变换器的基本关系式	276
第十三章	功率复励整流器励磁系统	281
13.1	原理概述	281
13.2	直流侧并联的自复励励磁系统的运行方式	281
13.3	功率变流器的工作特征	282
13.3.1	功率变流器的工作特征	282
13.3.2	功率变流器的稳态特性分析 ^[18]	285
13.3.3	功率变流器的暂态过程分析	288
13.4	直流侧并联的自复励励磁系统参数选择	290
13.5	直流侧串联的自复励励磁系统工作特征	293
第十四章	同步发电机的灭磁	295
14.1	问题的提出	295
14.2	灭磁系统性能的评价	295
14.2.1	等效发电机时间常数法	296
14.2.2	有效灭磁时间法	297
14.2.3	按发电机电压对时间的积分值确定有效灭磁时间法	298
14.3	灭磁系统性能的对比	299
14.3.1	灭弧栅灭磁系统	299
14.3.2	非线性电阻灭磁系统	302
14.3.3	线性电阻灭磁系统	304
14.4	阻尼回路对灭磁特性的影响	306
第十五章	采用整流器励磁系统的同步发电机转子绕组过电压保护	311
15.1	引起过电压的原因 ^[35]	311
15.1.1	交流侧过电压	311
15.1.2	由切断励磁变压器引起的过电压	311
15.1.3	由可控硅整流器空穴存储效应引起的过电压	312
15.1.4	直流侧过电压	312
15.2	整流器励磁系统的过电压保护方式	315
15.2.1	过电压保护方式及设计原则	315
15.2.2	过电压保护的基本接线方式 ^[36]	315
15.3	同步发电机励磁系统过电压的允许值	320
15.3.1	同步发电机励磁绕组绝缘试验电压的确定	320
15.3.2	同步发电机励磁系统过电压的允许值	321
15.3.3	过电压保护动作电压值的整定	321
第十六章	具有正和负励磁电流的整流器励磁系统的特征	323
16.1	工作在空载、电容负载线路中的同步发电机自励磁 ^[38]	323
16.1.1	同步发电机自励磁的基本概念	323

16.1.2 同步自励磁条件	323
16.1.3 非同步自励磁条件	325
16.1.4 水轮发电机自励磁工作状态的数学表达式	326
16.2 具有正和负励磁电流的静止整流器励磁系统 ^[39]	329
16.2.1 同步发电机负励磁电流界限的确定	329
16.2.2 用于静止整流器励磁系统的正和负向励磁电流的调节系统 ^[45]	330
参考文献	334

第一章 同步发电机的基本特性

1.1 同步发电机的稳态特性

1.1.1 相量图

1. 隐极发电机

在稳态时隐极发电机的电势和励磁电流的相量图如图1-1所示。

发电机空载时，转子励磁电流 I_f 产生气隙磁通 $\dot{\Phi}_r$ ，感应出空载电势 $\dot{E}_0$ 。在负载情况下，定子电流 $\dot{I}$ 产生电枢反应安匝，与之相对应的电枢反应压降为 $j\dot{I}x_d = j\dot{I}(x_{ad} + x_s)$ 。如讨论以气隙电势 $\dot{E}_1$ 为基础，将只涉及纵轴电枢反应 $j\dot{I}x_{ad}$ 。如将此部分电枢反应压降换算到直流侧，所需的等效励磁电流为

$$\frac{CW_a I}{W_r} = KI$$

式中 W_a, W_r ——发电机定子和转子绕组的匝数；

C ——比例系数， $C < 1$ ；

K ——比例系数 $K = \frac{CW_a}{W_r}$ 。

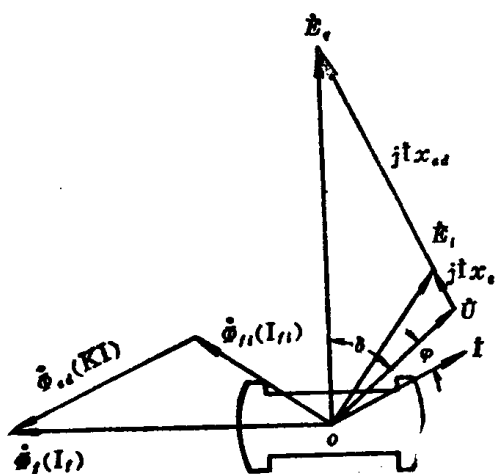


图 1-1 隐极发电机相量图

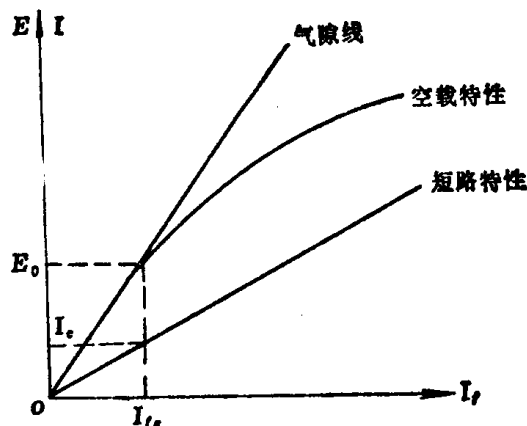


图 1-2 不饱和同步电抗的确定

发电机总励磁电流 I_f 产生的磁通 $\dot{\Phi}_r$ ，是对应于电枢反应电流的 KI 所产生的磁通 $\dot{\Phi}_{ad}$ 与产生气隙电势 E_1 的磁通 $\dot{\Phi}_1$ 之和。

在上述讨论中，均假定同步电抗 x_d 为不饱和值。此电抗可由发电机的空载气隙线及短路特性求得。如图1-2所示。当发电机的励磁电流为 I_{f0} ，对应的空载电势为 E_0 。由于短路时端电压为零，其内电势由同步电抗压降平衡，由此可求得饱和电抗值为

$$x_d = \frac{E_0}{I_c}$$

式中 I_c ——由发电机短路特性确定的与 I_{fc} 对应的定子短路电流值。

对于现代同步发电机，在实际运行情况下总是处于饱和状态。磁路的磁阻增加，由同一电流所产生的电枢反应磁通 ϕ_{ad} 和相应的电势 E_{ad} 将减小，因 $x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_c}$ ， $x_d = x_{ad} + x_s$ ，亦较不饱和值为低，如图1-3所示。

应指出的是，由于隐极发电机具有均匀气隙，纵轴和横轴方向的磁阻是相等的，所以 $x_{ad} \approx x_{aq}$ ，因而 $x_d = x_q$ 。在饱和情况下，沿纵轴方向的磁阻要比沿横轴方向的磁阻大些，因横轴无励磁绕组故无饱和影响，所以 $x_{ad} < x_{aq}$ 或 $x_d < x_q$ 。

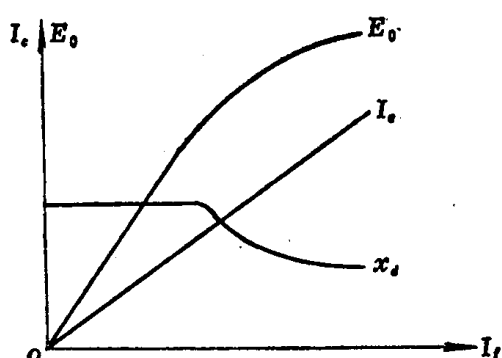


图 1-3 饱和对同步电抗 x_d 的影响

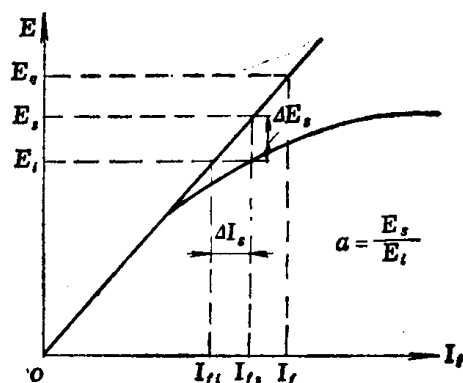


图 1-4 发电机空载特性曲线

至于漏抗 x_s ，因其磁路主要在空气中，故不受饱和影响。

下面讨论饱和对隐极发电机相量图的影响。假定发电机空载特性曲线如图1-4所示。

在图1-5所示图中， $\dot{\Phi}_{f1}(I_{f1})$ 、 $\dot{\Phi}_{ad}(KI)$ 和 $\dot{\Phi}_i(I_i)$ 分别与 $\dot{E}_s$ 、 $j\dot{I}x_{ad}$ 和 $\dot{E}_i$ 相对应。由于饱和的影响，使气隙电势由 $\dot{E}_s$ 减少到 $\dot{E}_i$ 。饱和程度可用系数 $a = \frac{E_i}{E_s}$ 表示之。各相量间的关系如图1-5所示。

对于饱和的隐极发电机，其饱和相量图亦可用另一种方式表示，如图1-6所示。其绘制程序为：首先确定等效电势 $\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}x_s$ ，式中 x_s 为不饱和值。然后将由于饱和引起

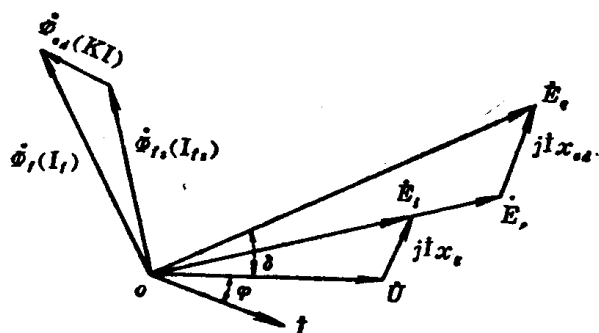


图 1-5 隐极发电机的饱和相量图

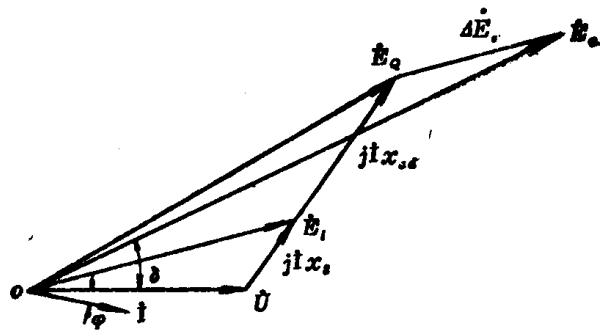


图 1-6 用等效电势 $\dot{E}_0$ 确定内电势 $\dot{E}_i$

的气隙电势减少量 $\Delta \dot{E}_g$ 附加在 $\dot{E}_g$ 相量上, $\Delta \dot{E}_g$ 的方向应与 $\dot{E}_g$ 平行。由此求得的合成内电势 $\dot{E}_g$, 查图1-4发电机空载特性曲线气隙线上对应电势值可求得相应的励磁电流 I_f 。

2. 凸极发电机

在图1-7中示出了不饱和的凸极发电机相量图。由此图可看出: 发电机端电压 $\dot{U}$ 与横轴电枢反应电势 $j\dot{I}_a x_d$ 与纵轴电枢反应电势 $j\dot{I}_a x_q$ 的相量和即为内电势 $\dot{E}_g$ 。饱和时, 气隙电势的横轴分量 $\dot{E}_g$ 将比不饱和时小些, 考虑饱和影响的凸极发电机相量图见图1-8。确定内电势 $\dot{E}_g$ 的程序同前: 首先确定等效电势 $\dot{E}_g$, 然后再将由于饱和影响所减少的气隙电势 $\Delta \dot{E}_g$ 和电压降 $j\dot{I}_a (x_d - x_q)$ 相加, 附加在 $\dot{E}_g$ 分量上, 此合成值即为 $\dot{E}_g$ 。由于饱和影响所减少的气隙电势 $\Delta \dot{E}_g$ 值, 由 E_g 在发电机空载特性上的相应工作点所确定, 饱和系数定义同图1-4。

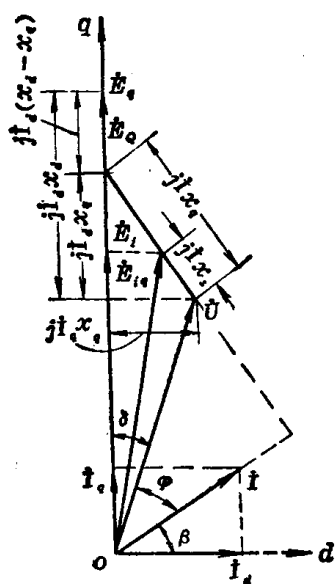


图 1-7 不饱和的凸极发电机相量图

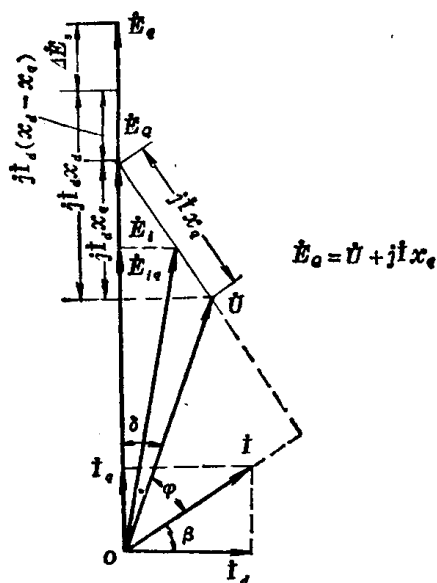


图 1-8 饱和的凸极发电机相量图

1.1.2 短路比

在同步发电机特性中, 短路比 (S. C. R) 是一个重要的参数, 其定义为

$$\text{短路比} = \frac{I_{f0}}{I_{f\phi}} \quad (1-1)$$

式中 I_{f0} ——发电机空载额定电压时的励磁电流;

$I_{f\phi}$ ——发电机定子短路电流为额定值时的励磁电流。

短路比参数可由发电机空载和短路特性曲线求得, 如图1-9所示。

由图1-9依定义可求出 短路比 $= \frac{OA}{OB}$ 。

当发电机不饱和时同步电抗 x_d 等于

$$x_d = \frac{E_g}{I_0} \quad (1-2)$$

由三角形OCA相似ODB条件可求得:

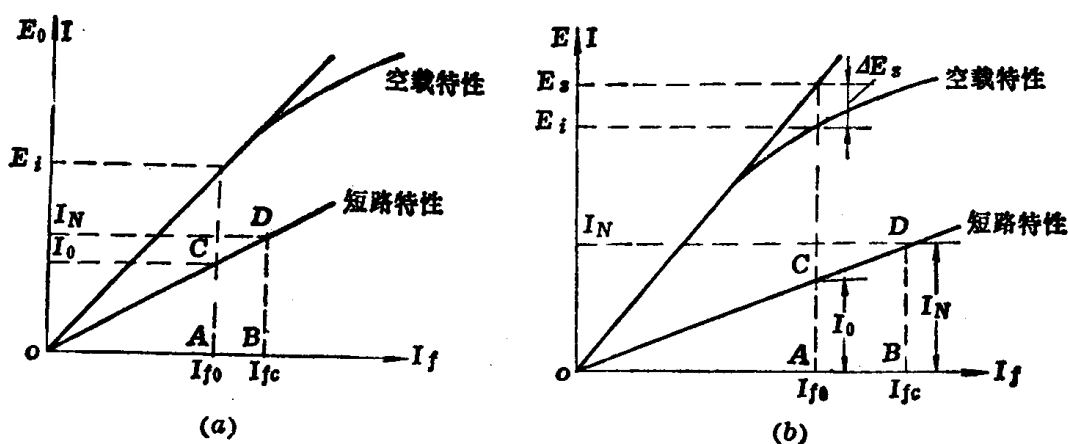


图 1-9 计及饱和时的发电机短路比的确定
(a) 当发电机不饱和时; (b) 当发电机饱和时

$$\frac{I_N}{I_{fc}} = \frac{I_0}{I_{f0}}$$

求得 $I_0 = \frac{I_{f0}}{I_{fc}} I_N$ 并代入式(1-2)得:

$$x_d = \frac{E_t}{\frac{I_{f0}}{I_{fc}} I_N}$$

由此可求得:

$$\text{短路比} = \frac{I_{f0}}{I_{fc}} = \frac{E_t}{x_d I_N} \quad (1-3)$$

考虑到在式(1-3)中 $E_t = U_N$, 可得:

$$\text{短路比} = \frac{1}{\frac{x_d}{\frac{U_N}{I_N}}} = \frac{1}{x_{d*}} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可看出, 当电机不饱和时短路比等于标么值同步电抗的倒数。随饱和程度的增加, x_{d*} 是减小的, 短路比之值亦随之增加。饱和时的短路比可用下式表达:

$$\text{短路比} = \frac{a}{x_{d*}} \quad (1-5)$$

式中 a ——饱和系数, 定义同图1-4。

应予以说明的是, 在凸极发电机中, 横轴方向具有较大的气隙, 对横轴电枢反应磁通 Φ_{aq} 而言, 其磁路中的磁阻大大超过纵轴电枢反应磁通 Φ_{ad} 的磁阻值, 不论磁路饱和或不饱和均是如此, 即

$$x_{aq} < x_{ad}, \quad x_q < x_d$$

1.1.3 功率特性曲线

1. 隐极发电机

在图1-10中示出了隐极发电机运行时的相量图。

如令 $OA = E_q \sin \delta$ 和 $BC = I \cos \varphi \times x_d = I_p x_d$, 可得:

$$E_q \sin \delta = I_p x_d$$

在等式两边同时乘以 $\frac{U}{x_d}$, 可得:

$$I_p U = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta$$

式中 I_p —— 发电机的有功电流分量;

U —— 系统电压。

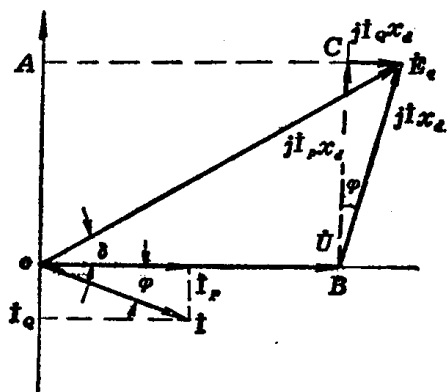


图 1-10 隐极发电机运行相量图

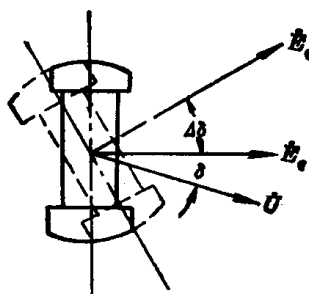


图 1-11 发电机转子功率角的变化

考虑到发电机输出功率 $P = I_p U$, 上式可写成下列形式:

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta \quad (1-6)$$

上式即为隐极发电机的功率特性表达式, 具有正弦曲线特征。在正常运行情况下, 机械输入功率与发电机输出电功率相等, 发电机内电势 E_q 以与受端电网电压相同的频率旋转, 当输入-输出功率不平衡时, 发电机的转子将加速, 其内电势 E_q 相量相对于受端电压相量, 将产生一相对角位移 $\Delta \delta$, 直到达到新的平衡, 其过程如图 1-11 所示。

至于发电机的无功功率 Q , 可依下列各式求得:

$$Q = UI_q = UI \sin \varphi \quad (1-7)$$

另由图 1-10 相量图可求得:

$$E_q \cos \delta = U + I x_d \sin \varphi$$

$$I \sin \varphi = \frac{E_q \cos \delta - U}{x_d}$$

将上式代入式 (1-7) 整理得:

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (1-8)$$

当 E_q , U , x_d 为常数时, 无功功率 Q 与转子角之间为余弦曲线关系, 相应曲线如图 1-12 所示。

2. 凸极发电机

对于凸极发电机的功率特性亦可由相量图求得, 同样的以 U 表示受端电网电压, x_d ,

● 此功率特性是从单相电路导出的, 假如式中 E_q 、 U 均采用线电压值, 即可求得三相总功率, 当采用标么值, 一般无须考虑单相和三相的差别。