

高等学校交流讲义

自动励磁调节器

西安交通大学电机与电器制造教研组编著



中国工业出版社

本书系根据西安交通大学最近讲授自动励磁调节器所用讲义经过修改补充和整理的。

本书内容反映了自动励磁调节器目前的发展情况，讲述了自动励磁调节器在现代电力系统稳定问题上的作用，自动励磁调节系统和元件的设计与计算方法。

本书可作为高等工业院校电器制造专业或电机与电器制造专业的电器制造专门化教学参考书，也可作为从事自动励磁调节器（系统）的教学、研究、设计和制造方面的教师、工程技术人员、电力系统自动化的设计人员及运行工作人员的参考。

自动励磁调节器

西安交通大学电机与电器制造教研组编著

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 · 印张 12 · 插页 1 · 字数 271,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数 0001—2,837 · 定价 (10-6) 1.45 元

统一书号: 15165·379 (一·55)

前 言

根据上海教材选编会议，对自动励磁调节器这门课决定以西安交通大学电机与电器制造教研组张汉扬同志最近编著的自动励磁调节器讲义为基础，并吸收其他高等学校对讲授这门课的意见进行修改补充和整理作为电机与电器专业（电器专门化）的教学用书。其中第二章碳阻调节器内容系根据苏联专家 ЛИБОВ 在哈尔滨工业大学为教师及研究生讲授这门课的讲义及清华大学“自动电压调节器”讲义编写的。

在编写本书时对于比例式电子离子调节器因国内未生产，电厂也未使用，故未将这部份内容编入。

本书的质量能符合教学要求，但在选编过程，由于时间匆促，错误难免，同时部份内容不及编写，待以后再版时补充，希望有关师生及广大读者提出宝贵意见，以便改进补充，我们谨表示衷心感谢！

教材选编会议电机与电器制造专业组

于1961年5月

目 次

<p>前言</p> <p>緒論 1</p> <p> § 0—1 概論 1</p> <p> § 0—2 反饋控制系統的設計步驟 1</p> <p> § 0—3 在電力系統中，自動勵磁調節器所需完成的任務 2</p> <p> § 0—4 對自動勵磁調節器的要求 4</p> <p> § 0—5 自動勵磁調節器的分類 7</p> <p> § 0—6 自動勵磁調節器的發展簡史 9</p> <p>第一章 自動勵磁調節系統的方程式 10</p> <p> § 1—1 自動勵磁調節系統概述 10</p> <p> § 1—2 標么值 10</p> <p> § 1—3 直流發電機 11</p> <p> § 1—4 它勵直流發電機 12</p> <p> § 1—5 並勵直流發電機 15</p> <p> § 1—6 根據發電機空載特性計算動態自感系數 $\cdot L_g$ 18</p> <p> § 1—7 交流同步發電機的勵磁類型 18</p> <p> § 1—8 單獨運行下的同步發電機方程式 22</p> <p> § 1—9 工作在簡單電力系統上的同步發電機的基本公式和特性 27</p> <p> § 1—10 同步發電機的方程式 32</p> <p> § 1—11 自動勵磁調節系統的結構圖及其傳遞函數 34</p> <p> § 1—12 當不考慮勵磁調節器作用時，調節系統的穩定性 34</p> <p>第二章 碳調節器 37</p> <p> § 2—1 概述 37</p> <p> § 2—2 PYH—100 系列碳調節器的工作原理 40</p> <p> § 2—3 碳調節器及磁場電阻 R_g 的選擇 43</p> <p> § 2—4 碳阻特性及其計算 46</p> <p> § 2—5 量測機構的選擇 48</p> <p> § 2—6 量測機構的誤差 49</p> <p> § 2—7 調節機構的誤差 53</p>	<p> § 2—8 電磁機構的設計 54</p> <p> § 2—9 碳調節器中各元件及並勵直流發電機的勵磁調節系統方程式 54</p> <p> § 2—10 碳調節器——勵磁機——同步發電機的閉環系統方程式及其穩定 61</p> <p>第三章 自動勵磁調節系統的接綫圖 65</p> <p> § 3—1 比例式自動勵磁調節器 65</p> <p> § 3—2 複式勵磁裝置和電磁電壓校正器 65</p> <p> § 3—3 快速相補償型自動勵磁調節器 73</p> <p> § 3—4 第一類強力式自動勵磁調節器 76</p> <p> § 3—5 第二類強力式自動勵磁調節器 77</p> <p>第四章 比例式自動勵磁調節器中不可變元件的設計方法 81</p> <p> § 4—1 設計要求 81</p> <p> § 4—2 選擇複式勵磁綫路的參數 81</p> <p> § 4—3 計算整流器的串聯片數 n 和並聯片數 m 84</p> <p> § 4—4 計算調整電阻 R_y 及整流變壓器的變壓比 $N_k = \frac{U_k}{U_2}$ 86</p> <p> § 4—5 校驗復勵電流互感器的負載 89</p> <p> § 4—6 計算復勵系統的工作特性 89</p> <p> § 4—7 計算單制正接電磁電壓校正器和複式勵磁裝置所組成的調節系統 92</p> <p>第五章 量測機構 97</p> <p> § 5—1 對量測機構的要求 97</p> <p> § 5—2 量測機構概論 97</p> <p> § 5—3 非綫性元件的伏安特性的近似表达式 100</p> <p> § 5—4 具有一個非綫性元件的橋式量測機構 102</p>
--	---

§5-5	具有两个非线性元件的对称桥式量测机构	104	§8-5	多环系统对数频率特性的绘制法	148
第六章	非线性电磁元件和线性电磁元件	107	§8-6	自动调节系统按对数频率特性分析稳定性	150
§6-1	非线性电磁元件的基本工作原理	107	§8-7	校正装置的综合问题的提法	152
§6-2	非线性电磁元件的计算方法	107	§8-8	理想过渡过程	153
§6-3	非线性电磁元件的设计方案	115	§8-9	校正装置的综合法	154
§6-4	线性电磁元件	117	§8-10	希望对数幅频特性的作图法	155
第七章	自动励磁调节系统的结构图	125	§8-11	校正装置的接线图	160
§7-1	比例式自动励磁调节器的结构图	125	第九章	强力式自动励磁调节器的设计	163
§7-2	第一类强力式自动励磁调节器的结构图	131	§9-1	第一类强力式调节器中不可变部分的设计方法	166
第八章	自动调节系统校正装置的综合	138	§9-2	第一类强力式调节器中串联校正装置的综合	167
§8-1	误差系数	139	§9-3	根据调节系统的过渡过程的衰减率, 选择校正装置的参数	167
§8-2	对数频率特性	141	§9-4	从D域划分图选择单发电机的调节器的校正装置参数	171
§8-3	典型环节的对数频率特性	142	附录	179	
§8-4	单环系统对数频率特性的绘制法	147	参考文献	183	

緒 論

§0-1 概 論

在1960年，我国工业战线上展开了轰轰烈烈的以机械化、半机械化、自动化、半自动化为中心的技术革新、技术革命运动。在运动中，我国许多工业部门广泛地创造和采用了很多新技术和新经验，使生产水平和技术水平迅速地提高。因此我国工业的自动化程度已有很大提高。由此可见，自动控制技术的应用范围是在迅速地扩大到各个技术领域中去。它对国民经济的作用也愈来愈重要。

自动调节系统的类型很多。根据它的作用原理来分：有反馈控制系统、采样伺服系统、有时滞的线性系统、非线性系统、变系数线性系统等等。在上述每一类型的调节系统中，又可根据被调量的物理性质分为许多调节器，如温度调节器、速度调节器、电压调节器、气压调节器等等。

我们在叙述调节系统的设计方法时，对于每一类型的调节系统（根据作用原理来分的类型）中，只须叙述一种具体调节器，而没有必要根据被调量的性质来叙述许多种调节器。因为对于同一类型的各种调节器来说，它们的设计方法是相同的。否则这门课的大部份内容将为叙述各种调节对象的运行特性了，如锅炉、炼钢炉、汽轮机、电动机、电炉等的特性。显然，这些内容不是本门课程要求的。如果读者需要这方面知识时，可在实际工作中很快地学习到。

在下面叙述的调节器，我们所选择的类型是反馈控制系统。这种类型的调节系统在实际中应用得最为广泛。

我们所选择的具体对象是同步发电机上用的自动励磁调节器。选择它的理由是（1）我们对发电机的运行特性最为熟悉。并且发电机的工作过程亦较为复杂；（2）有重大的国民经济意义。

必须着重指出，在下面虽然我们只叙述了一种调节器的设计方法，但是这个设计方法对于反馈控制系统类型中的其它各种具体调节器亦是适用的。可以用来设计恒值调节系统、程序调节系统和随动系统。

§0-2 反馈控制系统的设计步骤

很完善的反馈控制系统的设计方法，目前尚在研究阶段。现在所介绍的设计方法，不是整个反馈控制系统的综合方法，而只是系统中校正装置的综合方法。这是在调节系统的结构图已知的情况下，采用参数与特性甚易改变的校正装置以改善整个调节系统的运行特性，从而达到技术要求。根据这种情况，反馈控制系统的设计步骤如下：

- （一）详细分析调整对象的静特性与动特性。并列对对整个自动调整系统的要求。
- （二）选择自动调节系统的结构图，和在工程上实现的方法。
- （三）设计系统中的不可变部份。

任何自动调节系统都是由调整对象和一些元件所组成的。这些元件中，有一部分元件的参数和特性是较难改变的，包括调整对象及其它元件如电动机、液压机等。另有一些元件的参数和特性很容易改变，它们加在系统上可以使系统具有所需的动特性。这些元件属于校正装置。

(四) 求出校正装置的传递函数。

这种校正装置应采用尽可能简单的技术设备。

(五) 求出实现上述传递函数的具体校正装置。

(六) 分析自动调节系统是否合乎给定要求可以采用理论分析方法或实验方法。若系统不能满足技术要求，则需从第四项起重新综合校正装置。

必须指出，综合问题的解答并不是唯一的。因为对系统提出的同一要求，可以采用不同的结构图及不同的校正装置来完成。

§0-3 在电力系统中，自动励磁调节器所需完成的任务

第一项任务：在电力系统正常工作情况下，维持电力系统中电压于一定水平（给定的）。

众所周知，当发电机的负载改变时，端电压 U_e 随之变化。这是因为发电机的激磁电流一定时；发电机的空载电势 E_d 是不变的。负载电流增加，将提高发电机电枢压降，因而降低了它的端电压 U_e 。同步发电机的外特性见（图 0-2a）。为了保持发电机的电压于一定水平，显然应该随着负载的变化而改变激磁电流 I_f 。这一任务在没有实现自动化之前，采用了手动调节方法。它是用调整发电机或励磁机的磁场变阻器来完成的。这一工作频繁而不可靠。对于电厂中的值班人员，这是一项劳动强度很高的工作。如果说在负载缓慢改变时，操作人员能够胜任的话。那末当负载剧烈改变或电力系统发生故障时，要求迅速改变激磁电流，操作人员的工作就不能保证这一要求。只有应用电压的自动调节才能解决这项问题。

同步发电机有了自动励磁调节器后的外特性，见图 0-2b。

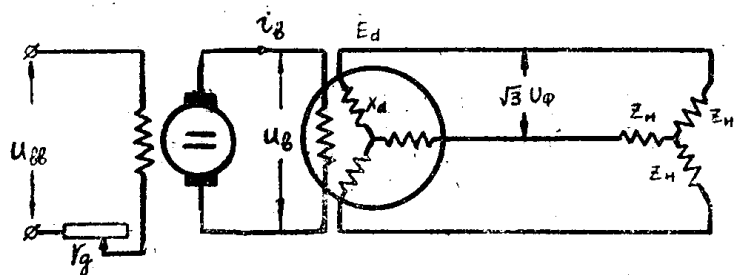


图 0-1 同步发电机的接线图

E_d -空载电势； X_d -同步发电机的直轴同步电抗；
 U_e -同步发电机的端电压。

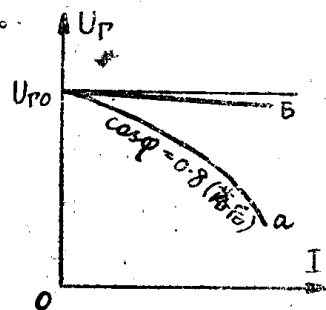


图 0-2 同步电机的外特性

a-没有自动励磁调节器；
b-有自动励磁调节器。

由于自动电压调节器的工作原理在于改变电机的励磁。又因近代电力系统中，自动电压调节器的作用不仅仅是为了维持发电机的端电压作用，尚有其它一些重要作用，故调节器的更正确的名称应是自动励磁调节器。

第二项任务：增加输送功率、增加输送距离。

近代电力系统的发展趋势是增大输送距离和输送功率。要满足这项要求，需要解决许多技术问题。其中最重要的和基本的困难之一为同步发电机有较小的稳定性。

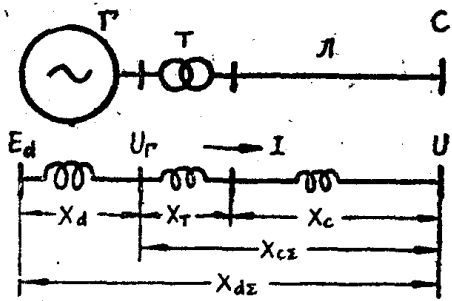


图0-3 同步发电机在电力系统中的工作情况

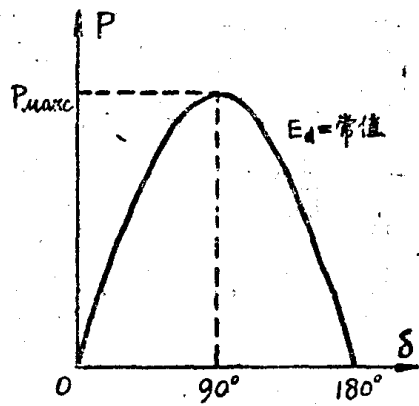


图0-4 同步发电机的功角特性

設有一简单电力系统，如图0-3。其中同步发电机經過输电系统的电抗 X_{dz} 而工作在变电站 C 的常值电压 U 的汇流排上。变电站 C 有无限大功率。此时，同步发电机輸入系统中的功率为

$$P_{Ed} = \frac{E_d U}{X_{dz}} \sin \delta \quad (0-1)$$

式中 X_{dz} ——电力系统的总电抗；

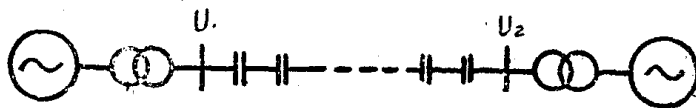


图0-5 用电容器作纵补偿

δ —— E_d 和 \dot{U} 間夹角，即功率角。

E_d 为常数时的功角特性如图0-4所示。显然，同步发电机能稳定运行的极限角 δ 为 90° 。此时，相应的最大输出功率为

$$P_{maxc} = \frac{E_d U}{X_{dz}} \quad (0-2)$$

如果输电綫甚长， X_{dz} 将很大。同步电机所能送出的功率便很小。在发电机参数和输电系統参数确定的情况下，改善这种缺点，有三方法。

其一，提高电压 E_d, U ，这样可以有效地增加电机所能送出的功率見 [公式 (0-2)]。但因受到高压设备的限制，成本昂貴。

其二，补偿输电系统的参数，如用串联补偿装置 (图0-5)，能将 X_{dz} 大为降低，从而提高输出功率。

然而，补偿装置的缺点是价格貴、綫路复杂、操作困难，工作不可靠。

其三，采用自动励磁调节器，增大极限角 δ ，从而增大输出功率。

若自动励磁调节器的开环系統有足够大的放大

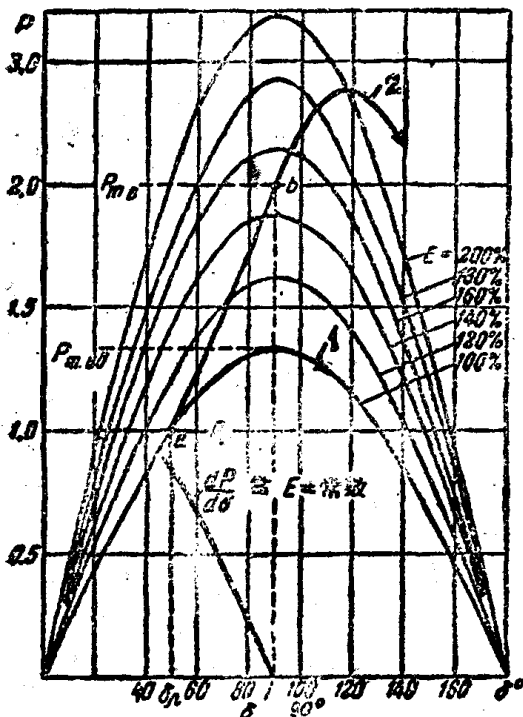


图 0-6

1-没有自动励磁调节器；
2-具有自动励磁调节器， $U_2 = \text{const.}$

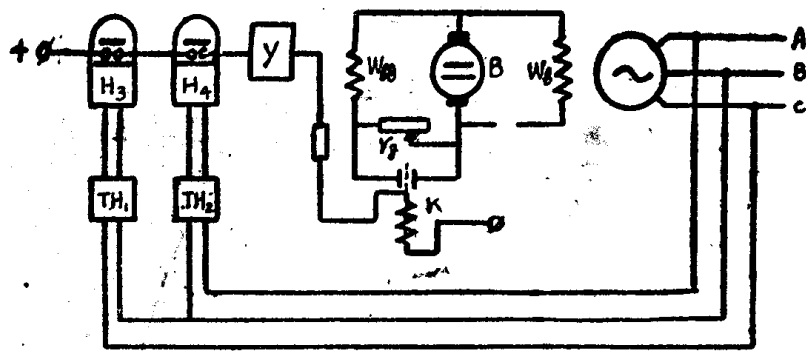


图 0—7 用低电压继电器的强行励磁接线图

H_3, H_4 —低电压继电器, TH_1, TH_2 —电压互感器, K —接触器, W_{g1} —同步发电机的励磁绕组, W_{g2} —励磁机的励磁绕组, y —指示继电器。

下, 快速升高发电机励磁使超过额定值 (强行励磁), 对于提高发电机并联工作的稳定性及维持电动机的运行是主要的和最有效的手段之一。达到这点的最简单办法是利用继电器强行励磁装置把励磁机励磁绕组回路中的外电阻全部短路。如图 0—7 所示。

图中低电压继电器 H_3 和 H_4 联接到发电机端的线电压上。当发电机端电压下降值大于 $15\%U_H$ 时, 继电器 H_4, H_3 动作, 使接触器 K 动作而进行强行励磁。其中, y 是指示继电器。

第四项任务: 提高继电保护装置的动作准确性。

当电网发生短路时, 由于继电器强行励磁装置而使短路电流大为增大, 从而提高继电保护装置的动作准确性。

§0—4 对自动励磁调节器的要求

自动励磁调节器要能完成上述各项任务, 必须具备下列条件:

(1) 在特定的线路段上, 维持电压于给定水平。

显然, 汇流排 A 的电压 U_A 和汇流排 B 的电压 U_B 对电流 I_A 之间的特性曲线是不能一致的。如果自动励磁调节器为无差特性, 则 $U_A = \text{常值}$ 。但 U_B 不能维持常值, 将随负载而改变。所以不同的线路段, 有不同的电压特性。

自动励磁调节器的开环调节系数愈大, 愈能使被调量 U 接近于常值。一般地说, 开环调节系数受到系统稳定性的限制。不同类型的励磁调节器, 有不同的最大调节系数值。如在电磁电压校正器 ЭМК 和改良型电磁电压校正器 ЭМК-У 中, 调节系数

$$K_P \approx 10 \frac{\text{单位电压}}{\text{1单位励磁电压}}$$

又如苏联全磁强力式自动励磁调节器中, 电压偏差信号通道的调节系数为

$$25 \frac{\text{单位电压}}{\text{1单位励磁电压}}$$

式中, 1 单位电压为发电机在空载时被调量 U 变化 1 个额定值。1 单位励磁电压为相应于被调量 U 变化 1 个额定值所需改变的励磁电压值。

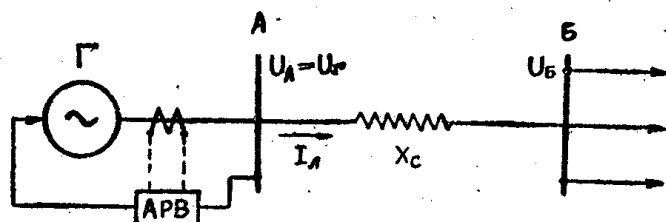


图 0—8 输电系统的基本接线图

系数和没有失灵区, 则在角度 δ 大于 90° 后, 仍可使 $E_d \sin \delta$ 的乘积随着 δ 的增大而增大。发电机将能稳定地运行在大于 90° 的区域内。如图 0—6 所示。电机的输出功率亦随着增加。

第三项任务: 提高电力系统的动态稳定性。

科学研究工作和实际运行经验证明: 在事故情况

(2) 保证调节系统稳定。

(3) 调节器的反应速度应迅速。

不論是从电力系统的静态稳定或动态稳定的观点出发，都要求调节系统中起作用的环节具有尽可能小的时间常数。动态稳定还要求励磁系统应尽可能供应最大的励磁电压。

现在，首先从静态稳定的观点来讨论环节的时间常数对调节过程所产生的影响。

为使问题简单明了起见，假设自动励磁调节器按功率角 δ (δ 的意义见公式 0—1) 进行调节。调节器具有高灵敏度和没有惯性。忽略励磁机的励磁回路中的时延。只考虑同步发电机的激磁绕组的时延常数。这样，调节器将使发电机的转子滑环上的电压变化正比于功率角 δ 的变化。

设转子相对于同步转速有正弦形振荡。由于调节器的作用，转子滑环上的电压将随着功率角 δ 而改变，并且与其同相。然而，转子回路有电感，转子电流几乎落后于励磁电压 90° 。即使振荡很缓慢，如 0.2 赫，转子电流的落后角亦如是。转子电流相对于功率角 δ 的落后相位亦是 90° 。见图 0—9。

从图 0—9 可以清楚地看出，当 δ 减小时，即当转子制动时，以某种速度穿过平均位置（平衡位置），在此瞬时转子电流偏差 Δi_a 达到最大值。这导致增加电磁力矩，使转子的制动加强。转子将以某种加快的速度穿过平衡位置。调节器不能帮助同步机的稳定性。这个结论是有局限性的，只是在上述许多假定条件下才有效。

当转子相对于同步速度振荡时，转子回路中感应出电流。此电流与定子反应磁通相互作用而在发电机轴上产生阻尼力矩。阻尼力矩将使转子振荡减弱，亦即是增强同步机的稳定性。

上述两作用互相相反。若调节器的调节作用过大，转子将产生自振荡。终于使同步机失去同步转速。

从图 0—9 看出，若调节作用超前转子振荡 90° ，则调节器对稳定性的作用大为改善。在调节器中引入正比于功率角 δ 对时间的一次导数的电压，便能得到超前 90° 的调节作用。

在实际的调节系统中，调节器本身有延时，励磁机亦有延时。为此，在调节器中引入一次微分的作用还不够，尚须引入二次微分。以上从简单的物理过程，叙述了引用强力式自动励磁调节器的必要性。所谓“强力式”系指量测机构中有一次微分或二次微分讯号的调节器。

从电力系统动态稳定性观点出发，励磁系统应保证在最短时间内使励磁电压上升至最高值（强行励磁），就是调节速度应尽可能的快，并且励磁电流应达到可能达到的最大的数值。

励磁电压上升速度不仅决定于自动励磁调节器的调节速度，且和励磁机的电压上升速度有关。

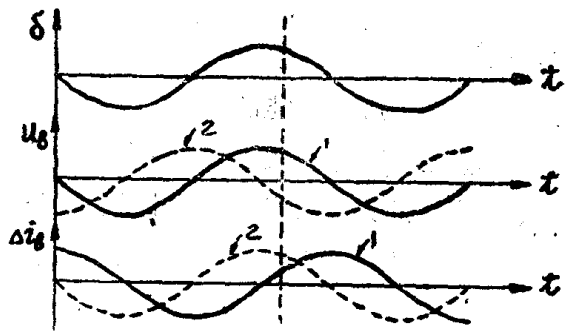


图 0—9 在高灵敏和无惯性调节器作用下，励磁电压振荡相位和转子电流分量相对于功率角 δ 的振荡情况

1—按 $\Delta\delta$ 进行调节；2—按 $\frac{d\Delta\delta}{dt}$ 进行调节。

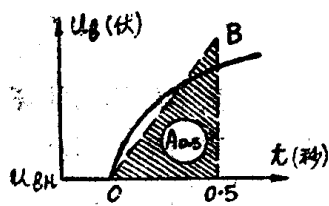


图 0-10
说明励磁机平均电压上升速度概念的示意图

励磁机电压上升的平均速度 $\left(\frac{du_{\theta}}{dt}\right)_{cp}$ 的数值可以用直线 \overline{OB} (图 0-10 所示) 的倾斜角的正切来表示。

这直线在 0.5 秒的时间间隔内所局限的面积 $A_{0.5}$ 应与从 $u_{\theta K}$ 向上升的实际电压上升曲线所局限的面积相同。

对现代的励磁机而言, $\left(\frac{du_{\theta}}{dt}\right)_{cp} = (0.8 \sim 1.2) u_{\theta K}/\text{秒}$ 。它的励磁机比之自励的励磁机电压上升的平均速度要大一些。

现在来研究强行励磁上升的倍数。

强行励磁倍数系指在强行励磁时的励磁电压与额定励磁电压的比值, 即

$$K_{u\phi} = \frac{u_{\theta\phi}}{u_{\theta K}}$$

或为与它们对应的电流的比值

$$K_{i\phi} = \frac{i_{\theta\phi}}{i_{\theta K}}$$

在短路切除后, 为了保证电网电压迅速恢复, 必须在电网短路的过程中就增大发电机的励磁电流直到最大可能的数值。

为了满足电网电压快速恢复的要求, 发电机必须强行励磁到 $(3-4)i_{\theta K}$ 。

现代励磁机的最大强行励磁倍数为 $(1.3-2)$, 因之不能满足上述条件。

由上述可见, 交流发电机上用了励磁机后, 不能很好地满足快速调节和最高励磁的要求。

约在 1956 年, 苏联已研究出了不带励磁机的离子调节器。这种调节器能很好地满足上述要求。它的强行励磁倍数可以很轻易地达到 $(4-5)$ 。在强行励磁时, 交流发电机转子上的电压增长速度可达到 $200 u_{\theta K}/\text{秒}$, 相应的时间常数约 $0.004 \sim 0.006$ 秒。

(4) 必须使调节器的失灵区为最小。

在机电型调节器中, 由于轴承的摩擦等等影响了量测机构的工作。为了克服摩擦力是需要一定的功率, 因此调节器的量测机构对于较小的电压偏差是失灵的。

还不是使调节器量测机构动作的最大电压偏差 ΔU 称为调节器的失灵度 (见图 11)。

调节器的失灵度用百分数来表示

$$a[\%] = \frac{\Delta U}{U_{\theta K}} \times 100$$

不是使调节器动作的电压偏差的上下极限称为调节器的失灵区。

失灵度是调节器质量的重要指标之一。有了失灵度后, 对电力系统运行有下列不良后果:

第一、在并联运行的同步发电机间, 无功电流分配不稳定。

设有两同步机都装有调节器。调节器 1 没有失灵区, 调节器 2 有失灵区 (图 0-11)。起初, 发电机 1 和 2 分别运行在特性曲线 EB 和 EM 上的 A 点和 B 点。由于负载的变化, 电压 U_{θ} 下降, 调节器 1 发生调节作用, 最后运行在 B 点。但调节器 2 不起作用, 因电

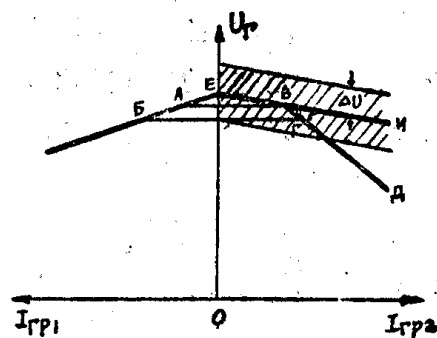


图 0-11 具有失灵敏区的励磁调节器的特性

压下降幅值小于失灵感。发电机 2 将按没有调节器的特性 BD 运行而工作在 Γ 点。因发电机 2 的特性曲线 EH 和 BD 的斜率不同，由此使发电机 1 和 2 间的无功电流分配发生变化，不能保持恒定比率。这样造成无功电流分配不稳定。

第二、调节器有了失灵区后，同步电机不能在人工稳定区内运行。

根据调节器的失灵区，可在发电机的外功率特性曲线图上画出两条相应的边界曲线。如图 0-12。如果发电机原来是在 $\delta > 90^\circ$ 的点 a 处运行；那末由于调节器具有失灵区的缘故，它不可能长久地在该点运行。当发电机在原来运行的点 a 处发生了微小的干扰时，调节器有失灵区而不动作。发电机将沿着内功率特性的下降部分工作，角度 δ 开始不断地增大。一直等到穿过了失灵区后，调节器才开始改变发电机的电势。发电机的运行情况就由一条功率曲线转移到其它条曲线上去，因此不但使发电机功率的降低减慢，而且在以后还要使发电机的功率随着角度的增大而提高。在点 b 处，过剩功率是没有了，但转子的惯性使角度继续增大，发电机功率也随之增加。于是发电机产生了过剩功率，使转子减速。在点 c 处，角度抵达了最大值，以后即开始减小。经过外功率特性曲线上限边界的点 d 后，励磁调节器开始减低励磁机的电压。发电机功率的变化曲线，将对应着电势 E 的减小，在反方向与一组内功率曲线相交。虽然振荡衰减后，过程仍旧回复到了点 a 。但是由于该点对内功率特性运行并不稳定，所以又立即发生了振荡。

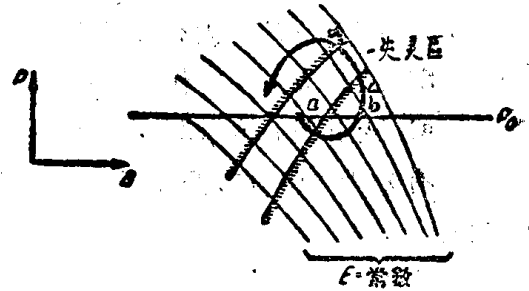


图 0-12 具有失灵区时，同步发电机的外功率特性和其工作情况

因此，当调节器具有失灵区时，在人工稳定区域中发电机的运行特征是角度 δ 的不断振荡，即发电机的功率、电压和电流的不断振荡。

发电机在运行情况中的这种振荡是不易控制的。它们使具有机械型励磁调节器的发电机不可能在角度 δ 大于 90° 的区域内进行。

机电型调节器的失灵感约为 0.5—1%。而近代的电子离子式调节器、磁放大器式电磁电压校正装置和强力式自动励磁调节器都具有差不多为 0 的失灵感。

§0-5 自动励磁调节器的分类

自动励磁调节器可以根据各种特征来进行分类。下面举几种基本的分类方法。

1) 按调节对象的种类分有：

a) 直流发电机的调节器；

b) 同步发电机的调节器。

2) 按调节特性分：

a) 有差调节器

调节器不能保持被调电压于一恒定不变之值，而有一定调差率。此种自动励磁调节器中没有包含无差环节。调节系统的固有算子含有自由项 1。

b) 无差调节器

调节器能保持被调电压于一恒定不变之值。其调差率等于 0。它具有无差环节（积分

环节)。调节系统的固有算子没有自由项 1。

3) 按调节机构的作用原理分:

a) 变阻调节器 (图 0—13)

有分段电阻调节器和碳阻调节器。前者是级进地跳跃地改变电阻值, 而后者则平滑地改变。

6) 振动式调节器 (图 0—14)

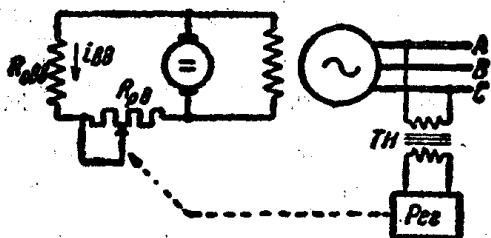


图 0—13 用改变磁励机励磁迴路中电阻的方法来调节发电机电压的原理图。

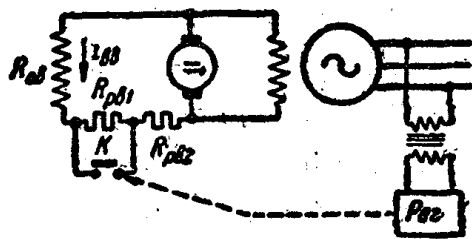


图 0—14 振动脉冲型励磁调节器的原理图

它的调节机构是并联于一电阻的触头。由于触头的分合而将电阻接入或切除, 因而使励磁电流改变。而发电机电压维持在一定范围内振动。这一电压由触头的分开时间和闭合时间的关系决定, 即决定于

$$\tau_z = \frac{t_z}{t_d + t_z}$$

式中 τ_z ——相对闭路时间;
 t_d ——触头分开的时间;
 t_z ——触头闭合的时间。

b) 离子调节器

调节机构是可控离子管。它直接输送电流于调节对象的励磁绕组上。

电子离子式和强力式自动励磁调节器都属于这一类。

r) 具有磁放大器的调节器

调节机构是由磁放大器制成。它亦是直接输送电流于调节对象的励磁绕组上。

上述 b) 和 r) 的励磁调节器的电压调节原理可由图 0—15、0—16 和 0—17 来说明。

倘有其它类型的调节机构, 现不拟叙述。

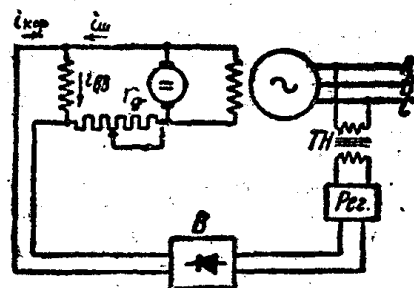


图 0—15 用正比于发电机出口电压偏差的附加励磁电流作发电机电压调节的原理图

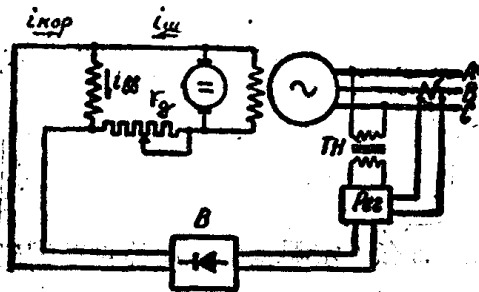


图 0—16 由定子电压与电流引来附加励磁电流作发电机电压调节的原理图 (电流加在主绕组上)

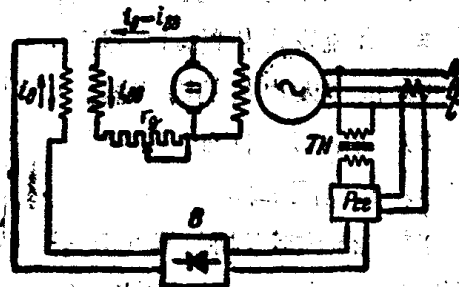


图 0—17 由定子电压与电流引来附加励磁电流作发电机电压调节的原理图 (电流加在附加绕组上)

4) 按調節器的結構分:

a) 具有可動部分的電動機械式自動勵磁調節器。屬於此類的有振動式調節器、變阻器式調節器等;

б) 沒有可動部分的電或電磁式自動勵磁調節器: 屬於此類的有電子離子調節器, 磁放大器調節器等。

5) 按調節原理分:

a) 磁場電阻調節器, 其作用在於改變磁場電阻;

б) 磁場電流調節器, 其作用在於輸送勵磁電流。

6) 按調節作用是否連續分:

a) 不連續調節器;

б) 連續調節器。

§0—6 自動勵磁調節器的發展簡史

自動勵磁調節器中首先問世的是電動機械式的調節器。在1900—1920年間出現了交流發電機和直流發電機的振動式調節器(即Тирриль調節器), 同時也有了分段電阻式調節器。這種調節器結構複雜、工作可靠性差, 缺點很多。然而在資本主義國家仍然在生產。這說明資本主義國家在技術上是保守的。

1920—1930年間出現了新型的機電式調節器, 即碳阻式調節器。

在電子學蓬勃發展的1930—1940年中, 電子離子式勵磁調節器獲得成功。但是在1940年以後, 自動勵磁調節器的發展就轉向於應用磁放大器了。因為磁放大器比之電子離子裝置有着更多優越之處。

我們祖國製造自動勵磁調節器的歷史很短。在解放以前, 我國是沒有自動勵磁調節器的製造工業, 全部靠進口。在解放後在黨和政府的正確領導下, 由於工業建設的需要, 工廠、科研機關和高等學校都對調節器的製造及其理論做了許多工作。

1953年起, 試製了PYH-100系列碳阻式自動勵磁調節器。

1954年起, 中國科學院開始研究磁調節器的製造問題。

1955年投入運行的我國第一個自建的水電站中, 水輪發電機上用的全套電磁式電壓校正器便是國內工廠製造的。

從1958年起, 我國有許多高等學校、科研機關和工廠在研究強力式自動勵磁調節器, 並且獲得了很大的成就。

現代在工業上已出現了比例式電子離子調節器和磁放大器及強力式自動勵磁調節器, 但某些理論和技術上的問題尚未解決, 有待進一步研究。

第一章 自动励磁调节系统的方程式

设计自动调节器时，必须知道表征有关环节特性的方程式，以及由此组成的调节系统的方程式。这一章的任务就是列出同步发电机的自动励磁调节系统中的上述有关方程式。

§1-1 自动励磁调节系统概述

设有一简单电力系统。其中同步发电机经过变压器和输电线路电抗 X_c （忽略电阻、电容）而联接到接收端汇流排 U 。发电机容量与接收端系统相比约小 8~10 倍或更小。根据运行经验知道，在这种情况下，接收端的功率相对于发电机来讲，可以认为是无穷大的。即接收端的电压 U 和频率 f 将不受发送端运行情况的影响，而保持为常值。调节系统的原理接线图如图 1-1。

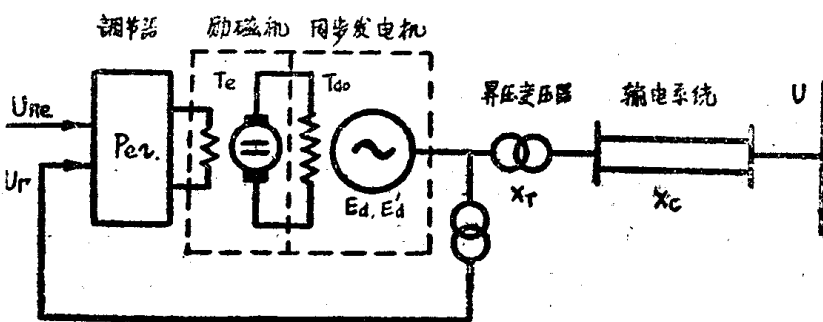


图 1-1 自动励磁调节系统

这个调节系统的结构图如图 1-2。每个方框中列出相应环节的传递函数。所有物理量都用相对单位（标么值）表示。

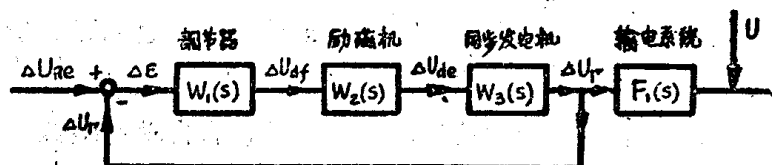


图 1-2 自动励磁调节系统的结构图

在需要准确研究调节系统时，必须将接收端系统、输电线路和发送端系统视为一个整体。并且不仅需考虑发送端机器的机械和电磁惯性，亦应考虑接收端的。然而，当接收端具有无穷大功率时，便可认为接收端的工作参数不受调节过程的影响。

下面将分别讨论各环节的传递函数。

§1-2 标么值

以后，在推导各环节的传递函数时，所用到的物理量将用标么值（无量纲的）表示。故有必要来叙述标么值的基本知识。

标么值的特点是简单明了。

这种制度的要点是把计算内所用到的量，例如阻抗、电流、电压和功率的数字，不用通常的单位欧、安、伏和伏安等来表明，而用对它们作为基本值的阻抗、电流、电压和功率的比值来表明。上面的四个量是用欧姆定律 $I = \frac{U}{Z}$ 和功率方程 $W = UI$ 联系的。

所以，如果采用其中的两个量，例如功率和电压，作为基本量，并对它们规定任意的数值作为基本值。那末另外的两个量——电流和阻抗的基本值，可由前两个基本量来导出。

这样，設 W_0 代表功率的基本值， U_0 代表电压的基本值，那末电流的基本值将等于：

$$I_0 (\text{仟安}) = \frac{W_0 (\text{兆伏安})}{U_0 (\text{仟伏})} \quad (1-1)$$

阻抗的基本值是

$$Z_0 = \frac{U_0 (\text{仟伏})}{I_0 (\text{仟安})} = \frac{U_0^2 (\text{仟伏})}{W_0 (\text{兆伏安})} \quad (1-2)$$

如果在討論的系統中，具有几級电压（6 仟伏，110 仟伏等），那末，必須选定一級的电压作为基本电压。假如系統中其他部分的阻抗是用欧来表明的，那末必須預先把它归算到选取为基本电压的一段电路中，然后再化成标么值。

实际上，上述的两个运算步骤可以应用下列算式来同时进行。这算式将用欧表明的阻抗直接化到标么值：

$$Z_* = \frac{Z_{(\text{欧})}}{Z_0 (\text{欧})} k^2 = Z_{(\text{欧})} \times \frac{W_0 (\text{兆伏安})}{U_0^2 (\text{仟伏})} \times k^2 \quad (1-3)$$

式中 Z_* ——阻抗的标么值；

$Z_{(\text{欧})}$ ——阻抗的欧姆数；

$W_0 (\text{兆伏安})$ ——基本功率的兆伏安数；

$U_0 (\text{仟伏})$ ——基本电压的仟伏数；

k ——变换比率，阻抗所在一段电路对选取为基本电压一段电路中的电压之比。即

$$k = \frac{U_0}{U}$$

发电机和变压器的阻抗，經常是用欧或对这元件的額定功率和額定电压的百分值来表明的。在用百分值表明的情形下，可应用下列的标式来把阻抗化成标么值：

$$Z_* = \frac{Z_{\%} W_0 U_H^2}{100 W_H U_0^2} k^2 \quad (1-4)$$

式中 $Z_{\%}$ ——阻抗的百分值。

$$Z_* = \frac{Z}{Z_H} 100 = \frac{Z}{U_H^2 / W_H} 100$$

U_H ——发电机的額定电压；

W_H ——发电机的額定功率。

以下标么值不再用特殊符号表示。

§1-3 直流发电机

在这一节，我們將叙述直流发电机的空载电势与其端电压之間的关系(参阅图1-5)。

直流发电机的基本特性是：

$$E = f(i_B), \text{ 当 } n = \text{常值, 即空载特性}$$

$$u = f(i_B, R), \text{ 当 } n = \text{常值, 即负载特性}$$

式中

E ——发电机电势，即空载电压；

u ——发电机端电压；

i_B ——励磁电流；

R ——负载电阻；

n ——转速。

当 R 为常值时， u 和 i_B 的关系是负载特性，也就是励磁外特性。当 $R = \infty$ 时，则是空载特性。在图 1-3 中表示发电机端电压和励磁电流的关系曲线。不同的 R ，有不同的负载特性。这是因为有电枢电阻压降和电枢反应的缘故。

在不考虑电枢反应时，负载特性和空载特性的差别只有电枢电阻的压降。这样我们有可能从空载特性作出负载特性。

电枢回路的方程式：

$$u = E - iR_a \quad (1-5)$$

式中 i ——电枢回路电流，即负载电流；

R_a ——电枢电阻。

因为忽略电枢反应，直流发电机便是定向环节。励磁电流和负载电流将不发生相互作用。

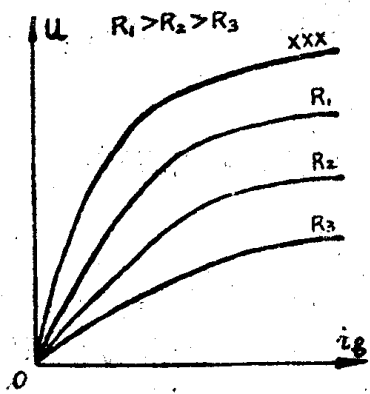


图 1-3 发电机端电压与励磁电流间的关系

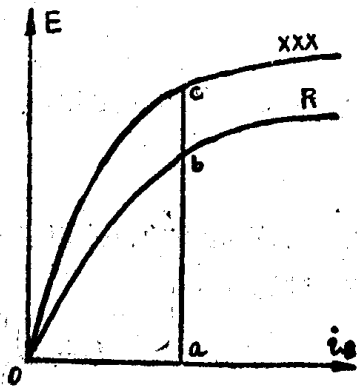


图 1-4 从空载特性作负载特性

负载电流

$$i = \frac{u}{R} \quad (1-6)$$

(1-6) 代入 (1-5) 式，得

$$u = E - \frac{u}{R} R_a$$

$$u = E \frac{R}{R + R_a} \quad (1-7)$$

$$\frac{u}{E} = \frac{R}{R + R_a}$$

根据上式，便可从空载特性 (xxx) 作出负载特性。如图 1-4 所示。其中

$$\frac{ab}{ac} = \frac{R}{R + R_a}$$

在不同的励磁电流时，可用相同的方法作出负载特性上相应的点。

§1-4 它励直流发电机

它励直流发电机的接线图如图 1-5。忽略电枢反应，所以它是定向环节。我们将发电机分成两个环节，其结构图如图 1-6 所示。

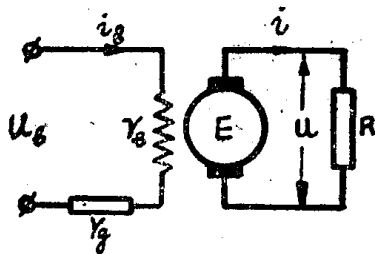


图 1-5 它励发电机接线图

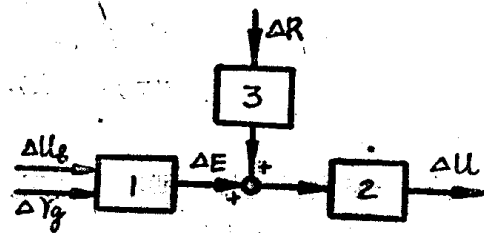


图 1-6 它励发电机结构图