

哈爾濱工業大學講義

自 動 調 節 器

路浩如、楊樹智、蔡尙峯 編譯

1956

自 動 調 節 器

路浩如、楊樹智、蔡尙峯 編譯

1 9 5 6

編譯者：路浩如、楊樹智、蔡尙峯
出版者：哈爾濱工業大學
印刷者：哈爾濱工業大學印刷廠

1956年1月出版 工本費1.30元

前 言

1955 年 10 月起，苏联专家里沃夫（Е.Л.Львов）为我校本科电器专门化五年級学生开了「自动調節器」課程。根据我校教学计划的規定，該課程授課時間为 50 学时，習題 10 学时，实验 20 学时，一学期講完。

在講授本課程时，考慮到本校的具体情况，在第一章中适当地講授了一些自动調節理論。兄弟学校应用本講义时，如学生对这方面的知識相当熟習，而時間又不允許，可酌量減少些。本講义中有些材料如磁放大器的工作原理等也多了一些，以后可移入普通电器課程的相应章節中。因为時間的关系，关于「电子离子調節器」未作更多的講授，此項材料容后補充。一般說來，本講义的材料是足够的。建議以后按新計劃講課时（新計劃是 40 学时）不必更多地增加材料，以免学生負担过重。

本講义並不是專家親筆講稿的譯本，而是教研室教師与研究生（路浩如、楊樹智、蔡尙峰等）根据聽課筆記整理翻譯而成。由于整理水平的限制和付印的匆促，錯誤在所難免，这应由我們負責，希讀者指正。

哈尔滨工業大学电器教研室

1956 年 1 月

目 錄

緒 論

§ B-1	自动調節的骨骼圖	1
§ B-2	自动电压調節器的分类	3
§ B-3	自动調節器制造史簡介	4

第一章 自動調節系統的分析方法

§ 1-1	自动調節線路的环節	6
§ 1-2	線性基本环節的微分方程式	8
§ 1-3	按照傳遞函数的形式对环節的分类	10
§ 1-4	非線性环節微分方程的線性化	10
§ 1-5	开路系統的微分方程式	14
§ 1-6	閉路系統的微分方程式	15
§ 1-7	加跳躍式擾乱后被調節量的定态值	17
§ 1-8	穩定判据	19

第二章 調節對象的特性和方程式

§ 2-1	直流發电机	24
§ 2-2	他激直流發电机	25
§ 2-3	並激直流發电机	29
§ 2-4	根据發电机空載特性計算 L_g	31
§ 2-5	同步發电机	32
§ 2-6	具有单独負載的同步發电机	35
§ 2-7	和电网並联工作的同步發电机	37
§ 2-8	同步發电机的复激	49
§ 2-9	复激同步發电机的微分方程	51

第三章 炭調節器

§ 3-1	量測機構	53
§ 3-2	量測機構的調整	55
§ 3-3	電磁鐵與反作用裝置的型式	56
§ 3-4	量測機構方程式	59
§ 3-5	量測機構的誤差	63
§ 3-6	量測機構定置的調整	69
§ 3-7	炭變阻器	71
§ 3-8	炭柱的特性	72
§ 3-9	炭柱的發熱工作情況	73
§ 3-10	炭變阻器的選擇	75
§ 3-11	由炭變阻器所產生的調節器誤差	79
§ 3-12	炭調節器 PУН 100 系列	82
§ 3-13	直流發電機和調節器閉路系統的方程式	84
§ 3-14	借助於阻尼器的鎮定 (Стабилизация)	85
§ 3-15	和線圈並聯電阻的鎮定	88
§ 3-16	用於同步發電機的炭調節器	91
§ 3-17	由炭調節器，激磁機及同步發電機所組成的閉路系統方程式	92
§ 3-18	借助於變壓器的鎮定	94
§ 3-19	發電機並行工作時炭調節器量測機構的復接	98

第四章 帶磁放大器的調節器

§ 4-1	具有理想磁化特性的磁放大器	99
§ 4-2	平均值 \bar{u}_X , \bar{u}_R 及 \bar{u}_\sim 之間的关系	107
§ 4-3	有效值 u_\sim , u_X 及 u_R 之間的关系	108
§ 4-4	控制線圈的電感	109
§ 4-5	功率放大系数	110

§ 4-6	控制線路的時間常數及其和功率放大系數的關係	111
§ 4-7	P_{HMAX} , K_p 和尺寸之間的關係	112
§ 4-8	實際 MY 的特性	114
§ 4-9	有直流負載的 MY	115
§ 4-10	硒整流器的選擇	117
§ 4-11	帶反饋的磁放大器	119
§ 4-12	自激磁放大器	123
§ 4-13	磁放大器的方程式	124
§ 4-14	用相似法設計磁放大器	126
§ 4-15	近似的相似法	132
§ 4-16	調節機構	134
§ 4-17	磁放大器的負載是單繞組激磁機的等值線路圖	142
§ 4-18	調節機構的方程式	143
§ 4-19	量測機構	146
§ 4-20	具有線性扼流圈及非線性扼流圈的線路	146
§ 4-21	具有飽和變壓器的線路	151
§ 4-22	放大機構	152
§ 4-23	具有磁放大器的調節器線路	154
§ 4-24	調節器閉路系統的穩定	156

第五章 電子離子調節器

§ 5-1	調節機構的線路	164
§ 5-2	放大機構的線路	165
§ 5-3	量測機構的線路	166
§ 5-4	反饋的線路	167

緒 論

在自动調節器这一門課程中，我們主要是研究自动电压調節器的各种問題。誠然，自动調節器的型类非常繁多，它們所調節的量也有各种各样的而並非僅僅电压一种。例如还有速度調節器，溫度調節器等等，但本課程將不拟述及，而僅就自动电压調節器的線路、結構、它們的定态工作情况和过渡过程的計算等方面加以研究。

电压調節器的任务有以下三方面：

- 1) 在一定範圍的線路段上将电压保持于一定水平；
- 2) 在發电机並联工作时，自动电压調節器应保証發电机之間的功率分佈一定。这在直流發电机的場合下为有功功率的分佈，而在交流同步發电机时，則为无功功率的分佈；

3) 在產生擾乱(Возмущение)时有保証衰減的調節过程。

調節系統电压擾乱的產生可由下列各种不同的原因引起：

- a) 發电机負載的變化；
- б) 汽車或飛機發电机轉速的改變；
- в) 对于和网路並联工作的同步發电机線路的切换，也就是某一線路的接入和切斷，这种情况可產生在正常工作时，也可產生在故障情況下；
- г) 对于电子穩压器則为線路电压的變化。

因此可見擾乱的多样性，而研究調節器时就要考慮到这些因素。

§ B-1. 自動調節的骨骼圖(Скелетная схема)

右圖表示一个調節系統的骨骼圖，其中 1——調節器，2——調節对象。調節系統的輸出量 u 在我們的場合下为被調節的电压。当產生擾乱时，輸出的电压 u 將信號傳入調節器中，因而產生調節作用。这样的系統称为閉路系統。自动調節系統都必須是閉路系統，开路系統不能產生調節作用。电压穩定器(Стабилизатор)則是属于开路系統的，这正

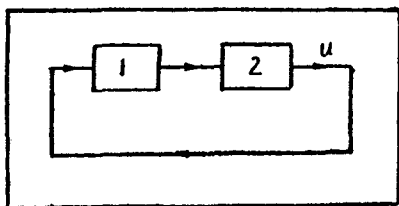


圖 B-1 調節系統骨骼圖

是它和自动电压調節器的差別。

电压調節器的調節对象可以是：

- 1) 直流發電机；
- 2) 帶有勵磁机的直流發電机；
- 3) 帶有勵磁机的同步發電机。

任何形式的調節器都有若干个机构 (Орган) 执行不同任务。圖 B-2 表示調節器的三个机构。輸入信号 u 進入量測机构 IO (Измерительный орган)，量測机构的輸出就是放大机构 УО (Усилительный орган) 的輸入。 x_1 的量可以是電的，也可以是機械的等等，它的大小是依被調節量和給与量之差。經放大机构中放大后的信号 x_2 即輸入調節机构 РО (Регулирующий орган)。調節器的輸出量 $x_{\text{вых}}$ 送至調節系統的調節对象。

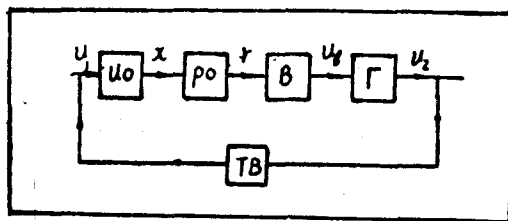


圖 B-2 調節器的器官

放大机构 УО 一般完成兩個任务：

- 1) 將量測机构的輸出加以放大；

2) 改變量測機構輸出量的物理性質。例如將直流電壓的 x_1 變換為相位角 x_2 ，或者將交流電壓的 x_1 ，變換為直流電壓的 x_2 。

放大機構有時完成上述兩個任務，有時只完成其中的一個。

某些調節器沒有放大機構，量測機構的輸出直接送入調節機構。這種調節器稱為直接作用式調節器。

除上述各種機構外，調節器還可能具有其他裝置，如：

6) 穩定裝置 (Стабилизирующее устройство)。它保證調節系統的穩定，並改進調節的質量；

2) 保證發電機並聯工作的裝置；

3) 強行激磁及去磁裝置；

4) 保護裝置。例如電子離子調節器中，當電子管損壞時起保護作用的裝置。

自動調節系統的骨骼圖可以是單回路的，如以上所述的那樣；但在很多場合下調節系統骨骼圖是多回路的，這時具有內反饋 (Внутренняя обратная связь) 或復激 (Компаундирование)，後者又分為調節器的復激和發電機的復激。這可參考索洛維葉夫著：動力系統自動化「電流穩定和電流補償」部份。

§ B-2 自動電壓調節器的分類

自動電壓調節器可以根據各種特徵來進行分類。下面舉幾種基本的分類方法。

1) 按調節對象的種類分有：

a) 直流發電機的調節器；

b) 同步發電機的調節器；

b) 穩壓器。它只維持負荷的電壓，而不影響發電機。

2) 按調節機構的作用原理分，則有：

a) 變阻調節器。有分段電阻調節器和碳阻調節器。前者是滲進地跳躍地改變電阻值，而後者則平滑地改變；

b) 振動式調節器。它的調節機構並聯於一電阻的觸頭。由於

触头的分合而將电阻接入切出，因而使激磁电流改變，而發电机电压維持在一定范圍內振动。这一电压由触头的分开時間和閉合時間的关系决定，即决定于：

$$\tau_z = \frac{t_z}{t_p + t_z},$$

其中： τ_z ——相对閉路時間（Относительное время замыкания）；

t_p ——触头分开的时间；

t_z ——触头閉合的时间。

- в) 电子离子調節器；
- г) 具有磁放大器的調節器；
- д) 具有电机放大器的調節器；
- ……………等等。

3) 按有无无差環節而分；

- а) 有差調節器（Статические регуляторы）；
- б) 无差調節器（Астатические）。

4) 按有无可动部分而分；

- а) 无可动部分的調節器，如电子离子調節器；
- б) 有可动部分的机电調節器。如碳阻調節器。

5) 按調節作用的性質分；

- а) 連續作用的調節器。如碳阻調節器；
- б) 間断作用的調節器。如振动式調節器，繼电器式調節器。

調節器还可以根据其它特征進行分类，这里不拟叙述。

§ B-3. 自動調節器制造史簡介

最早問世的自动电压調節器是机电調節器。1900—1920 年間出現交流發电机和直流發电机的 振动式調節器（就是称为 тирриль 的調節器），同时也有了分段电阻式的調節器。1920—1930 年这一期間，除了將以上兩種調節器改進外，並开始生產碳阻調節器。1930—1940 年間則是电子离子調節器獲得發展的階段，因为在这一时期中，电子学

有了蓬勃的發展。在 1940--1950 年間出現了电机放大器調節器，同时开始了帶磁放大器的自动电压調節器的研究及同步發電机的复激裝置的研究，于是自动电压調節器獲得了新的巨大發展。1950 年以后，自动調節器的發展方向在于改進和不斷完善磁放大器調節器，並且研究長距离輸电線中的电压調整裝置。由于近代技術的不斷發展，动力系統中的輸电線路將愈來愈長，例如古比雪夫水电站的輸电系統就標誌了这一特点，所以对自动电压調節器就提出了新的任务。

第一章 自動調節系統的分析方法

§ 1-1. 自動調節線路的環節

緒論中所述的骨骼圖是根据調節系統中各種元件而組成的。我們知道，調節系統中的元件可以是各種各樣而不勝枚舉的。因此，如果用這種骨骼圖來進行對調節系統動態的特性研究，顯然甚不方便。但如果我們應用調節系統結構圖（Структурная схема）來研究，則將較為適宜。這種自動調節線路結構圖由所謂基本動態環節（Элементарное динамическое звено）組成。

在許多場合下，自動調節系統可以分成許多定向結點（Детектирующий узел），它們的作用是單方向的。例如，一個不飽和的直流發電機（圖 1-1），如果忽略它的電樞反應。於是只有激磁電流 i_B 影響發電機的電勢 E ，而相反的影響則不存在，這樣就成為一個定向結點，它的作用方向如圖中箭頭所示。其方程式為

$$E = \Delta i_B.$$

如果發電機飽和，則情況相同，方程式則為

$$\Delta E = k i_B.$$

作為第二個例子可取如圖 1-2 的電子管線路，其中 a 為接線圖，b 為等值線路圖。這時柵極線路能影響陽極線路，而後者則不能影響前者。於是也成為一個定向結點。它的方程式為

$$\Delta E = \mu \Delta U_g.$$

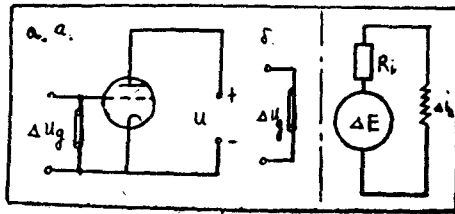
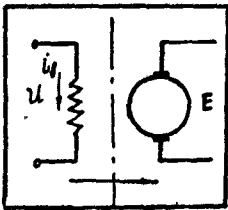


圖 1-1 他激直流發電機

圖 1-2 電子管線路及其等值線路

这样，調節線路就分成許多定向結点。而相鄰的兩個定向結点就組成基本动态环節。

將調節系統的線路分析成基本动态环節的方法所以优越，在于根据这一原則所得到的各个环節，当其单独被提出研究或者联接于系統中進行研究时，它的方程式都将是相同的。于是我們就有可能把整个線路分割开来討論。

举例說明，圖 1-3 中表示一个电子管調節器的开路系統，它由前已举出的兩個定向結点組成，应用以上所述基本动态环節的定义就可以得到如圖 1-36 中的三个环節 1, 2 及 3。它們所組成調節系統的結構圖就如圖 1-3B 中所示。

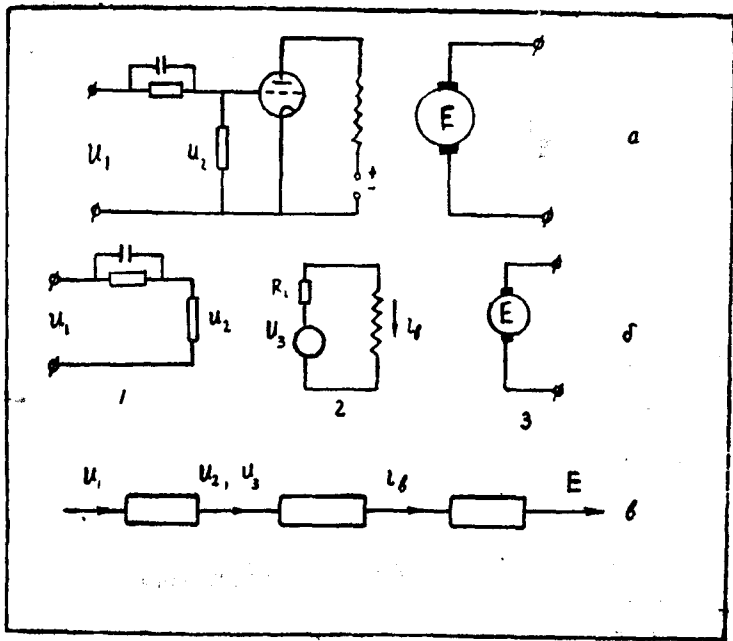


圖 1-3 自动調節線路結構圖 4 例

§ 1-2. 線性基本環節的微分方程式

圖 1-4 中舉一個線性基本環節。它的輸入量用 x_{BX} 表示，輸出量用 x_{BYX} 表示，它們的物理性質則可以是各種不同的量，例如電量，機械量等等。現在我們只看一般情況，仍以上述符號表示。環節的方程式在自動調節原理中都應用運算微積的算子方程式表示。並且寫成標準形式，就是輸出量置於等式左方，而輸入量位於右方。它們的係數寫成算子的多項式。

先舉一個例子來看，有激磁電路如圖 1-5，其中有電阻 r 及電感 L ，它的輸入量和輸出量各為：

$$x_{BX} = U;$$

$$x_{BYX} = i.$$

寫出該電路的基本微分方程式：

$$U = ir + \frac{d\psi}{dt} \dots\dots\dots(1-1)$$

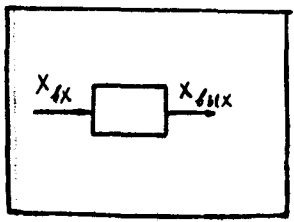


圖 1-4 基本環節

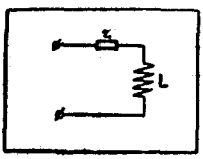
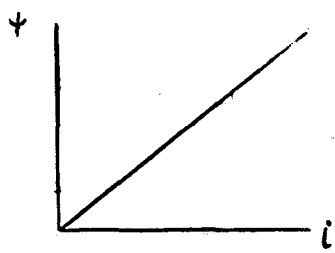


圖 1-5 a 激磁電路

1-5 δ



1-5 δ $\psi = f(i)$

考慮到

$$\psi = Li,$$

当环節为線性时， ψ 和 i 有直線关系，見圖 1-56 因此就有：

$$L = \text{const},$$

由此得線性微分方程式：

$$U = ir + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (1-2)$$

激磁电路饱和时， L 不是常数，因此这一方程式就不再正確。

將方程式 (1-2) 經拉普拉斯變換，即使

$$\frac{d}{dt} \longrightarrow p,$$

則可寫成算子形式的微分方程式：

$$ir + Lpi = U,$$

經改寫后，可得以下形式：

$$(1 + Tp)i = kU \dots\dots\dots (1-3)$$

其中

$$T = \frac{L}{r}; \quad k = \frac{1}{r}.$$

方程式 (1-3) 就成为具有标准形式的方程式。它左方輸出量之的乘数 $(1 + Tp)$ 称为环節的固有算子 (Собственный оператор звена)，用符号 $d(p)$ 表示：

$$d(p) = 1 + Tp.$$

这里 T 是环節的时间常数。方程式 (1-3) 右方輸入量的乘数 k 称为环節的放大系数 (Коэффициент усиления звена)。它可以是有單位的，也可能是无單位的。在我們的例子中它的單位为 $1/\Omega$ 。在方程式 (1-3) 中 k 为一个自由量，但在很多場合下它为算子 p 的多項式，並寫成 $k(p)$ 。

这样，可以將線性基本环節的方程式寫成以下的一般形式：

$$d(p)x_{\text{вых}} = k(p)x_{\text{вх}} \dots\dots\dots (1-4)$$

环節的放大系数和固有算子的比值称为环節傳遞函数 (Передающ-

ная функция звена) 即:

$$y(p) = \frac{k(p)}{d(p)}.$$

§ 1-3. 按照傳遞函數形式對環節的分類

根据傳遞函數的形式可以將調節系統的基本動態環節分為以下數類:

1) 若 $k(p)$ 的多項式, 則稱為微分環節 (Дифференцирующее звено)。

2) 若 $d(p)$ 具有公共乘數 p , 稱為無差環節 (Астагическое звено) 或稱積分環節 (Интегральное звено)。例如:

$$d(p) = (1 + Tp)p.$$

3) 若 $d(p)$ 具有常數自由項, 稱為有差環節 (Статическое звено)。它還可分為以下數種情況:

a) 若 $d(p)$ 只有自由項, 即

$$d(p) = 1,$$

則稱為無慣性環節 (Безинерционное звено);

b) 若 $d(p)$ 為算子的一次式

$$d(p) = Tp + 1,$$

則稱為一階慣性環節 (Инерционное звено первого порядка);

в) 若 $d(p)$ 為算子 p 的二次式

$$d(p) = T_1^2 p^2 + T_2 p + 1,$$

則稱為二階慣性環節 (Инерционное звено второго порядка)。它的特例為:

$$d(p) = T_1^2 p^2 + 1,$$

稱為保守環節 (Консервативное звено)。

§ 1-4. 非線性環節微分方程式的線性化

在許多情況下, 調節系統含有非線性環節, 所以它們的微分方程式是非線性的。我們知道, 非線性微分方程解之甚難, 如果用解析法, 只能