

128231

高等学校教学用书

动力系统的自动化

下 册

苏联 И. И 索洛维叶夫著

电力工业出版社

032.2

高等学校教学用书

动力系统的自动化

下 册

苏联 И. И. 索洛维叶夫著

清华大学发电厂及电力系统自动化教研组 译
北京水力发电设计院电工组
程 式 吳君平 顧廉楚校訂

苏联高等教育部审定作为动力和电工院系的教材

电力工业出版社

动力系统的自动化(下册)专门讲解动力系统的电压和频率的自动调节问题。书中首先介绍了自动调节的一般知识和基本概念,然后分别叙述电压和频率的自动调节、事故性频率下降时动力系统的自动减负荷和自动解列,最后还讲解了自动调节的理论基础。

本书是动力和电工院系的教科书,但也可供从事动力系统自动化工作的技术人员阅读。

И. И. СОЛОВЬЕВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1956

动力系统的自动化 下册

根据苏联国立动力出版社 1956 年莫斯科修订第 2 版翻译

清华大学发电厂及电力系统自动化教研组 译
北京水力发电设计院 电工组

程 式 吳君平 顧廉楚校訂

*

641 D 236

电力工业出版社出版 (北京府右街26号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第 082 号

北京市印刷一厂排印 新华书店发行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本 * 10 $\frac{1}{2}$ 印张 * 223千字 * 定价(第10类)1.30元

1957年9月北京第1版

1957年9月北京第1次印刷(0001—5,100册)

目 录

下册 动力系统中电压及频率的自动调节

第七章 有关自动调节的一般知识	3	9-4. 在保持频率恒定时调节过程 按时间演变的特性	66
7-1. 引言	3	9-5. 动力系统中频率调节和在机 组间分配有功负荷的基本 方法	67
7-2. 关于调节的概念	3	9-6. 涡轮机旋转角速度的调节器	70
7-3. 动力系统中自动调节的任务	3	9-7. 自动频率调节器(APH)	76
7-4. 自动调节装置的基本元件及 其功用	4	9-8. 调频器的比例作用范围和失 灵区的选择	98
7-5. 调节特性的概念	5	9-9. 按照系统偏差角积分(同步 时间)的频率调节	98
7-6. 调节稳定性的概念	6	9-10. 在大容量动力系统中具有给 定有功功率分配的频率调 节的特点	100
7-7. 调节方法的概念	6	9-11. 在联合动力系统中调节频率 和交换功率的特点	105
7-8. 习题	8	9-12. 按水力资源的经济利用自动 调节水电厂的有功功率	108
第八章 发电机电压的自动调节 (调节的静态学)	8	9-13. 习题	113
8-1. 总论	8	第九章附录(П-9)	113
8-2. 发电机的强行励磁及自动电 压调节的原理	11	第十章 频率事故下降时动力系统 的自动减负荷和自动解 列	120
8-3. 机电强行励磁装置	13	10-1. 自动事故减负荷	120
8-4. 机电型电压调节器(APH)	13	10-2. 动力系统按频率自动事故减 负荷装置	125
8-5. 电子离子型电压调节器	18	10-3. 因发电厂与动力系统解列而 发生发电容量的缺额时的 自动按频率事故减负荷	133
8-6. 并联工作的发电机间无功负 荷的自动分配	24	10-4. 线路的自动事故减负荷	134
8-7. 发电机的复式励磁	33	10-5. 当发电机失步时动力系统的 自动事故解列	134
8-8. 苏联电气工业部电气自动实 验室(ЦНИИЭА)的带有电 机放大器的电压调节器	43	10-6. 习题	135
8-9. 具有离子励磁机的发电机的 电压调节	45	第十一章 自动调节的理论基础 (调节的动态学)	135
8-10. 自动电压调节器参数整定的 计算	46		
8-11. 习题	62		
第九章 频率的自动调节(调节的 静态学)	63		
9-1. 总论	63		
9-2. 调节特性	64		
9-3. 有差调节特性下并联发电机 之间有功负荷的分配	65		

11-1. 总論	135
11-2. 稳定和不稳定的自动調节系 統的概念	136
11-3. 关于閉合和敞开自动調节系 統的概念	136
11-4. 关于放大系数的概念	137
11-5. 表示調节稳定性和質量的放 大系数和調差系数之間的 关系	138
11-6. 調节系統的元件或环节	139
11-7. 自动調节系統微分方程式的	

列出和分析	144
11-8. 自动調节系統稳定性的准則 ...	147
11-9. 自动調节系統中放大系数和 調差系数間的相互关系	154
11-10. 保持自动調节稳定时提高系 統放大系数的方法	154
11-11. 反饋裝置	154
11-12. 列出自动調节系統微分方程 (为分析稳定性用)的举例 ...	157
11-13. 習題	161

第七章 有关自动调节的一般知识

7-1. 引言

在上册中所讲的自动装置是用来根据给定的工作条件改变电力设备中某一元件的位置用的，因此这类装置是属于控制电力设备的自动装置类的。

这些装置的动作是不经常的，短时间的，有时甚至于是极少动作的。

自动调节技术则在一定的程度上是一个独立的领域。一般地，自动调节装置在它们所控制的机器或其他装置工作着的全部时间内实际上是连续作用着的。自动调节装置的构造是各式各样的，这决定于它们所担负的任务，也决定于运用的条件及地点。但是自动调节技术所依据的基本规律在很大的程度上是共同的。

在开始讨论自动调节装置的动作原理及运用方法之前，让我们先来讨论一下为了了解这些方法和原理所必需的几个一般概念。

7-2. 关于调节的概念

“调节”就是维持某个被调量在一个不变的预定的水平上的过程或者是使该被调量按照预定的规律变化的过程。

作为一个例子，让我们看看图 7-1 中所画的最基本的动力系统，其中包括汽轮机 T ，发电机 G ，具有阻抗 Z_L 的输电线路，以及将电能送到用户去的变电所母线。

大家都知道，为保证用户的正常工作，交流电的频率 f 和向用户供电的变电所母线电压 U_{np} 在整个动力系统的运行情况变动时和额定值间的偏差不应超过容许

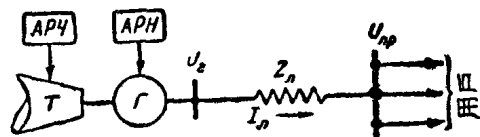


图 7-1 基本动力系统图

的范围。如果要满足这些条件，那就必须在用户的负荷变动时发电机所发的有功功率也应相应地改变，同时，发电机的端电压 U_g 也应按照大家所非常熟悉的下述等式变化：

$$U_g \approx U_{np} + I_L Z_L \quad (7-1)$$

调节可以用手进行也可以自动进行。

如果在图 7-1 的发电机和汽轮机上装了自动频率调节器 (APV) 和自动电压调节器 (APH)，那末前者将自动地保持被调节的频率不变，而后者 (APH) 将按照预定的规律 [等式 (7-1)] 自动地改变电压 U_g 。在没有装置 APV 及 APH 时，它们所执行的任务就要由工作人员用手来完成了。

经验证明，手调频率的效果是很差的，手调电压的方式也是不允许采用的，因为这种调节不能保证动作上必要的速度。

7-3. 动力系统中自动调节的任务

动力系统的电气部分需要自动调节的基本量是电压和频率以及和它们密切相关的发电机无功功率和有功功率（补偿机的无功功率也算在内）。

交流电的电压和频率标志着现代动力系统的电能质量。

在最理想的情况下，用户处的电压和频率应该是不变的，应经常等于额定值。为满足这一要求，动力系统中不同点的电

压相互間可能是不相等的 [考虑到电压降和电压的变换(参看 7-1)], 同时, 交流电的頻率則在动力系統中所有的点上都是一致的。

在动力系統运行的过程中, 不論是所消耗的功率或者是發电机或补偿机相应地發生的功率都是在不间断地变化着的。在沒有調节的情况下, 这些功率的变化会引起系統中电压及頻率对額定值的偏差, 从而使得傳送給用戶的电能質量变坏。

电压和頻率在事故条件下所發生的变化最为剧烈, 例如, 当電網中發生短路, 大容量的發电机突然切断, 等等。在这些条件下, 送到汽輪机的机械功率和發电机送出的电功率間的平衡关系將遭到破坏。于是个别發电机可能获得較其他發电机大得多的加速度并失去同步, 因而破坏了系統的穩定运行状态。

动力系統的运行經驗指出: 从系統穩定运行的观点来看, 頻率的調节, 尤其是电压的調节, 具有無可比拟的重要性。至于在动力系統中采用自动調节的經濟效果虽然不能簡單地估算, 但是这效果是極其巨大的。

在現代条件下, 由于动力系統穩定性遭到破坏而引起的事故会給国民經济帶來極大的物質損失。在动力系統裝备了自动調节裝置以后, 發生这类事故的或然率就变得很小了。

为維持动力系統电压及頻率在适宜的水平上, 必須相应地改变發电机的励磁以使电压恢复, 并改变进入透平机的动力因素(如蒸汽、水、等等)以使頻率恢复。

这些为保証电压、頻率及發电机負荷維持在給定的水平上或使它們按照給定的規律变化所采取的措施的总和, 構成了动力系統中基本电量調节上的主要内容。

能自动执行上述作用的裝置叫作調节裝置, 或簡称調节器。自动調节器的全部

元件和参加自动調节过程的各种机器形成一个自动調节系統(САР)。

自动調节的創始人是俄罗斯偉大的学者、發明家和革新家 И. И. 波尔松諾夫(И.И.Ползунов)。还在 1763—1765 年間他就在历史上第一个發明了并做出了用在他自己造的“火动机”^①(即蒸汽机)鍋爐中的水位自动調节裝置。所有后来各門各类自动調节技术的發展, 基本上都根据他所建立的这样一条規律: 調节裝置的动作决定于被調量的实际值和給定值之間的差数(或为可以使被調量改变的各个因素的实际值和給定值之間的差数)。

調节規律的研究通常可以分成二部分: 即調节的靜态学和动态学。

所謂調节的靜态学就是在穩态过程的条件下确定被調量和促使被調量改变的因素之間的給定关系的学术。至于調节的动态学則是研究自动調节系統由一个穩定状态轉变为另一个穩定状态时过渡过程規律的学术(参看圖 7-4 及 11-1)。

7-4. 自动調节裝置的基本元件及其功用

在被調量和給定值之間出現偏差时, 調节器应能确定被調量的偏差的数值及其符号, 并使被調量回到原值或轉到調节的条件所規定的別的新值上去。

每一个調节器照例都由以下各基本機構組成, 有的是明显区分成一个个機構的, 有的則是不明显的(見圖 7-2):

a) 量測機構, 它的功用是反映被調量与給定值的偏差的数值及符号;

б) 傳送放大機構, 能把由量測機構来的作用放大并傳送到执行機構去;

в) 执行機構, 能使一次因素作相应的改变, 該因素能使被調量回返到原值, 或

^① 見 И. Я. 康非捷拉特著“依凡·依凡諾維奇·波尔松諾夫”一書 ГЭИ, 1951。

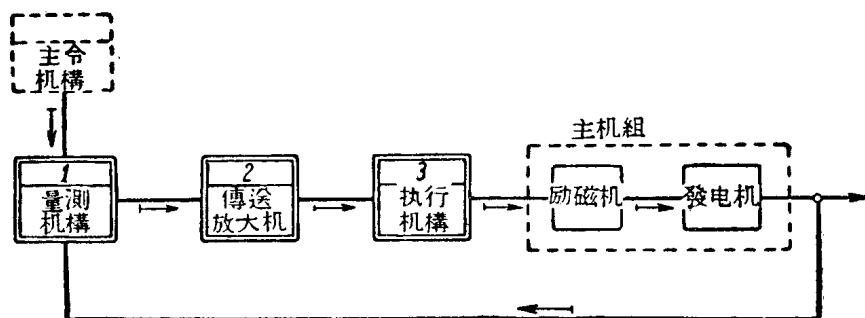


圖 7-2 調節系統基本機構的相互作用圖

轉到另一新的給定值。

此外，在調節裝置中還可能有其他的附加機構，例如可能有所謂給定機構，其作用是規定被調量的給定值以便和它的實際值比較。但是，在絕大多數現代構造的調節裝置中給定機構一般地是不能明顯地看出來的。除此之外，在調節裝置中還有反饋裝置，用以穩定調節過程；還有調差系數裝置，用來給定一定的調節特性；有功功率分配裝置，以及其他裝置。

上述各種機構和裝置不是在同一時間全部被利用的。

各個機構的內部構造及不同機構在各種型式調節裝置中的結合是千變萬化的。

現代的自動調節器是根據機電的，電子離子的，電機的以及電磁的原理的不同形式的結合而作成的。

7-5. 調節特性的概念

自動調節系統可以處在不變的穩定平衡狀態下，也可以處在由一個穩定狀態變為另一穩定狀態的過渡過程中。

任何新的穩定平衡狀態只可能在下述情況下才能出現，即：被調量回復到原值時（即過渡過程開始前所具有的數值）或當被調量具有和它的給定的變化規律相應的某一新值時。

第一種情況下的調節可用一條平行於橫軸的直線 a 來表示它的特性（見圖 7-3），

第二種情況可用直線 b 表示。圖中 y 為被調量， x 為促使被調量改變的因素。

直線 a 和 b 叫做調節特性；調節特性在更廣泛的意義上來說也有可能不是一條直線。

第一種情況下的調節是定值的；第二種則是變值的。在文獻中，這類特性（以及與它們相應的調節規律）相應地具有下列名稱：直線 a 叫做無差特性，直線 b 叫做有差特性。

在按照無差（定值）特性調節的情況下，被調量的穩定值是始終不變的，不管引起它變動的因子 x 的大小如何。

在按照有差（變值）特性調節時，相應於因子 x 的每一個數值都有一個新的穩定的被調量 y 的值。

被調量 y 隨着因子 x 的變化而改變的程度叫做調差系數或調差程度，這個量是用下式所表示的調節特性曲線的斜度來決定的（見圖 7-3）：

$$k_c = \frac{y_n - y_0}{y_n} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (7-2)$$

式中 $y_n = 1$ —— 在 $x = 0$ 時被調量的額定值；

y_0 —— 在 $x = 1$ （即額定值）時被調量的實際值；

k_c —— 調節特性的調差系數或調差程度。

y 值及 x 值經常用標么值來表示。

为了便于计算调差系数，常用百分数来表示：

$$k_c\% = \frac{y_n - y_0}{y_n} \cdot 100. \quad (7-2a)$$

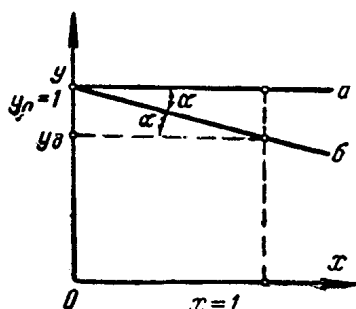


圖 7-3 調節特性曲線
a—無差的；b—有差的。

7-6. 調節穩定性的概念

在一般情況下，調節是一個振盪的過程，這個過程可能是穩定的，也可能是不穩定的。

被調量對本身額定值（給定值）的偏差是由調節裝置（即調節器）的量測機構來覺察的。

但是調節器的執行機構開始改變自己的動作的时间總是要比量測機構的相應的動作開始的时间要晚一些。如果在執行機構動作延後的這段時間內被調量又變化到額定值上，同時量測機構的作用又重新返回到原值，這時由於惰性的關係執行機構將在一定時間內繼續作用着，向着已經接受到的作用方向去改變被調量。

由於這個原因，就出現了所謂過調現象，也就是，被調量穿過給定值而變到和初期的偏差相反的方面去了。這時調節器也把自己的作用改到反方向，並相應地改變被調量等等。這種現象的重複就造成了振盪過程，在大多數情況下這個過程是衰減性的，這時振盪的振幅將逐漸減小，被調量將最後穩定在一個不變的水平上（參看圖7-4,a）。但在某些情況下振盪的振幅可能逐漸加大（參看圖7-4,b），在這種情況下

調節系統的穩定工作就遭到破壞，換句話說就是：該系統決定地脫離了穩定狀態。

在第一种情况下的調節是穩定的，而第二种則是不穩定的。

必須指出：在使用現代調節工具的情況下也可以使被調量按照非週期規律，即沒有振盪地改變（參看圖7-4,c）。但是這種情況下的調節過程一般都是比較長的。

7-7. 調節方法的概念*

從覺察被調量的偏差程度（該程度足夠使量測機構改變它對執行機構的作用）的觀點來看，共有兩種基本的調節形式，一種是按照瞬時偏差的調節，另一種是按照一定時間內被調量的偏差總和來調節。

在第一种情況下，調節器的量測機構在被調量對額定值有一定的瞬時偏差時改變對執行機構的作用。這種方法不論在電壓調節或是頻率調節中都是廣泛採用的。

在第二种情況下，調節器的量測元件是按照某一段時間內被調量瞬時偏差的積累去改變自己對執行機構的作用。這種調節方法是為動力系統的頻率調節而研究出來的，但現在尚未廣泛應用。

由影響被調量所採用的方法來看，所有的調頻調壓裝置可以分為兩種基本型式，一種是連續動作裝置，另一種是斷續動作裝置或稱脈衝動作裝置。

在連續調節時調節器的量測機構連續地作用在它的執行機構上。在斷續（或脈衝）調節時調節器的量測元件以短時脈衝作用在它的執行機構上，並且在被調量越是接近給定值時脈衝也就逐漸越來越小。

由調節器影響被調量的強度上看，調節方法也可以分為兩種最基本的方法：一種是比例調節法，另一種是比例加速調

* 本節材料只是針對動力系統中電壓和頻率的調節而編寫的，並打算講得很全面。

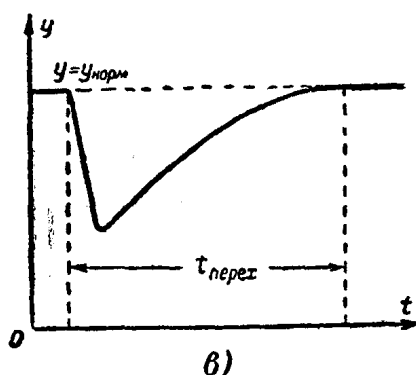
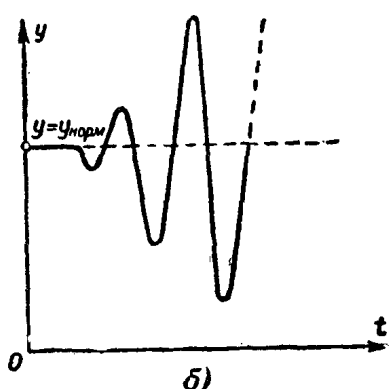
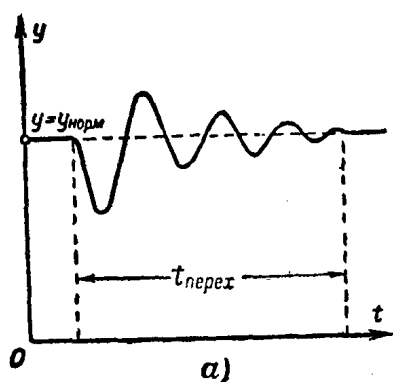


圖 7-4 被調量在調節過程中的變化曲線
a—穩定調節時的振盪過程；б—不穩定調節
時的振盪過程；в—穩定調節時的非週期過渡過程。

節法(即利用導數的調節法)。

圖 7-5, a 中的圖形可以說明比例脈衝調節法的过程，在這过程中調節器將週期地產生它的調節作用(圖中 PB)，調節作用的數值是和被調量 y 對額定值的偏差成正比的。這時，當被調量逐漸接近給定值時脈衝的持續時間即逐漸減小。在利用這種方法調節時可以消除或至少在任意情

況下可以限制過調現象的發生，因為在調節器的每一個短時作用之後都有一定的間隔，這些間隔可以促使被調量穩定在額定值而不發生過調現象。這就是脈衝調節法的優點。

這種方法的缺點是調節裝置在構造上比較複雜和可動元件在長期運行中的易于磨損，因而在必要時必須進行校正和替換這些元件。

圖 7-5, б 中所示的圖形表示出連續比例調節的特點。在這種調節方法下的調節持續時間 t_p 一般都要比前一情況下的少。

較前一種方法具有顯著的原理上的優點的是另一種方法——利用導數的“比例加速調節法”。在這種情況下，調節器所產生的調節作用不但決定於被調量的偏差，而且也決定於偏差變化的速度，這就需要在調節裝置里添加附加元件。

因為這樣做肯定的要使調節裝置複雜化，也就因為這樣將要降低裝置的可靠性，因此實際上在大部分情況下只限於採用一次導數裝置，二次的就比較少，只有在極其特殊的情況下才採用更高次導數的裝置。

圖 7-5, в 所示為具有一次導數的比例調節过程。由比例調節和導數調節所產生的作用被相加起來。這在調節过程的開始、被調量具有較大偏差時，將大大加速調節的現象。

在以後的各振盪循環中被調量的偏差和它改變的速度都減小；反映導數的元件所產生的附加調節作用也減小了。所以放平被調量振盪的條件在过程接近結束時是和沒有導數元件的情況差不多的，但是整個調節过程是大大縮短了。

我們必須注意到，凡是調節器必須滿足的原則和理論上的要求越高，它的結構就越複雜，動作的可靠性也越低。所以在每一個別情況下採用這一種還是另外一種

調節器的問題，是必須根據具體要求和實際上的合理性來個別解決的。

7-8. 習 題

7-1. И. И. 波爾松諾夫所發現的構成自動

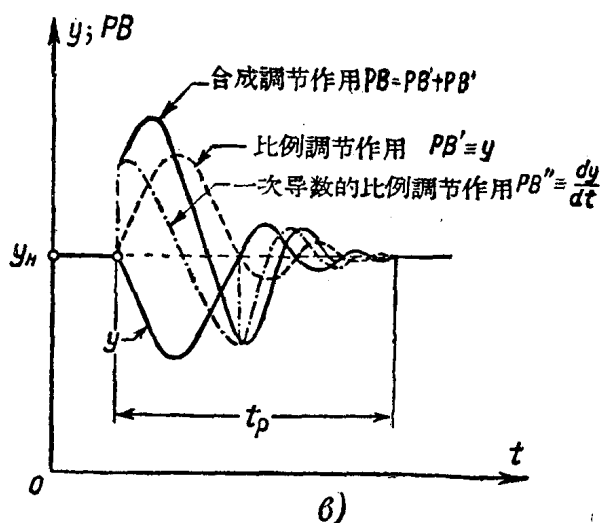
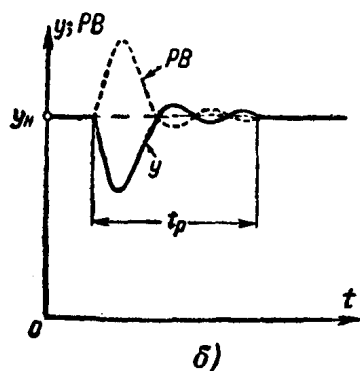
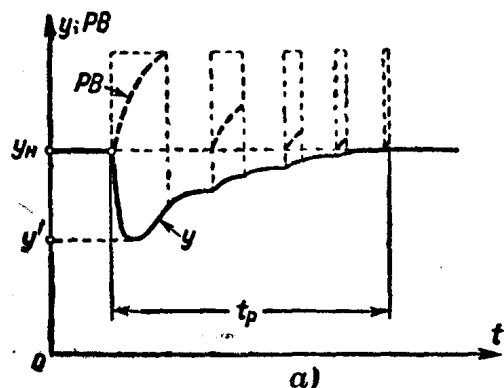


圖 7-5 調節裝置的工作情況

a—比例脈沖調節；b—比例連續調節；c—帶一次導數的比例連續調節。

第八章 發電機電壓的自動調節

(調節的靜態學)

8-1. 總 論

a) 自動調節勵磁的用途

圖8-1,a所示為同步發電機(作為動力系統電氣部分的一個元件)的電壓調節系統的原理圖。

假定發電機電壓 U_i ，電流 I_i 和電動勢 E_i 之間在某一平衡狀態下的穩態情況可用如圖8-1,b所示的簡化向量圖來表

示。

我們知道，如果對應於電動勢 E_i 的發電機勵磁電流 $i_{a,i}$ 是不變的話，那末當發電機電流 I_i 變化時，機端電壓 U_i 就會變化。要維持電壓不變，就必須變更發電機勵磁電流 $i_{a,i}$ (轉子電流 i_p)。一般這可由改變勵磁機勵磁迴路內的電阻 $R_{p,\sigma}$ 來得到。這一任務可以由運轉人員用手調來實現，或是利用特殊的自動電壓調節裝置

調節裝置的原則是什麼(該原則作為以後自動調節裝置技術發展時成為構成所有調節器的基礎)?

7-2. 連續調節和脈沖調節比較起來各有何優缺點?

7-3. 具有導數的和具不具導數的連續比例調節法比較起來各有什麼優缺點?

7-4. 調節器的量測元件在按無差特性及按有差特性調節時的動作中各有何基本特點?

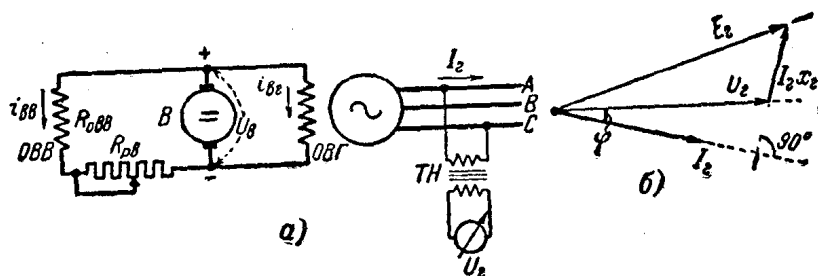


圖 8-1 發電機電壓調節系統原理圖

a—電壓調節系統圖；b—同步發電機向量圖；B—勵磁机电阻；
OBB—勵磁機勵磁繞組；OBT—發電機勵磁繞組；TH—電壓互感器。

(APH)自動進行，在文獻中也有稱之為自動調節勵磁裝置(APB)的。

手動調節只能用在動力系統正常工作情況下，並且電廠上必須有人經常值班。

在事故情況下，要求很快地（若干分之一秒以內）改變發電機的勵磁，這一任務只好用特殊的自動調節裝置(APH)來自動地實現。

在沒有值班人員的自動化電廠里，發電機電壓的調節不論是在事故或是在正常運行情況下，都只有靠自動裝置來實現。

直到不久以前，發電機的自動電壓調節裝置的主要作用還只是為把發電廠或變電所的母綫上電壓在正常工作條件下維持在一定的水平。這樣，發電機勵磁電流值當然不會超出額定值的極限。有時候調節器甚至还裝有特殊的電流限制器，當定子電流超過額定值時該限制器即降低發電機的勵磁。

現在，自動電壓調節器所起的作用是大大地擴大了。在蘇聯電站部技術司(И. А. Сыромятников)領導下所做的研究，以及蘇聯電力系統運行中積累的經驗證明了：在事故情況下，快速升高發電機勵磁使超過額定值(強行勵磁)，對於提高發電機並聯工作的穩定性及維持電動機的運行是主要的和最有效的手段之一。達到這點最簡單的方法是利用繼電強行勵磁裝置把勵磁機勵磁繞組迴路中的外電阻全部短路(見後面)。

此外，強行勵磁及利用無失靈區的電壓調節器(關於這點，下面要談到)可以大大地提高遠距離輸送到系統中的極限功率。這一問題，蘇聯早在1937年已經在理論上和實際上解決了(列別節夫 С. А. Лебедев, 日丹諾夫 П. С. Жданов, 馬可維奇 И. М. Маркович 等人)。

因此，在目前情況下，自動電壓調節裝置的主要任務可以歸結如下：

1)在電力系統正常工作條件下，維持電壓于一定水平(給定的)；

2)在電網中發生短路時及在無功電源事故切斷時，提高動力系統發電機並聯工作的穩定性；

3)在通向系統的遠距離重負載的輸電綫上，提高輸送功率的極限；

4)在電網中發生短路時，由於短路電流增大，提高繼電保護裝置動作的可靠性。

蘇聯電站部在電廠及電網技術運行法規中就規定了在電力系統中應採用自動電壓調節裝置及繼電強行勵磁裝置。根據這法規第637條，一切發電機及同步補償機皆應裝設繼電強行勵磁裝置，此外，容量在3千瓩及以上的發電機和同步補償機應該裝有自動電壓調節裝置。所有這些裝置都應如此整定：即當電壓降低時，能夠利用上最大勵磁電流。

必須指出，發電機電壓調節的效果不僅決定於調節器的質量，也決定於勵磁機

的特性。

6) 励磁机的基本特性

由提高发电机并联工作稳定性的观点出发，要求励磁系统应能保证在最短的时间内，使电压上升到最大值(强行励磁)。

当强行励磁时励磁机机端电压增长的时间。

在圖8-2, a中画了自励的励磁机(圖8-1)的激磁曲线 $U_g = f(i_{g.g})$ 及电压降落直线 $i_{g.g} R_{0.g.g}$ 。

在励磁机励磁回路中，对每一个励磁电流数值 $i_{g.g}$ 它的电压方程式为：

$$\Delta U_g = w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8-1)$$

式中 w ——励磁绕组的匝数；

Φ ——由电流 $i_{g.g}$ 所产生的磁通；

ΔU_g ——激磁曲线及 $i_{g.g} R_{0.g.g}$ 电压降落直线间的电压差。

当把圖8-1中电阻 $R_{p.g}$ 短路时，磁通与电压将分别地达到最大值(頂值) Φ_m 及 $U_{g.m}$ 。

我們知道，
$$\frac{\Phi}{\Phi_m} = \frac{U_g}{U_{g.m}}. \quad (8-2)$$

將(8-2)式对 t 微分，移项后可得：

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{dU_g}{dt} \cdot \frac{\Phi_m}{U_{g.m}}. \quad (8-3)$$

把(8-3)式中的 $\frac{d\Phi}{dt}$ 值代入(8-1)式

中，可得：

$$\Delta U_g = w \frac{\Phi_m}{U_{g.m}} \cdot \frac{dU_g}{dt}, \quad (8-4)$$

因 $w\Phi_m = L_{0.g.g} i_{g.g.m}$ (8-5)

及 $U_{g.m} = i_{g.g.m} R_{0.g.g}$, (8-6)

故从(8-4)式并計及(8-5)和(8-6)式可得：

$$\Delta U_g = \frac{L_{0.g.g}}{R_{0.g.g}} \frac{dU_g}{dt} = T_{0.g.g} \frac{dU_g}{dt}, \quad (8-7)$$

式中 $T_{0.g.g} = \frac{L_{0.g.g}}{R_{0.g.g}}$ ——励磁机励磁繞

組的时间常数。

由(8-7)可得：

$$dt = T_{0.g.g} \frac{dU_g}{\Delta U_g},$$

积分之，可得：

$$t = T_{0.g.g} \int \frac{dU_g}{\Delta U_g}. \quad (8-8)$$

实际上，时间 t 是用圖解法决定的，

为此，在圖8-2, b及在圖8-2, c中分別作 ΔU_g 及 $\frac{1}{\Delta U_g}$ 对应于 U_g (圖8-2, a) 的关系曲线。

然后在圖8-2, c的 U_g 軸上由零到 $U_{g.m}$ 等分几个 δU_g 的間隔，并在每个間隔中找出 $\frac{1}{\Delta U_g}$ 的平均值。励磁机电压由0

上升到 $U_{g.m}$ 所需时间，可利用圖8-2, c, 按近似公式(圖8-2, z)

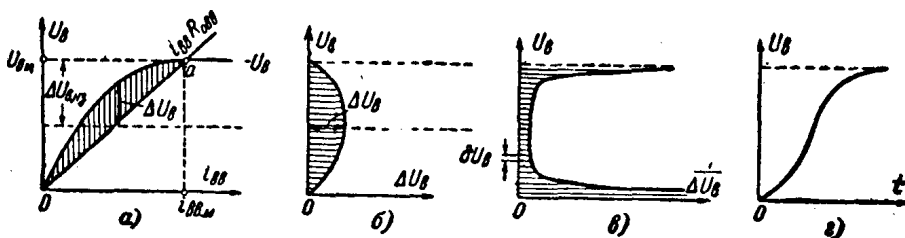


圖8-2 在强行励磁时，用圖解法决定励磁机电压上升速度

a— $U_g = f(i_{g.g})$ 及 $i_{g.g} R_{0.g.g} = f(i_{g.g})$ 之关系；b— $\Delta U_g = f(U_g)$ 之关系；c— $\frac{1}{\Delta U_g} = f(U_g)$ 之关系；z—电压上升速度 $U_g = f(t)$ 。

$$t = T_{o.e.e} \left[\frac{\delta U_{e1}}{\Delta U_{e1}} + \frac{\delta U_{e2}}{\Delta U_{e2}} + \dots + \frac{\delta U_{en}}{\Delta U_{en}} \right],$$

或按

$$t = T_{o.e.e} \delta U_e \sum_{1}^n \frac{1}{\Delta U_e}. \quad (8-9)$$

求出。

如果电压的上升不是由零开始的，而是由某一个中间数值开始的，那末计算就在从电压的给定值 U_e 直到 $U_{e.n}$ 的这一阶段中进行。

如果励磁机是它励的，则在图 8-2, 6 上应取的横坐标为按图 8-2, a 由 $i_{e.e} R_{o.e.e}$ 降压直线到常数值 $U_{e.n}$ 的长度，即如图 8-2, a 中所示 $\Delta U_{e.ns}$ 值。

其余的计算步骤与前面一样。

电压上升速度。是以在 0.5 秒时间内电压变化的平均速度 $\left(\frac{dU_e}{dt}\right)_{cp}$ 对励磁机额定电压的比数来表示。

$\left(\frac{dU_e}{dt}\right)_{cp}$ 值可以用直线 ob (图 8-3) 的倾斜角的正切来表示，这直线在 0.5 秒的

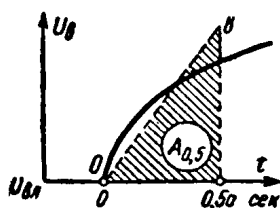


图 8-3 说明励磁机平均电压上升速度概念的插图

时间间隔内所局限的面积 $A_{0.5}$ 应与从 $U_{e.n}$ 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， $\left(\frac{dU_e}{dt}\right)_{cp} = (0.8 \sim 1.2) U_{e.n} / \text{秒}$ 。它励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。

强行励磁倍数。强行励磁倍数系指在强行励磁时励磁电压与额定电压的比值，

即

$$k_{U\Phi} = \frac{U_{e.\Phi op}}{U_{e.NO.M}},$$

或为与它们对应的电流的比值：

$$k_{i\Phi} = \frac{i_{e.\Phi op}}{i_{e.NO.M}}.$$

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。

我们知道，在电网发生短路时，转子电流是等于励磁机电流与在转子绕组中引起的瞬变电流之和。由于瞬变电流是要衰减的，为要保持转子电流与对应的磁通及瞬变电势 E'_d 在短路时为常数，则必须在瞬变电流衰减以前励磁机电流能等于短路开始时转子的全电流。

要达到这一点，发电机必须强行励磁到 $(3-4) i_{NO.M}$ 。

现代励磁机的最大强行励磁倍数为 $(1.3-2) i_{NO.M}$ ，因之不能满足上述条件。

近来正在研究并进行试验新型的能保证必要强行励磁倍数的，电机型或离子型励磁系统。

8-2. 发电机的强行励磁及自动电压调节的原理

a) 分类

现在已知的各种自动电压调节装置，按其作用原理可分为两大类：

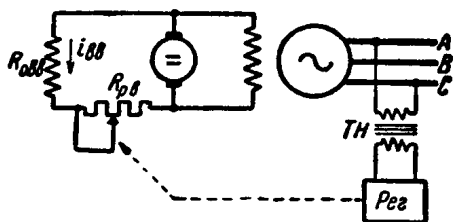


图 8-4 用平滑改变励磁机励磁回路中电阻的方法来调整发电机电压的原理图

- 1) 利用改变励磁机励磁绕组回路中的电阻的办法来改变发电机励磁的调节器；
- 2) 在励磁机励磁绕组中加进一附加电

流的調節器。此附加电流与定子的电压的或电流的改变（在用复式励磁时）成正比。

快速励磁装置及实际上一切利用机电原理所作成的电压调节器均属于第一类。利用这种装置来改变发电机的励磁，可用短接变阻器 $R_{p.e}$ 的办法（快速励磁，见图 8-9），或是用平滑改变电阻 $R_{p.e}$ 值的办法（图 8-4），或是周期地用接点 K 短接电阻 $R_{p.e1}$ （图 8-5）。在后一情况下电流 $i_{e.e}$ 的平均值决定于接点 K 短接与开放持续时间之比。

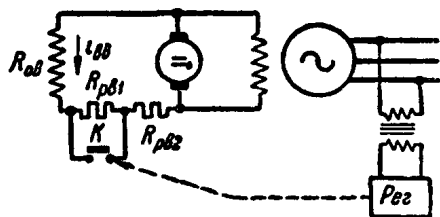


图 8-5 发电机振动脉冲型电压调节的原理图

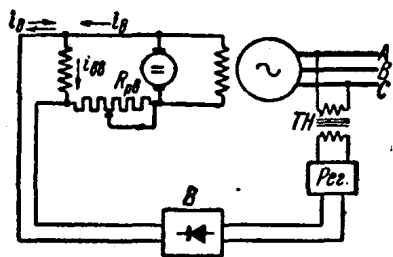


图 8-6 用正比于发电机出口电压偏差的附加励磁电流作发电机电压调节的原理图

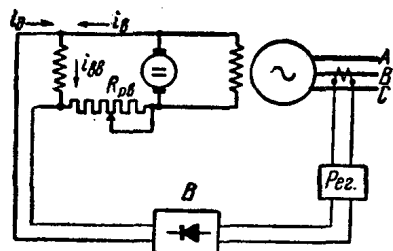


图 8-7 用正比于定子电流的附加励磁电流作发电机电压调节的原理图

属于第二类的包括所有利用电的或电磁的原理而无机械可动元件作成的调节器。这种调节器的改变发电机励磁，是用

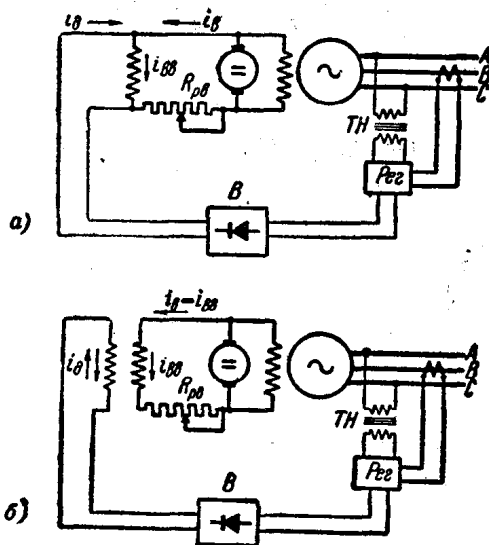


图 8-8 由定子电压与电流引来附加励磁电流作发电机电压调节的原理图

a—电流加在主绕组上；b—电流加在附加绕组上。

下述方法之一来改变励磁机的励磁而实现的：

- 1) 引入一正比于发电机出口电压与额定值间的偏差的附加电流 i_d （经整流器）（图 8-6）；
- 2) 引入一正比于发电机定子电流的附加电流 i_d （图 8-7）；
- 3) 引入一同时正比于定子电流及电压偏差的附加电流 i_d （图 8-8）；此时附加电流 i_d 可以加在励磁机的主励磁绕组上（8-8, a），也可以加在附加绕组上（8-8, b）。

6) 自动电压调节装置的类型

自动电压调节装置可分为下面两种主要类型：

1. 机电型的，其中又可按其实现的方法分为：继电器的（强行励磁装置）、平滑变阻的、振动-脉冲的及变阻器-脉冲的；
2. 电的或电磁型的，其中又分：电子-离子型的及电力机械型的，还有复式励磁装置。

大多数机电型调节器是属于过去的技术。在最近 20 年来研究了并掌握了现在

所广泛采用的無可动元件的調节裝置，属于这一类的有电子-离子型調节器及帶有按电压校正的复式励磁裝置及其他。

下面把强行励磁裝置及各种类型的电压調节裝置的原理与接綫圖簡單叙述一下。

8-3. 繼电强行励磁裝置

由于繼电强行励磁裝置很簡單而又十分有效，故在苏联电力系統中已广泛采用。

圖 8-9 所示即繼电强行励磁裝置的簡化的原理圖。低电压繼电器 $1PH$ 的接点位置是当發電机的出口电压在正常值时的情况。当电压降低时，低电压繼电器 $1PH$ 的接点就閉合，启动中間繼电器 $1P\Pi$ ，后者的接点就将励磁机励磁迴路內的电阻 $R_{p.o}$ 短接。此时励磁机励磁繞組中就流过最大电流 $i_{o.o.m}$ ，励磁机就發出最大电压 $U_{o.o.m}$ ，这数值即如圖 8-2, a 中所示，系由励磁机激磁特性 U_o 与励磁机励磁繞組上的 $i_{o.o} \cdot R_{o.o.o}$ 压降直綫的交点 a 所决定。

这样，励磁机与發電机的励磁就大于額定情况了，因此这种裝置就叫作“强行励磁裝置”。励磁增長的速度仅仅决定于励磁机及發電机的励磁迴路的时间常数。因此这种裝置也被称之为快速励磁裝置 BB (繼电器 $1PH$ 及 $1P\Pi$ 本身的动作时间非常短，因之可以忽略不計)。

在某些情况下如果因电压互感器迴路中的保險絲鎔断了，引起 BB 裝置的誤动作，对于發電机或是对于由此發電机供电的負荷將是很危險的話(例如未与系統相連而运行着的發電机会引起电压的剧烈升高)，則在 BB 裝置中要采用两个低电压繼电器 $1PH$ ，分別接在不同的电压互感器上，而其接点接成串联。

應該注意，繼电器 $1PH$ 的灵敏度是受它的返回系数限制的。如用返回系数为

0.9 的标准繼电器，并考虑到 5—10% 的安全度的儲备，繼电器 $1PH$ 的动作电压可整定为發電机額定电压的 82—85% 左右。由于 BB 裝置的極其簡單，故推荐不仅在發電机及同步补偿机上要裝設，而且在大型同步电动机上也要裝設，以便在电力系統中故障情况下，动用所有的無功电源。

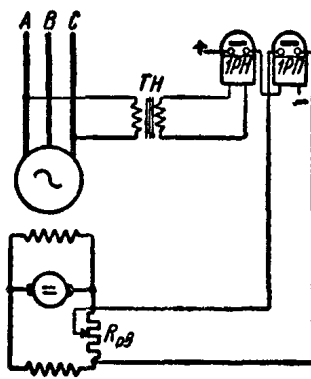


圖 8-9 快速励磁裝置(BB)的原理接綫圖

照例 BB 裝置的低电压繼电器系接在一个綫电压上。这样，当發生三相短路时，或在接有繼电器 $1PH$ 的兩相上發生兩相短路时， BB 裝置都会动作。为了要使在不同形式的兩相短路时都能保証强行励磁，則可使各發電机的 BB 裝置分別接在不同的相上。一般來說，在每一个机組，都在两个或三个綫电压上接两个或三个 $1PH$ 繼电器因而使 BB 裝置复杂化是不合理的。

8-4. 机电型电压調节器(APH)

a) 平滑調节励磁机励磁迴路电阻的調节器

用这种类型的調节器来作發電机自动电压調节，实际上就是随着發電机端电压 U_t 的改变而自动地去改变励磁机励磁迴路內的电阻 $R_{p.o}$ 的值(圖 8-4)。

为要保持發電机端电压为定值，就要

使它的励磁机励磁回路中的电阻值的改变正比于发电机端电压的偏差值。这是由调节器的量测元件与执行元件的动作对应地结合来做到的。

实际上广泛运用的平滑改变电阻的调节器，基本上有两种类型：炭阻型与变阻器型。

图 8-10 所示为苏联电器工业部捷波克沙尔斯基工厂出品的炭阻型调节器的简图。

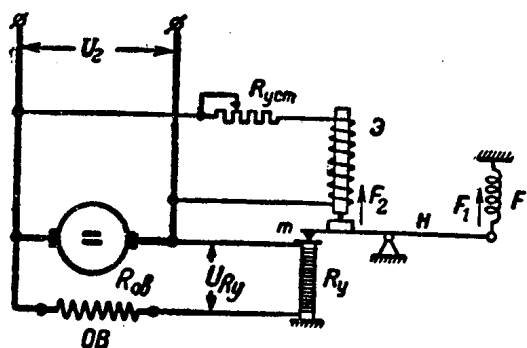


图 8-10 炭阻型电压调节器的接线原理图

在励磁机励磁绕组 OB 回路中接入一电阻 R_y ，这柱形的电阻是由许多炭片叠成的。这炭柱的电阻值 R_y 与片间的压力有关，压力 F_1 愈大，则电阻值 R_y 愈小。 R_y 与 F_1 之关系曲线图 8-11 所示。

在调节器的横杆 H 上作用有两个方向相反的力，一个是 F_1 ，是弹簧 F 使炭柱压紧的力，另一个是反方向的 F_2 ，这是与发电机电压 U 有关的电磁铁 3 所产



图 8-11 炭柱电阻与片间压力的关系曲线

生的力。

当发电机端电压降低时， F_2 力便减小，柱上的压力便增大，电阻 R_y 就减小，因之励磁机励磁电流便加大了。

当电压升高时，调节器的动作就刚好与上面相反。

炭阻型调节器主要适用在小功率发电机上，所以在电力系统的发电厂中并没有广泛采用。

图 8-12 所示的简化图是变阻器型调节器的一种，这是瑞士(Brown-Boveri)公司(BBC)的出品，在各种不同容量的交流发电机上都会有采用。调节器的量测机构的感应系统的鼓形轮 M 所产生的力矩与发电机端电压大小有关。与鼓形轮 M 的旋转相关联的扇形片 C 可以换接电阻 R_{pe} 的段数，这样就可以改变励磁机励磁绕组回路内的电阻值，直到发电机电压恢复为正常值(接在电流互感器二次侧的电阻 r_{ck} 及电阻 R_{ycm} 的用处下面再谈)。

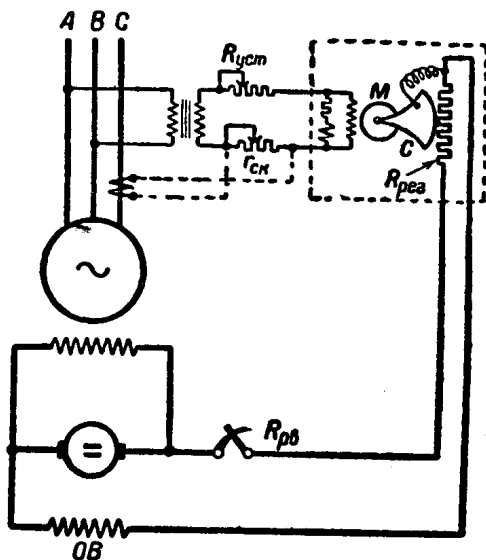


图 8-12 Brown-Boveri 公司(BBC)的变阻器型电压调节器的原理接线图

这种类型的调节器有一系列机构上的缺陷，其中最主要的是它的动作相当慢，以及没有考虑到强行励磁。故在苏联电力