

高等学校教学用书

电 工 学

下 册

A. C. 卡薩脫金
M. A. 畢烈卡林著
И. С. 謝尔盖業夫

高等教育出版社

711
71

高等学校教学用书



电 工 学

下 册

A. C. 卡薩脫金
M. A. 畢烈卡林著
И. С. 謝爾蓋業夫
王 众 託 等 譯

高等教育出版社

本書系根据苏联國立动力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的卡薩脫金(А. С. Касаткин)、畢烈卡林(М. А. Перекалин)、謝尔盖葉夫(П. С. Сергеев)所著“电工学”(Электротехника)1952年重編第四版譯出。現又根据1953年重編第五版重加譯校。原書經苏联高等教育部審定为高等工業学校非电工專業电工課程的教学参考用書。中華人民共和國高等教育部1954年批准的“电工学”教学大綱中也規定本書为教学参考書。

本書中譯本暫分三册出版:上册包括原書的緒論和第一章至第九章,主要討論直流电路和交流电路、电場和磁場以及电工量測;中册包括原書的第十章至第十六章,主要内容为变压器和各种电机——異步电机、同步电机、直流电机,換流机以及交流換向器式电机等;下册包括原書的第十七章至第二十二章,分別講述电子学、电力傳动、电器、电照、电力網、变电所以及发电厂。

从事本書第四版翻譯与互校工作的为王众託、蔣德川、王宏禹、王健、鄧偉霖、黃必信,担任新版修訂工作的是王众託、蔣德川、黃必信。

电 工 学

下 册

А. С. 卡薩脫金, М. А. 畢烈卡林, П. С. 謝尔盖葉夫著

王众託等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

上海洪興印刷廠印刷 新華書店總經售

統一書號 15010·265 開本 860×1168 1/32 印張 5 7/16 字數 141,000

一九五四年五月上海第一版

一九五六年十二月上海第二版

一九五六年十二月上海第五次印刷

印數 10,601—24,600 定價(10) 洋 0.85

下 册 目 錄

第十七章	电子学原理	505
17-1.	电子学的发展.....	505
17-2.	电子管与游子管的分类.....	509
17-3.	交流电路中的整流元件.....	510
17-4.	热电子发射.....	516
17-5.	二極管.....	518
17-6.	充气管.....	521
17-7.	汞弧整流器的作用原理.....	522
17-8.	汞弧整流器的点火与激励.....	525
17-9.	多相整流.....	528
17-10.	鉄殼式汞弧整流器.....	528
17-11.	汞弧整流器的电压降与效率.....	531
17-12.	半导体整流器.....	532
17-13.	平滑滤波器.....	538
17-14.	三極管.....	540
17-15.	电子管放大器.....	548
17-16.	电子管發振器.....	548
17-17.	閘流管.....	547
17-18.	激弧管.....	550
17-19.	光电管.....	551
17-20.	电子射線管.....	554
第十八章	电力傳动	560
18-1.	电力傳动的發展.....	580
18-2.	电力傳动的运行分类.....	564
18-3.	电动机功率的选择.....	566
18-4.	电动机的电流种类和类型的选择.....	571
第十九章	电器	574
19-1.	概論.....	574
19-2.	自动断路器.....	575

19-3.	控制器.....	577
19-4.	接触开关.....	579
19-5.	高压断路器.....	581
19-6.	繼电器和繼电保护.....	587
19-7.	磁性放大器.....	591
第二十章	电照	594
20-1.	电照的發展.....	594
20-2.	光照学上的量与單位.....	598
20-3.	电照光源.....	603
20-4.	照明器具.....	611
20-5.	对人工照明的主要要求.....	616
20-6.	灯的佈置.....	620
20-7.	照度計算法.....	621
第二十一章	电力網和变电所	625
21-1.	概論.....	625
21-2.	導線上电負載的計算.....	628
21-3.	根据电压損失計算直流導線.....	629
21-4.	三相电路的計算.....	631
21-5.	熔断保險器和導線截面按發热条件的选择.....	634
21-6.	电力網的材料和構成的元件.....	637
21-7.	变电所.....	645
第二十二章	发电厂	647
22-1.	苏联发电厂的建設.....	647
22-2.	发电厂电力網的电压.....	657
22-3.	发电厂的負載.....	659
22-4.	发电厂的分类.....	661
22-5.	电力系统.....	669

索引

第十七章 电子学原理

17-1. 电子学的发展

所谓电子学，乃是研究应用于各个不同技术部门的、以真空与稀薄气体中电流现象为基础的仪器(电子仪器和游子仪器)的作用原理与应用技术的科学。在电力工程中，往往用这种仪器来把交流电变成直流电(整流)、把直流电变成交流电(反向换流)、自动保持发电机电压恒定不变、调整电动机的转速等。电子学是现代自动技术的基础，因为它可以利用相当简单的方法以解决生产过程自动化中最复杂的问题，这是由于电子仪器具有下列特征的缘故：灵敏度非常高，惰性非常小，而且是它不仅可以量测和控制电学量(电压、电流、速率等)，同时也能量测和控制任何非电学量(尺寸、距离、速度、压力、时间、光的强度、颜色等等)。要把所有利用近代电子学所能解决的生产和科学上的问题列举出来，即使是很简短地说一说也是不可能的。在苏联这个先进技术国度内，电子学发展得非常迅速。苏联有关电子设备的理论与应用问题的科学起着主导的作用。有许多极重要的电子学的仪器、装置和线路是由苏联的电工人員首先创造的。电子学在所有技术部门的先进作用使得苏联任何专业的工程师都有起码懂得这门科学的基本原理之必要。

作为一门实用科学的电子学的产生，与阿·斯·波波夫发明无线电而引起的电工通讯革命有着密切的联系。1895年5月7日，阿·斯·波波夫在俄国物理化学协会的会议上，公开地表演了世界上第一次的无线电通讯。这个伟大的发明产生了用类似无线电的原理制成新仪器的



阿列山达罗·斯切特諾維奇·波波夫
(1859—1906年)

傑出的俄國學者，不用電線的電報——無線電
的發明者，彼得堡電工學院院長。

強烈要求。

首先是俄國物理學家阿·格·斯托列托夫深刻的研究工作為新型電子儀器的產生準備了條件。他首先寫出了白熾物體發射電子的定則(1888-1890年)。另一方面，真空儀器——電子管——的發明，是以

亞·尼·羅賓根(A. Н. Лодыгин)發明的第一個真空管——目前應用最廣的白熾燈(1873-1875年)為其開始的。早在1881年就在白熾燈中發現了熱電子發射效應(圖17-1):當把檢流計接在燈絲和燈內特制的輔助電極A之間的時候，就有一個很小的電流通過檢流計，其方向為由燈絲流向電極A。這個電流是由於電子從加熱的燈絲向冷的電極A移動而引起的。

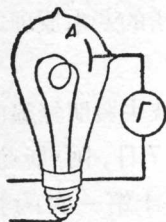


圖17-1. 熱電子
發射效應。

但只是由於無線電的發明，才給了电子学的发展以一個有力的刺激。第一個二極管——用於無線通訊的收報機中的檢波器——是1904年在無線電發明後不久做成的。在第一個這樣的管子中，金屬的圓筒——陽極——包圍着碳質的發熱燈絲。电子管應用柵極是它重大的、進一步的改善：在燈絲——陰極——與冷的陽極之間裝上一個第三個電極——線繞的柵極（1907年）。柵極電位的微小變化可以引起管中电子流的顯著變化，因而通過其中的電流也變化。這種改善首先是使三極管可用作放大器（1911年），接着又用它來作為电子管式交流電發生器（1913年）。

在俄國，早在1912-1913年華·伊·柯伐連柯夫（В. И. Коваленков）就制出了第一個實驗室用的电子管，而工業用电子管是米·阿·彭赤-布洛依維赤（М. А. Бонч-Бруевич）和尼·得·巴巴列克西（Н. Д. Папалекс）在1914年所研究和製造的。但是在十月社會主義革命以前，俄國电子管製造業的發展，由於沙皇俄國技術的落後和統治階級對外國技術的盲目崇拜而進展得十分緩慢。

就在十月社會主義革命以後不久，按照弗·依·列寧的特別指示，建立了尼日格羅無線電實驗室；米·阿·彭赤-布洛依維赤被派去主持這個實驗室。這實驗室在研究新型电子管和組織蘇聯工業進行這種电子管的大規模生產方面起了很大的作用。

电子学在通訊技術上應用的巨大進步，提出了把电子学的原理應用於電力工程的問題。第一個這種電力游子儀器是汞弧整流器——把交流電經濟地轉換為直流電的電器。

1802年華·夫·彼得洛夫（В. В. Петров）發現了在稀薄氣體中沒有接觸而發生電弧的現象。這個現象就成為創造汞弧整流器所根據的原理。在蘇聯，第一個玻璃的汞弧整流器是維·彼·沃洛格金（В. П. Вологдин）1921年所研究製成的，而第一個鐵殼式的強力汞弧整流器是克拉皮文在列寧格勒的“電力”工廠中所研究製成的。

利用稀薄气体中的电流现象,又創造了介乎电子管和汞弧整流器之間的中間型仪器——具有热陰極的气体放电仪器——充气管(1928年)。这种仪器的优点是在仪器導电方向的电压降較小以及可以獲得較大的工作电流。在苏联,充气管的工業生產是从1930年由波尔达里(Ю. Д. Болдырь)的工作而开始的。

在气体放电仪器中应用栅極,可以調節被整流的交流电的平均值,也就是說,可使整流器成为可調節的整流器。閘流管便是以这种原理为基础而具有控制栅極的气体放电仪器。在苏联,从1931年就制造閘流管了。

汞弧整流器的進一步改善是單陽極(多柱形的)汞弧整流器的制造,这工作是全苏电工研究所(ВЭИ)在1941—1944年所完成的[沙維茨基(В. Л. Савицкий)和汞弧整流器試驗室全体工作人員的貢獻]。

电子放大器的發展使得許多以前所熟知的物理现象在实际上得以应用。特別重要的是电子学中光电效应——金屬受光的作用發射电子——的应用。这效应是阿·格·斯托列托夫在1888年所發見的。第一个光电管是斯托列托夫本人所制造的,但是光电管在实际上广泛应用只是在与电子管联接应用时才能实现。光电管与电子管在一起,首先是应用於有声电影,接着使用來解决不同的技術問題。在苏联,在組織光电管的工業生產和技術改善方面,奇莫菲也夫(П. В. Тимофеев)与全苏电工研究所研究人員的成就是有着重大意义的。

在电子管里,可以控制由陰極向陽極飛越的电子流強度。利用控制真空中或稀薄气体中电子束(集中的电子流)方向的原理可以解决許多重要的技術問題。这个原理可以应用於电子射線管,这种射線管首先应用於实效上無惰性的电子(陰極)示波器,后来又应用於电视、电子顯微鏡与無線电偵跡(決定远距离目的物的位置)等。

上面我們指出的只是电子管發展的某些重要階段;随着电子仪器的日臻完善,另一門技術也有了進展,这就是利用电子仪器來解决各种

工程問題的技術，建立和發展工業电子學的技術。關於這類問題，此處不可能一一敘述。在蘇聯，國民經濟始終是最完善的技術裝備着的，工業电子學以異乎尋常的速度在發展着，在這領域內，許多成就獲得了最高的獎勵——斯大林獎金。

17-2. 电子管与游子管的分类

前面我們已經列舉了許多極重要的电子管与游子管，並且指出了它們的用途。現在我們要研究一下它們的主要分類特征。

對於电子管來說，其主要特點要看管內電極之間是真空還是具有極度稀薄的气体而定。

為了產生通過电子管的電流，必須有發出帶電質點的地方。通常电子管的陰極就是發射电子的泉源。要想從陰極得到自由电子，可以利用下述三種方法：（1）熱电子發射——發生在當陰極由特別電源的電流加熱到相當高的溫度時；（2）由於陽游子的衝擊而發生的放射；（3）強場电子發射——由於強度很大的電場的作用，發生电子從物體表面逸出的現象（汞是唯一廣泛地用作強場發射中的陰極的金屬）；（4）光電發射——陰極由於光線照射而發射电子。按照陰極賴以發射电子的各種方式，电子管分為熾熱陰極管、冷陰極管、液體（汞）陰極管和光電陰極管。

我們必須明確电子管与游子管的劃分原理。利用現代的真空技術，可使管泡內的真空度達到非常高的數值（ 10^{-7} — 10^{-8} 毫米汞柱），但是在泡內畢竟還是殘留着相當數量的气体分子（在上述真空度的情況下每一立方厘米中有 10^8 — 10^9 個分子）。因此，從陰極跑向陽極的自由电子便與气体分子發生碰撞。這種碰撞是相當稀少的。對於电子學技術來說，电子在兩次碰撞之間的平均自由路程 λ 是很重要的。這個長度與气体的壓力成反比。在大氣壓力下， $\lambda \approx 6 \times 10^{-5}$ 厘米。如果泡中的真空度高到使得 λ 比電極間的距离大得多，那末电子從陰極跑向陽

極時，幾乎不和氣體分子相碰撞，因而泡中電流只是由於電子的運動而產生，這種儀器就叫作電子管或真空管。但如果 λ 小於電極間的距離，則絕大部分的電子都要和氣體分子相碰撞。由於這種碰撞，在某些分子中就發生了電子的脫離——原來的中性分子變成了自由電子和正游子，也就是說發生了氣體的游離。而游子也是構成在泡內通過的電流的部分，因此這種儀器叫作游子（氣體放電）管。

電子管主要應用於訊號的放大、高週電流的發生、檢波以及用於在電訊設備中傳送訊號和高頻加熱等特殊場合。

游子管主要應用於中等或較大功率的低頻率設備中。

在本章里我們也簡略地研究一下半導體整流器，這種儀器雖然並不屬於電子或游子儀器之列，但它們在電工裝置中起着一系列的與電子或游子儀器相類似的功用（整流，放大）。

17-3. 交流電路中的整流元件

交流電的整流是電子和游子儀器的主要任務之一。在整流裝置中，整流元件是它的主要組成部分。所謂整流元件是一種電阻大小依電流方向為轉移的設備。在電流順向時，它是一個數值較小的電阻，而當電流逆向時卻是一個很大的電阻（圖 17-2）。整流元件在用於交流電

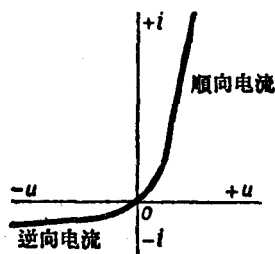


圖 17-2. 實用整流元件的伏安特性。

的整流時，就應該對於順向的電流有尽可能小的電阻而對於逆向電流有極大的電阻；同時它應該能承受尽可能大的反電壓而不致毀壞；此外，它的使用壽命應該越長越好。理想的整流元件的順向電阻應該趨於零，而逆向電阻為無窮大。

為了獲得一個關於在整流時電壓和電流之間關係的一般概念，我們來研究具有理想整流元件的最簡單的線路中的情形。

当这样一个理想整流元件 B 串联在负载——电阻——线路(圖 17-3) 里而与电源(正弦电压 $u = U_m \sin \omega t$) 接通时, 线路里的电流將只有半个周期通过(圖 17-4)。由於线路里没有感性的负载, 所以在这半

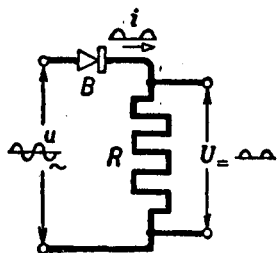


圖 17-3. 半波整流的線路圖。

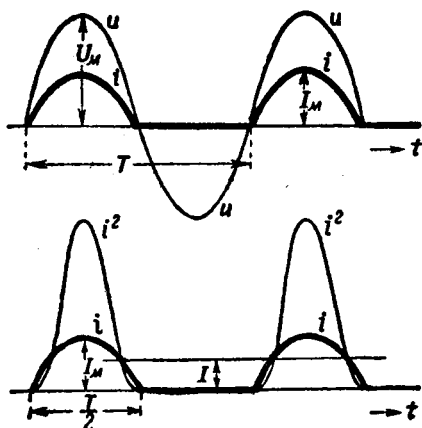


圖 17-4. 半波整流后的电压、电流以及电流的平方的曲線。

个週期的時間內电流將正比於电压, 其幅值为 $I_m = \frac{U_m}{R}$ 。交流电压的有效值是 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, 但是整直后的电流的有效值却只是

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt} = \frac{I_m}{2}, \quad (17-1)$$

这是因为在根号里的积分將比正弦电流时小一倍的緣故(見 § 5-4)。在电阻 R 上的电压是整直后的电压。这个电压的恆定分量, 也就是直流伏特計(永磁式)所指出的数值將等於电阻 R 上的瞬时电压在一个周期内的平均值(圖 17-5), 因此,

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i R dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi},$$

也就是說, 它比交流电压的平均值(見 § 5-3)小一倍。

由电磁式伏特计所指示的整流后的电压的有效值将与这个恒定分量显著地不同,它是:

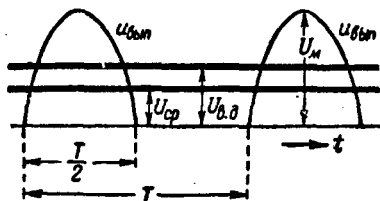


图 17-5. 半波整流后的电压曲线及其平均值和有效值。

$$U_{e.d} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{2},$$

$$\text{因此, } U_{e.d} = \frac{\pi}{2} U_{cp}.$$

有效值之所以与平均值如此不同,是因为电流中除了恒定分量之外,还有较大的基波(具有交流电网的频率)和一连串的偶次谐波分量的缘故(见 § 8-2)。

整流后的电流的有效(平均)功率是

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 R dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \omega i dt = \frac{1}{T} U_m I_m \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 \omega t dt = \\ &= \frac{U_m I_m}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} UI = 0.707 UI. \end{aligned}$$

因此,接有整流元件的线路虽然没有电抗,但其有功功率仍较表观功率 $S = UI$ 为小。线路的功率因数,也就是 P 和 S 之比值为 $P:S = 0.707$ 。只是因为电流瞬时值的曲线形状相比于电压的曲线形状是变形了,所以上述的比值比 1 小了许多。

为了利用交流电压的两个半波,广泛地应用着早在 1901 年弗·费·米特凯维奇就已提出的利用中性点联接整流元件的全波整流线路(图 17-6)。在这种线路里,两个整流元件的阳极连接着变压器副绕组的两个端点,而接受整流后的电流的电路 H 则与整流元件的阴极联接点和变压器副绕组的中性点(零点)相连。在这种联接线路的情况下,整流后电压的平均值(恒定分量)将为(图 17-7):

$$U_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} U_m,$$

其有效值则为：

$$U_{e.d} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

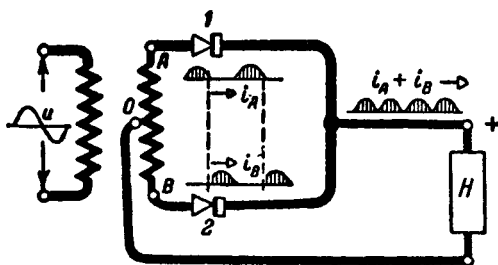


圖 17-6. 利用变压器中点的全波整流。

这个电压对平均值的比例是减小了：

$$\frac{U_{e.d}}{U_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11,$$

因为在整流后的电压里，基波分量消逝了，因而在 $U_{e.d}$ 里，除了恒定分量之外，只引入了偶次的谐波分量。

在桥式线路（圖 17-8）中，电压的关系和圖 17-6 的线路中的关系一样。就这个线路的本身结构来说，它和量测电桥的线路一样。在整流电桥的一条对角线上连接由整

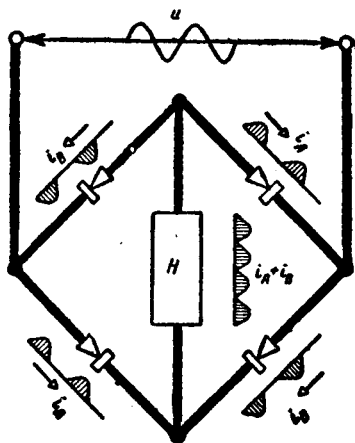


圖 17-8. 整流电桥。

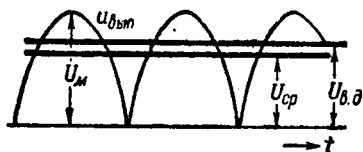


圖 17-7. 全波整流时电压的瞬时值、平均值和有效值。

流后电流供电的负载 H ，而在另一条对角线上连接交流电源。当交流

电压为某一方向时, 电流 i_A 通过位於电桥的一对相向的臂上的两个整流元件, 而电压反方向时, 电流 i_B 通过其余两个整流元件。这种线路的优点在於它不需要变压器。如果为了獲得一定的直流电压而必須使用变压器, 那末桥式线路將使它的副绕组在每个周期的兩半周期都带有負載。在同样大小的整流后的电压之下, 加在桥式线路中每个整流元件上的反电压將小一倍。换一个角度來看, 桥式线路必需四个整流元件以代替前述的两个整流元件, 这样就增加了在整流元件里的能量損耗。除此之外, 整流元件的陰極間还必须互相絕緣, 这在某些多陽極仪器里是做不到的。

在以上所研究的线路里, 整流后的电压在幅值和零之間脈动地变化。多相整流就提供了大大地减少这种脈动的可能性。圖 17-9 表示了三相整流的线路。这时 (在理想整流元件的条件之下), 在每个固定的瞬間, 电流只在陽極接於对变压器的零点來說正电位最高的绕组上的那个整流元件里通过。这种情况下, 整流后的电压將依照包着整流后的变压器副电压的半波的曲線变化 (圖 17-10)。

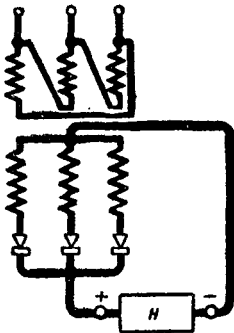


圖 17-9. 三相整流线路。

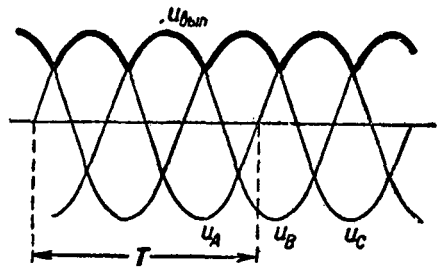


圖 17-10. 多相整流时电压的脈动。

上面举作例子的是三相整流。但是相的数目还可以利用三相变压器來簡易地加上一倍。这种三相变压器的副绕组在每一个肢上分成兩部分 (圖 17-11) 由此所得到六个线圈在相应的連接下便可在副绕组电

路里得到六相制电压。这样的系统在整流时就给予整流后的电压以更为减少脉动的可能性。六相制线路广泛地用作强力汞弧整流器的电源。

由拉達諾夫(А. Н. Ларионов)所建議的三相橋式整流線路是一個將多相整流原理和橋式線路合併的線路(圖 17-12)。

在這個橋式線路里，變壓器的中點對於整流來說是不必要的，因此副繞組就可以接成星形或角形(在三相制里便是三角形)。線路里的一半整流元件形成陰極組，其中所有整流元件的陰極都互相連接在一起；而另一半整流元件的陽極連在一起，形成陽極組。

這種線路在工作時，變壓器的全部副繞組交流電壓的兩個半波都得到整流，因此整流後電壓的脈動大大地減小了，其頻率相當於電網相數的一倍(在三相制供電時所得為六相的脈動，亦即每個週期有六次脈動)(圖 17-12)。圖 17-12 的線路里，在某一固定的瞬間，陰極組中其陽極在此瞬間具有最大正電位的那個整流元件是工作着的；同樣地，陽極組中其陰極負電位具有最大絕對值的那個整流元件是在工作的。這樣看來，就一直有兩個經由負載 H 而串聯起來的整流元件在工作。

現在我們來決定當每個交流電壓的週期里有 m 次脈動的時候，作為一方的直流電壓和作為另一方的交流電壓的幅值及有效值之間的一

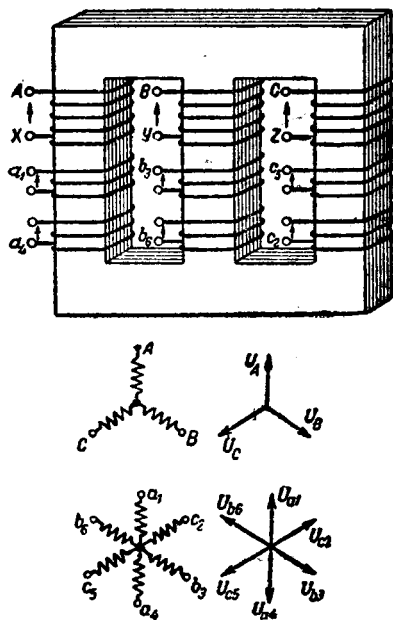


圖 17-11. 利用變壓器將三相制變換為六相制的最簡單的線路圖。

般关系。为了计算上较为方便起见，我们取电压到达幅值的那个瞬间作为时间计算的起点。换句话说，就是取 $u = U_m \cos \omega t$ 。这时，这个电压的平均值，也就是整流后的电压将是（图 17-13）：

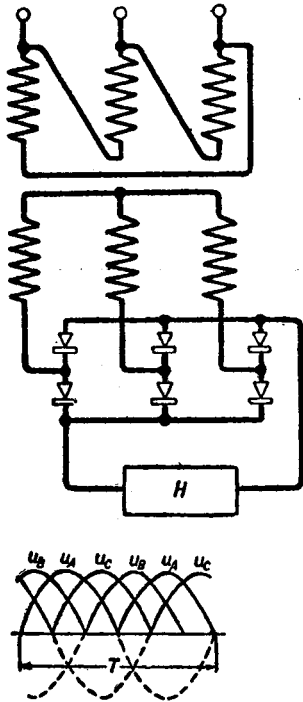


图 17-12. 三相桥式整流线路图
(根据 A. H. 拉连诺夫的设计)。

$$U_{cp} = U_m = \frac{m}{T} \int_{-\frac{T}{2m}}^{+\frac{T}{2m}} U_m \cos \omega t dt,$$

或

$$U_m = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} U_m \cos \omega t d\omega t =$$

$$= \frac{U_m \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} = \frac{U \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}, \quad (17-2)$$

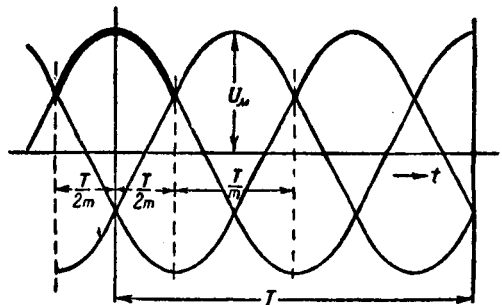


图 17-13. 多相整流时相对的脉动。

其中 U 是变压器相电压的有效值。

应该提醒一下，这里 m 是具有中性点接线的整流线路的相数，它比桥式整流线路中的相数要大一倍。

17-4. 热电子发射

在许多电子管和游子管中，管泡内的自由电子流是利用热电子发