

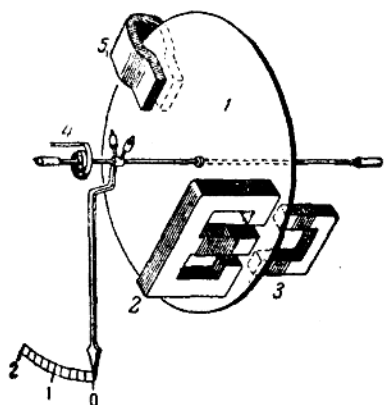


圖 13-20. 具有可動盤的感應型瓦特計。

在具有旋轉磁場的感應型儀表中，旋轉力矩是由某一個交變磁通和由儀表中另外的交變磁通所感應而生的電流相互作用而生的；交變磁場對於環繞着它的閉合迴路沒有推斥力（推斥效應），因為迴路和所有的磁通相環連，而位置對於磁通來說是對稱的，所以合力等於零（可參閱圖 13-21）。

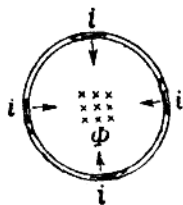


圖 13-21. 磁通與其在板上產生的感應電流相互作用。

現在我們來看一個磁感系統，其中兩個交變磁通 Φ_1 與 Φ_2 穿過金屬板并在其中產生感應電流（圖 13-22）。這兩個磁通隨時間按正弦關係變化，它們之間的相角差是 ψ ，即：

$$\Phi_1 = \Phi_{1M} \sin \omega t,$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2M} \sin(\omega t - \psi).$$

每一個磁通在板上產生一個和磁通本身在相位上差四分之一週期的電動勢，即：

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\Phi_{1M} \omega \cos \omega t,$$

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -\Phi_{2M} \omega \cos(\omega t - \psi).$$

這些電動勢的作用使得板中產生電流；在

沿着電流綫划出的某些相同的圓環範圍內，可以認為電流和環的電阻 R_0 成正比，而在標準頻率 50 周/秒時，圓環的電抗可以忽略不計。因此，電流為

$$i_1 = -\frac{\Phi_{1M} \omega}{R_0} \cos \omega t,$$

$$i_2 = -\frac{\Phi_{2M} \omega}{R_0} \cos(\omega t - \psi).$$

通過板的每一個磁通和由另外一個磁通所產生的感應電流相互作用，產生一個作用於圓板

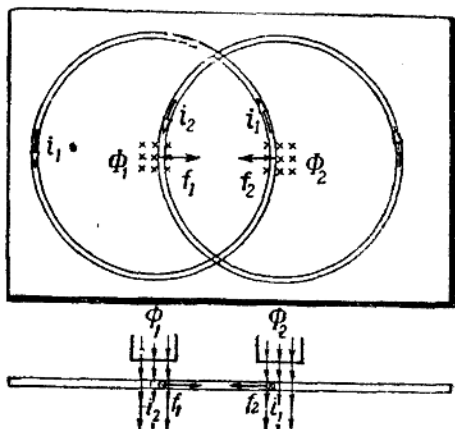


圖 13-22. 兩個交變磁通與其在儀表可動部分中產生的感應電流相互作用。

的力；這樣的話，圖 13-22 系統中有兩個力將發生作用：

$$F_1 = c_1 \Phi_2 i_1 \text{ 而 } F_2 = c_2 \Phi_1 i_2.$$

其中 c_1 與 c_2 是常數，依系統的幾何尺寸而定。這些作用力的方向是由磁通的相位和電流的相位來決定的，歸根到底，也就是由磁通和磁通間的相角差來決定。當兩個磁通和兩個電流的方向相同的時候，這些作用力的方向是相反的，這只要用左手定則就可看出。因此，合力是：

$$F = F_1 - F_2;$$

在旋轉運動的儀表中，這個合力將產生一個旋轉力矩，此力矩等於合力 F 與力臂 r 的乘積。我們可以用積分方法以決定力矩對時間的平均

值:

$$M_{ep} = \frac{1}{T} \int_0^T F r dt = \\ = \frac{1}{T} \frac{\omega}{R_0} \Phi_{1.2} \Phi_{2.2} \left[-c_1 \int_0^T \sin(\omega t - \psi) \times \right. \\ \left. \times \cos \omega t dt + c_2 \int_0^T \sin \omega t \cos(\omega t - \psi) dt \right].$$

把这个表示式加以变换,并利用:

$$\int_0^T \sin \omega t \cos \omega t dt = \int_0^T \frac{\sin 2\omega t}{2} dt = 0,$$

$$\int_0^T \cos^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{2}$$

$$\text{而} \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{2},$$

那末,旋轉力矩可以用下列公式表示:

$$M_{ep} = \frac{\omega}{R_0} \Phi_{1.2} \Phi_{2.2} \sin \psi \frac{c_1 + c_2}{2}.$$

电阻 R_0 (感应电流路径上的电阻) 与板的厚度 b 和电导系数 γ 成反比,也就是说:

$$R_0 = \frac{c_0}{b\gamma};$$

现在如果把旋轉力矩式中的常数以下式表示:

$$\pi \frac{c_1 + c_2}{c_0} = k_{ep},$$

$$\text{可得 } M_{ep} = k_{ep} f \gamma b \Phi_{1.2} \Phi_{2.2} \sin \psi. \quad (13-10)$$

感应型仪表的旋轉力矩是与两个磁通以及它们之间的相角差的正弦的乘积成正比的。为了得到力矩的最大值,必须使角 ψ 等于 90° 。

感应型仪表可以制成伏特計、安培計与瓦特計。在伏特計与安培計中,仪表的线圈是并联的,但为了满足 $\psi = 90^\circ$ 的条件,在一个线圈的电路中接入一个由电抗和电阻组成的特别电路。

在感应型瓦特計中,一个线圈串联在电路中,另一个线圈并联在电路中,因此一个线圈的磁通和电流 I 成正比,另一个线圈的磁通和电压 U 成正比。

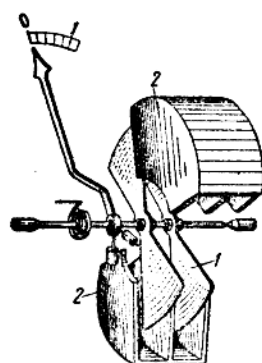
在感应型仪表旋轉力矩的方程式中,包含有交流电频率 f 与金属的可动部分(盤)的电导

系数 γ 。旋轉力矩和频率 f 成正比,因此感应型仪表只能用于某一固定频率的交流电。由于渦流的加热,使得盤的电导系数减小,因而削弱了渦流,同时也削弱了力矩(每 10°C 力矩小 4%)。这种温度对讀数的影响关系是感应型仪表不可消除的大缺点,由于这个原因,感应型仪表即使用于工程量测也是不够准确的。另一方面,应该提出这一类型的仪表由于应用鉄心而具有许多优点:仪表具有强有力的旋轉力矩;不怕外界磁场影响;由于不必把电流引导到可动部分上,因此可以經受过载。

在感应型安培計与伏特計中,两个磁通都和 I 或 U 成正比,因此,旋轉力矩和 I 或 U 的平方成正比,因而这类仪表的标度尺是不均匀的。

目前有指针的感应型仪表只是用作工程量测用的瓦特計,但是另一方面,交流瓦时計都是感应型的。

静电型仪表是以利用荷电导体间的相互作用力为基础的。在静电型伏特計(圖 13-23)中,



有固定于总軸上的可动片系統 1 与固定片系統 2, 要量测其电压的电源一头联到可动部分 1 上, 另一头联到固定板 2 上。兩組板形成一个电容器 C , 当可动系統偏轉时, 它的电容發

生变化; 静电吸力尽量想增加仪表电场的电能 W_{el} , 因而建立旋轉力矩:

$$M_{ep} = \frac{\partial W_{el}}{\partial \alpha} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{\partial C}{\partial \alpha}; \quad (13-11)$$

其中 U 是要量测的电压; α 是偏轉角。反作

用力矩是彈簧產生的。

电压符号的改变不会使旋轉力矩的符号發生变化, 因此靜电伏特計同时能測量直流与交流电压。它几乎就不消耗功率, 这是它極其重要的优点。但是在低电压时, 仪表中的旋轉力矩太小了, 因此必須增加片数, 同时可动部分不用軸心裝置, 而是悬在綫上。

靜电型伏特計主要用在實驗室里直接量測高电压。

熱力型仪表利用它可动部分的金屬綫由要量測的电流加热而伸長, 因而引起偏轉。

这种量測原理的优点是讀数不受交流电的頻率与波形的影响。然而热电型仪表也具有这个优点。另一方面, 熱力型仪表不能很好地經受过载; 由于温度对灵敏度的影响, 因之是不准确的, 同时它还要消耗相当多的能量。由于这些原因, 目前熱力型仪表只是在个别情况下用于高頻率电流的量測。

其他类型的仪表只用来量測很少的几种量(例如振動型只能量測頻率), 下面將分別討論。

电測仪表类型的選擇, 要由所提出有关量測的、維護的以及生产的要求来决定。如果需要准确的仪表, 那么只有直流的永磁型仪表与交流的电动型仪表可以保証在 0.2 級。鉄心用良导磁合金制的电磁型仪表可以保証 0.5 級; 鉄心电动型仪表的准确度不超过 1.0 級; 整流型的是 1.5 級; 至于感应型, 只有 2.5 級的准确度。量測功率要用电动型和感应型。如果按照維護条件, 需要能承受过载而且价格低廉的仪表来量測交流电压与电流, 那末就用电磁型。

当頻率增加到 1000 周/秒时, 可以采用电动型和鉄心电动型仪表; 10—20 仟周/秒时用整流型仪表; 如果頻率更高(到几百万周/秒), 就应该用热电型仪表。

13-7. 瓦特計

在直流电路內量測功率, 并不需要特殊的量測仪表, 因为功率 $P=UI$ 可以按伏特計和安培計的讀数輕而易举地計算出来。但是在交流电路內, 这种計算一般說是不可能的, 因为交流电功率是根据

$$P=UI \cos \varphi$$

来决定的, 它不仅与电压、电流有关, 同时也和电压与电流之間的相角差有关系。因此量測交流电功率必須用瓦特計。

电动型或感应型仪表可用来作为瓦特計。在电动型瓦特計中, 固定綫圈与負載相串联, 而可动綫圈加上外加电阻 R_0 与負載相并联(圖 13-24)。

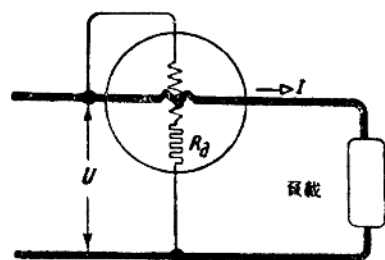


圖 13-24. 瓦特計連接圖。

这样一来, 固定綫圈中的电流瞬时值等于負載电流。可动綫圈中的电流与負載端电压瞬时值 u 成正比; 我們把这个电流叫作电压电路中的电流 i_u 。

应该使得这一电流与电压同相, 因此, 瓦特計的电压电路从工程准确度上看来应该是无电抗的。外加电阻 R_0 占这一电路电阻的絕大部分, 它应该做到无电抗, 而可动綫圈的感抗是相当小的。这就可以把瓦特計电压电路的阻抗 Z_{emH} 認為是純电阻, 即是令

$$Z_{emH} \approx R_{emH}.$$

如果满足这一条件, 瓦特計电压电路中的电流

与电压同相

$$i_n = \frac{u}{R_{emH}}。$$

电动力型仪表的轉矩是和固定綫圈与可动綫圈中的电流以及綫圈互感 M 对轉角的变化率 $\left(\frac{\partial M}{\partial \alpha}\right)$ 的乘积成正比的；但是仪表可动部分由于慣性很大，不可能在交流电的周期之内随着旋轉力矩变化，因而停留在由轉矩一周期内的平均值所决定的位置上。瓦特計的这一平均值是：

$$\begin{aligned} M_{ep\text{ 平均}} &= \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_n i dt = \\ &= \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{1}{R_{emH}} \left(\frac{1}{T} \int_0^T u i dt \right)。 \end{aligned}$$

大家知道，括号中的式子正是交流电的平均值 P ，因此

$$M_{ep\text{ 平均}} = \frac{P}{R_{emH}} \frac{\partial M}{\partial \alpha} = \frac{UI \cos \varphi}{R_{emH}} \frac{\partial M}{\partial \alpha}。 \quad (13-12)$$

要想使瓦特計的刻度均匀，必須使 $\frac{\partial M}{\partial \alpha} =$ 常数，也就是說，使綫圈的互感与可动綫圈的轉角 α 成正比地变化。在現代大多数电动力型瓦特計中，这一条件是可以近似达成的，因此它的刻度差不多是均匀的，但是所有的交流伏特計和安培計的标度尺开始部分都是不均匀的。

为了补偿可动綫圈电感的影响，做到 i_n 与 u 完全同相，在实验室式瓦特計里使用了特殊的相位补偿綫路（可动綫圈用一个电抗綫圈和它并联，附加电阻的一部分和电容器并联）。但是要想做到瓦特計电压电路完全无电抗是极为困难的，因为电压电路的电感里包括互感 M ，而 M 在可动綫圈轉动时是变化的，因此在这种电路里，电压 u 和电流 i_n 之間总是有一个小相角差 δ ，这个角度叫作瓦特計的相角誤差。这个誤差使得瓦特計的讀数不是和 $\cos \varphi$ 成正比，而是和 $\cos(\varphi \pm \delta)$ 成正比。实际上瓦特計的誤差只是在相角差較大时（例如大变压器的空載实

驗和短路实验时，見第 14-3 和 14-10 节），才会显著影响功率量測准确度。

接在交流电路中的瓦特計，当两个綫圈中的电流方向都改变时，轉矩方向并不改变（圖 13-25）；但是如果把瓦特計两个电路中的一个的两端掉換一下，那就使得該綫圈中的电流相

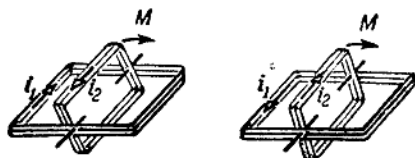


圖 13-25. 瓦特計兩綫圈的电流方向同时改变时，电流相互作用圖。

对相位变了 180° ，轉矩方向因而改变（圖 13-26）。为了預防这种不正确的接法，必須分別在端鈕上标出电路“始端”和“終端”来。



圖 13-26. 瓦特計兩綫圈电流相对相位的变化。

“始端”通常叫作發电机端，因为要是这两个端点連向电源的同一極（圖 13-27），那末瓦

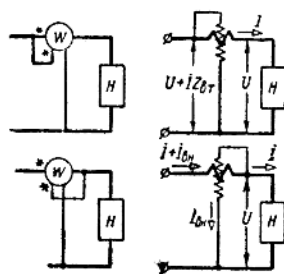


圖 13-27. 正确連接瓦特計的两种方法綫路圖。

特計的指針向它所應該偏移的方向轉动。仪表的始端标以小星(*)。

圖 13-27 所示为正确連接瓦特計的两种方法。第一种方法是使待測的負載 H 电流恰好通过固定綫圈；但是仪表电压电路上的电压却要比負載端电压大一些，大的正是仪表电流电路上的电压降。因此，

瓦特計所讀出的,除了負載功率而外,還有消耗在電路電路上的功率($I^2 R_{am}$)。第二種方法是作用於瓦特計電壓電路上的正是負載電壓,然而通過瓦特計電路電路的,却是負載電流加上瓦特計電路電路中的電流。因此,瓦特計所讀出的,除了負載功率之外,還有消耗在電壓電路上的功率 $\frac{U^2}{R_{am}}$ 。由瓦特計本身損耗所引起的這些誤差是很小的,但是在精密測量和量測小功率時,必須考慮它。

近年來,在配電盤上安裝的大半是鐵心電動力型儀表(圖 13-35)。上面講到的這些對它基本上都適用。但是應該指出,這類儀表的準確度卻很低,同時由於磁滯的影響,它並不適宜於量測直流電功率。

在感應型瓦特計中,一個繞圈是串聯的,另一個繞圈是並聯的。那末一個繞圈的磁通是

$$\Phi_{1u} = k_1 I,$$

而另一繞圈的磁通是

$$\Phi_{2u} = k_2 U,$$

但是為了使儀表指示交流電功率,根據式(13-10)就必須要使 $\sin \psi = \cos \varphi$ 或使 $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$ (圖 13-28)。我們可以認為 I 與 Φ_{1u} 是同相的;因此電壓 U 與由它產生的磁通 Φ_{2u} 之間的相角差必須等於 $\frac{\pi}{2}$ (“象限條件”)。

這只要利用電壓繞圈對磁路作用,就可以輕而易舉地辦到(參閱第 11-11 節講過的鐵心繞圈的向量圖)。

感應型瓦特計的特点是標度尺特別長(約 300°)。它只是用作配電盤式儀表,但是在新式設備里,由於它的準確度較低而不再採用。

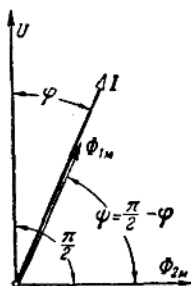


圖 13-28. 感應型瓦特計的向量圖。

13-8. 三相功率與電能的量測方法

量測平衡負載三相系統的功率時,只要量測一相的功率然後把它乘以三就行了。為了達到上述目的,當然只要用一個瓦特計就够了。但是只有在可以找到中點或是具有中綫的情形下(圖 13-29),才能直接量測每相功率。不然的話,要是還想用一個瓦特計來量測三相功率,就必須人為地替儀表創造適當的條件,也就是說,必須使得作用於瓦特計電壓電路的是與相電壓相等或者成比例的電壓,而通過瓦特計電路電路的是相電流或者和它成正比的電流;而最重要的是作用於瓦特計的電壓和電流,它們之間的相角差必須等於負載的相角差 φ 。

為了達成上述條件,比較簡單的方法是把瓦特計電壓電路的一端接到人為的中點——即所謂星形聯接的中點上去,星形是由瓦特計電壓電路的電阻與另外兩個和它相等的外加電阻所組成的(圖 13-30)。

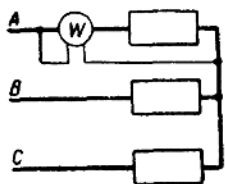


圖 13-29. 當中心可以聯接時用一個瓦特計量功率。

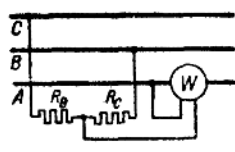


圖 13-30. 用一個瓦特計和人為的中點來量測功率。

三相系統的綫電壓與電流的向量關係(圖 13-31)不隨負載的聯接法(星形或三角形)而有所改變;在平衡負載時,三相系統的功率始終是

$$P = \sqrt{3} U_A I_A \cos \varphi,$$

而聯到人為中點上的瓦特計的讀數將是

$$P_{W3} = U_{am} I_A \cos (\dot{U}_{am}, \dot{I}_A) = U_{\phi} I_A \cos \varphi =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} U_A I_A \cos \varphi = \frac{1}{3} P,$$

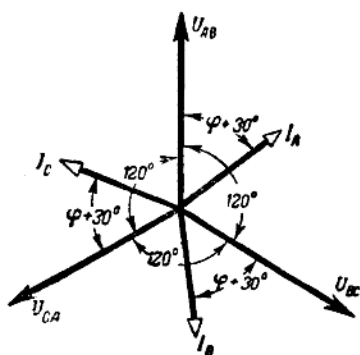


圖 13-31. 三相系統的向量圖。

在有中綫的系統內三相負載不平衡時，可利用這樣一個事實：三相系統的有功功率等於各相有功功率的和。因此，總功率可以用三個瓦特計來量測，每個量一相功率（圖 13-32）。

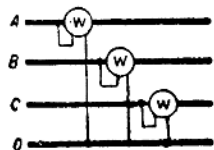


圖 13-32. 三瓦特計法。

三相三綫系統中負載不平衡時，量測功率的主要方法是二瓦特計法。現在讓我們來證明：不論相間負載

如何分布，兩個瓦特計可以讀出三相制的總功率來。三相制的瞬時功率等於各相瞬時功率的和。當負載是星形連接時，這功率可以用下式來表示：

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C; \quad (13-13)$$

式中 u_A, i_A, u_B, i_B 等是相應各相電壓與相電壓的瞬時值，由於

$$i_C = -(i_A + i_B),$$

所以系統的瞬時功率是

$$p = i_A(u_A - u_C) + i_B(u_B - u_C);$$

相電壓的差等於相對應的綫電壓，因此，功率

$$p = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B. \quad (13-14)$$

圖 13-33 便是應用這個方程式的連接法；因此，根據這種連接法，可以用兩個瓦特計讀出三相系統的總功率來。

由於在一定的綫電壓和綫電流時，電源供

應的功率既與不與電源的連接法發生關係，又不與負載的連接法發生關係，所以二瓦特計法也同樣適用於負載的三角形連接。

我們可以看出這種連接法的特点：綫電壓系統的正常次序是 u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} ，但用到二瓦特計連接法的方程式里的是電壓 u_{AC} ，也就是在相位上與 u_{CA} 相反的電壓。要想得到電壓 u_{AC} ，必須把第一個瓦特計電壓電路的“始”端接到導綫 A 上，“終”端接到導綫 C 上，要知道，只要把儀表電壓電路的端子換接一下，就可以使交流電壓在相位上轉變 180° 。

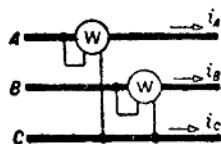


圖 13-33. 二瓦特計法。

按照圖 13-33 連接的瓦特計，其讀數的代數和等於三相負載的總功率，而總功率在兩個瓦特計讀數之間的分配和負載的不平衡程度沒有直接關係，但在很大程度內和負載相角差的大小和符號有關。我們研究一下在平衡負載的最簡單情況下的這種關係。方程式 (13-14) 用平均功率與電壓電流的有效值表示時，具有下列形式：

$$P = P_I + P_{II} = U_{AC} I_A \cos(\dot{U}_{AC}, \dot{I}_A) + U_{BC} I_B \cos(\dot{U}_{BC}, \dot{I}_B).$$

負載平衡時，

$$U_{AC} = U_{BC} = U_A \quad \text{而} \quad I_A = I_B = I_A.$$

圖 13-34 是系統的向量圖，根據向量圖可知向量 U_{AC} 與 I_A 之間的相角差是 $\varphi - 30^\circ$ ， U_{BC} 與 I_B 間相角差是 $\varphi + 30^\circ$ 。這樣一來，兩個瓦特計的讀數將是：

$$P = P_I + P_{II} = U_A I_A \cos(\varphi - 30^\circ) + U_A I_A \cos(\varphi + 30^\circ). \quad (13-15)$$

從這裡可以看出：在平衡負載情況下，只有當 $\varphi = 0$ 時兩個瓦特計的讀數才會一樣。當 $\varphi > 60^\circ$ 時，第二個瓦特計的指針將偏到標度尺的零點以外，這時如果要想讀出第二個瓦特計

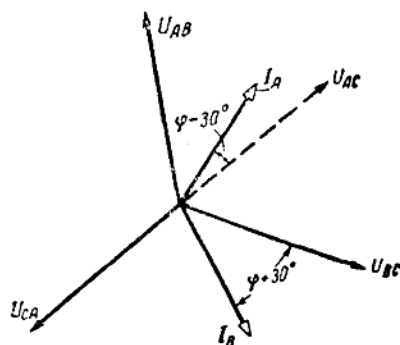


圖 13-34. 二瓦特計法的向量圖。

的讀數,就必須換接仪表某一电路的端子(在瓦特計的外盒上,通常有一个特制的电压电路换接器)。换接后可使指针回到标度尺上来,但必須把瓦特計的讀数当作負的,并且从第一瓦特計的讀数中把它减去,以便求出三相系統的功率。

在工業設備或發電厂的配电盤上,是用三相瓦特計的。三相瓦特計实际上是重合的單相仪表,也就是在一个公共的外盒里包含兩個連在可动部分公共軸上的可动元件,兩元件可同时对三相瓦特計的总指针發生作用(圖 13-35)。

无功功率的测量差不多全是在三相系統中进行的。在各相負載平衡时,这种测量可以利用一个瓦特計按圖 13-36 (“張冠李戴法”)联接而进行;由圖 13-31 向量圖可以明显地看出,瓦特計指示的是:

$$\begin{aligned} U_{BC} I_A \cos(90^\circ \pm \varphi) &= \\ &= U_A I_A \sin(\pm \varphi), \end{aligned}$$

由于負載平衡的三相系統的无功功率为

$$Q = \sqrt{3} U_A I_A \sin(\pm \varphi),$$

因此,利用这种方法时,瓦特計的讀数乘以



圖 13-35. 双元件的三相瓦特計:

M—两个可动线圈;
C—两个固定线圈。

$\sqrt{3}$, 便得到三相无功功率。

这种接法有时也用来在級差电价制度下計算平均 $\cos \varphi$ (所謂級差电价,就是每一度电的电费要按該負載的平均 $\cos \varphi$ 計算); 在这种情况下,發电厂按照一般的三相瓦时計計算有功电能 W , 按照圖 13-36 接法的瓦时計計算无功电能 W_p 的消耗; 这时平均功率因数按下式决定:

$$\cos \varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_p^2}}$$

由于圖 13-36 綫路只适用于对称負載,所以在更一般的情况下,应用特殊的无功电能瓦时計来量測 W_p 。

13-9. 瓦时計

这类仪表用来計算各用戶从發电厂得到的电能或者發电厂送往电力網的电能。在我們已經研究过的各种电測仪表中,可动系統在电流的作用下,只轉了一个一定的角度;而在瓦时計中,可动系統必須繼續旋轉,而其旋轉速度应该和电功率成正比。

在瓦时計中代替反作用力矩的是与可动系

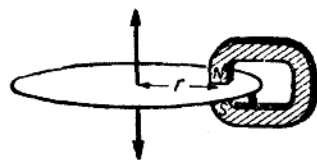


圖 13-37. 制动力矩与磁铁。

統轉速成正比的制动力矩。这力矩由固定于可动系統軸上的鋁盤在永久磁铁的磁極間旋轉而产生(圖 13-37)。

將条件簡化一些,我們可以用下列方法来决定制动力矩:在盤上产生的电动势是和永久磁铁的磁通 Φ 与位于磁極中間的鋁盤部分的

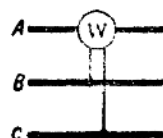


圖 13-36. 对称三相系統无功功率的测量綫路。

圓周綫速度 v 成正比的, 即

$$e_d = k_1 \Phi v = k_1 \Phi \frac{2\pi r n}{60} = k_2 \Phi n,$$

这个电动势产生的电流与圓盤材料的电导系数 γ 成正比:

$$i_d = k_3 \gamma e_d = k_4 \gamma r \Phi n.$$

盤上的电流与永久磁铁的磁通相互作用, 产生与电流和磁通成正比的制动力矩:

$$M_{\text{mop}} = k_5 i_d \Phi \quad \text{或} \quad M_{\text{mop}} = k_6 \gamma r \Phi^2 n = k_{\text{mop}} n,$$

也就是說, 制动力矩是和圓盤旋轉速度 n (轉/分) 成正比的。

仪表的旋轉力矩應該和功率成正比:

$$M_{\text{sp}} = k_{\text{sp}} P;$$

而在轉速穩定的情況下, 旋轉力矩应当等于制动力矩:

$$M_{\text{sp}} = M_{\text{mop}} \quad \text{或} \quad k_{\text{sp}} P = k_{\text{mop}} n,$$

$$\text{即} \quad P = \frac{k_{\text{mop}}}{k_{\text{sp}}} n.$$

現在把等式兩邊都用 t 來乘, t 表示一定的時間過程, 在等式左邊我們得到它所監視的電力網的時間 t 內所取用的電能 $Pt = W$, 等式右邊是瓦時計在這段時間內的總轉數 $nt = N$ 。

$$\text{因此,} \quad W = \frac{k_{\text{mop}}}{k_{\text{sp}}} N = C_{\text{eq}} N,$$

這也就是說, 把瓦時計的轉數 N 乘以係數 C_{eq} , 就可以得到在時間 t 內電力網耗用的電能。 C_{eq} 這個量叫作瓦時計常數, 就是瓦時計每轉一周時電力網消耗的電能量。

瓦時計可動系統的軸通過蝸輪的作用而使計算機構旋轉。這種系統的傳遞數的選擇應使從計算機構中讀出的不是轉數, 而可直接讀出千瓦小時數。

由於瓦時計的軸是連續旋轉的, 所以為了減少磨損起見, 軸端是半球形的。

電力型直流瓦時計如圖 13-38 所示。它的主磁場由固定繞圈產生; 固定繞圈 1 由粗導線製成, 它和電源綫相串聯, 其中通過的是工作

電流 I 。因此, 磁通 $\Phi = k_1 I$ 。電樞 2 至少由三個繞圈組成, 與整流子片 3 相聯接。電刷 4 沿著整流子滑動; 較大的外加電阻 6 與電樞相串聯。這樣一來, 電樞中的電流

$$I_s = \frac{U - E_s}{R_s + R_d}.$$

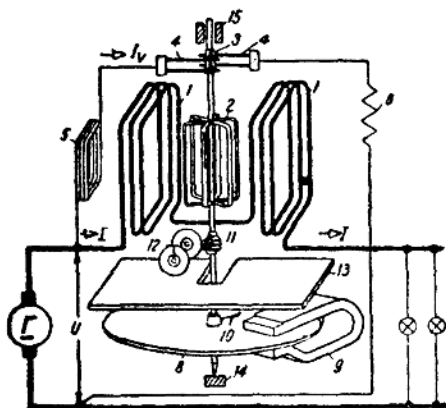


圖 13-38. 電力型直流瓦時計的構造圖。

電樞旋轉的時候, 其中產生的感應電動勢 E_s 非常小, 可以忽略不計, 這時

$$I_s = k_2 U.$$

儀表中的旋轉力矩與磁通和電樞中的電流成正比, 這一點是和任何電力型儀表一樣的, 即

$$M_{\text{sp}} = k_3 k_1 k_2 I U = k_{\text{sp}} P.$$

儀表的制動力矩是靠制動盤 8 在永久磁鐵 9 的磁極間旋轉而產生的。永久磁鐵利用鋼質屏蔽 13 與繞圈的磁場相隔離。制動力矩為

$$M_{\text{mop}} = k_{\text{mop}} n.$$

在推力軸承 14 和 15 上, 計算機構 11 與 12 以及在空氣中的摩擦力矩 M_{mp} 對轉速起着顯著的影响, 尤其是在負載較小的時候, 這種影响更顯著。為了消除這種有害的摩擦影响, 瓦時計設有摩擦補償器 5, 它本身是一個與電樞串聯的小繞圈。繞圈的磁場強弱是和電樞中的電流成正比的, 它與電樞電流相互作用, 產生一個與負載無關的小輔助力矩:

$$M_{acn} = k_4 \Phi I_A = k_5 I_A^2 = k_6 U^2。$$

在瓦時計理想的工作情形下, $M_{mp} = M_{acn}$, 因此, 在下面的力矩方程式中

$$M_{ap} + M_{acn} = M_{mop} + M_{mp}。$$

这些力矩是相互平衡的, 因而力矩的基本平衡得以保持: $M_{ap} = M_{mop}$ 。由此, 正如我們以前所推导的, 可得:

$$W = C_{cn} N。$$

輔助力矩即使在沒有負載时也是存在的。为了消除潜行 (也就是說当沒有負載时由于电压 U 的增加而使电樞不停的轉动) 的危險, 瓦時計附有制动鑰 10。制动鑰是一片焊在瓦時計軸上的鋼綫, 能够受永久磁鉄的吸引。它可使瓦時計不致因为由摩擦补偿器所产生的輔助力矩作用而發生轉轉。

要想調节瓦時計, 應該移动永久磁鉄以变化其制动力矩 (如圖 13-37, 改变 r)。而調节輔助力矩的方法是变化补偿器綫圈和电樞間距离的远近。

交流感应型瓦時計的結構簡圖如圖 13-39 所示。其中旋轉力矩的产生方法和具有旋轉盤的感应型仪表完全一样。

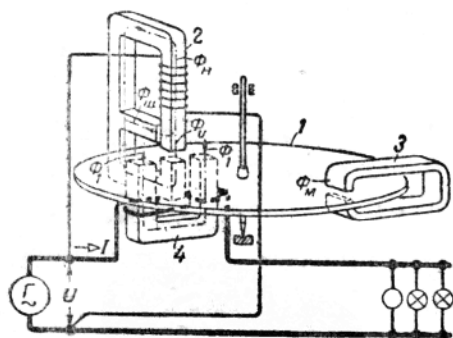


圖 13-39. 交流感应型瓦小時計結構簡圖。

Φ_u 和 Φ_i 两个磁通, 一个和电力網的电压 U 成正比, 另一个和工作电流 I 成正比, 它們产生一个旋轉磁場。为了使得磁通 Φ_u 和电压 U

之間的相角差是 90° , 电压綫圈的鉄心 2 附有磁分流器, 綫圈磁通的一部分 Φ_u 由此構成通路, 不再經過盤 1。磁通 Φ_u 可以和变压器中的漏磁通同样看待 (参考第 14-5 节); 它和电压分量 IX_1 成正比。适当选择 Φ_u , 可使电压 U 和磁通 Φ_u 之間的相角差达成 90° 。利用这种方法产生的旋轉力矩是和功率成正比的。制动力矩利用永久磁鉄 3 与鉛盤互相作用而产生。旋轉力矩和制动力矩同样地依盤的电阻而定, 因此, 感应型瓦時計的讀数受温度的影响極小, 这是和指針式感应型仪表不同的地方。为了得到摩擦的补偿, 可把电压綫圈做得稍微不对称一些, 因为这样可使电压綫圈磁通的一部分和总磁通 Φ_u 發生相角差, 因而产生輔助力矩。

要想达成这种不对称, 也可以在电压綫圈的磁路中插入鋼螺栓, 如圖 13-40 所示。

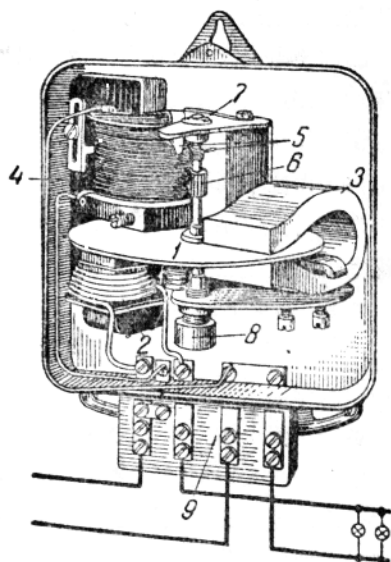


圖 13-40. 感应型瓦時計 (圖中計算机構業已

取去, 固定用的零件也省略了):

- 1—盤; 2—串聯電磁鉄; 3—制動用永久磁鉄;
- 4—并聯電磁鉄; 5—制動鑰和制動片; 6—傳往計算机構的齒輪; 7—軸承; 8—推力軸承;
- 9—端子盒。

为了消除潜行, 瓦時計附有制动鑰。要想

調節瓦時計，可以移動永久磁鐵 3。

三相瓦時計具有兩個或者三個感應瓦時計的可動元件，它們作用於同一軸上和同一計算器上。

13-10. 絕緣情況試驗

任何電工設備的完善運用和它導線間以及導電部分與地之間的絕緣情況有很大的關係，絕緣情況由其電阻、介電強度和介電損失來決定。介電強度是用適當的击穿電壓的絕緣試驗來校驗的。介電損失是利用適當的特殊方法來量測的。但是這兩種試驗只在工作電壓高於 1000 伏的設備中進行，而是屬於電工學中一個特別部門——高壓工程所研究的範圍，這裡我們不再多談它。在工作電壓是 1000 伏或者更低、工作條件相當簡單的設備中，一般的絕緣試驗只限於量測其電阻。

每一制成的電工設備，在送去運用以前和長期不用或檢修以後，都要決定其絕緣情況。不但要量測導線與地之間的絕緣電阻，同時還要量測每兩個電位不同的導線間的電阻。

外加電壓對於絕緣電阻有着很大的影響，因此絕緣電阻的量測應該盡可能在等於工作電壓、而在任何情況下也不低於 100 伏的情況下進行。

當利用直流電來試驗對地的絕緣時，應當把電源的負極聯到受試的導體上，而把正極接地。這樣可以防止在絕緣破壞的地方的金屬導體上形成一片傳導不良的氧化層，這種氧化層會在量測時增加絕緣電阻值。

在兩個保險器之間或者在後一保險器之後的電力網，其絕緣電阻必須不比每一伏特工作電壓一千歐姆這個數來得少（例如工作電壓為 220 伏時不能比 220000 歐姆小）。這個要求並不適用於電機、變壓器和蓄電池，因為對它們來說，還有特別的規程。

量測絕緣電阻，大多使用指針式的直讀式儀表——兆歐計（歐姆計）。這種儀表的標度尺是直接以兆歐姆或千歐姆來刻劃的。歐姆計最簡單的線路圖如圖 13-41 所示。當干電池的電動勢 E 是定值時，檢流計 G 中的電流與線路的

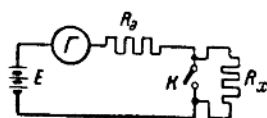


圖 13-41. 具有干電池的歐姆計。

電阻成反比，線路的電阻包括安裝在儀表內的外加電阻 R_0 與要測的電阻 R_x 。因此，當電動勢 E 是定值時，儀表

可以直接按 R_0 的值來刻度。標度尺上，零值分度相當於 $I = \frac{E}{R_0}$ ，而 $R_x = \infty$ 的分度相當於電流的零值。電鍵 K 用來控制電池的情況，它可以把 R_x 的端點短路。當電鍵接通時，儀表的指針必須停留在電阻為零的分度上。這種具有干電池的歐姆計用於不重要的絕緣試驗。

為了在電壓不低於該設備的工作電壓的情況下量測絕緣電阻，大半使用具有感應器的兆歐計。這種感應器是一個小型永磁發電機，在其永久磁鐵磁場中有直流電機的电樞可以旋轉。驅動手柄和電樞用減速齒輪相聯接。電工法則和規程規定：在試驗絕緣電阻時，應該用工作電壓，但在任何情況下也不能用低於 100 伏的電壓。因此，感應器的電壓制成從 120 伏到 2000 伏。感應器的電動勢由手柄的旋轉速度決定，但根據圖 13-41 的示意圖可知這個電動勢必須是常數。在某些歐姆計中，採用特別的離心結合器，它或多或少地可以保持電樞的旋轉速度恒定不變，不管手柄轉速是否改變。

運用比率計的原理可以得到更可靠的結果（圖 13-42）。這種歐姆計由裝在同一盒中的永磁型儀表與感應器所組成。儀表磁鐵的空氣隙是不均勻的，愈靠邊上愈大。可動系統由兩個繞圈組成，繞圈之間互成一定角度地固定着。

定值电阻 R 与上述兩綫圈中之一相串联, 但是要量測的电阻 R_x 与另一綫圈相串联。兩個綫圈旋轉力矩的方向是相反的。电流由不会产生任何反作用力矩的非常柔韌的軟导线通到綫圈上去。当仪表开始接通而感应器开始运转时, 这时力矩較大的綫圈开始把仪表的可动部分向它自己这一方面轉

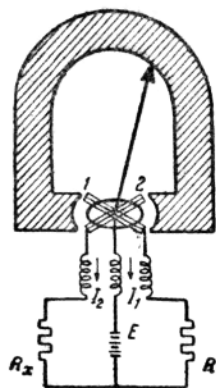


圖 13-42. 应用比率計的欧姆計。

动, 因而它自己走到磁場較微弱的地方, 而其力矩也变小了; 第二个綫圈走进了磁場較强的区域, 它的力矩增加了。这样, 在可动系統某一既定位置时, 力矩达成平衡, 而指針稳定在标度尺的一定分度上。当感应器的电动势發生变化时, 兩個綫圈的力矩發生同样程度的变化, 而其平衡不致破坏, 因此仪表的讀数与感应器的轉速无关, 只和电阻 R 与 R_x 的比率發生关系。由于 R 是一定的, 所以仪表的标度尺可以直接以 R_x 的值来划分。

13-11. 頻率計

交流电的頻率可以用構造非常簡單的仪表——所謂頻率計来量測, 这种仪表是以机械諧振現象为基础的。电磁式頻率計 (圖 13-43) 由电磁鉄 1 以及位于电磁鉄磁場中的鋼片 2 和連在鋼片上的杆 3 所組成。杆 3 固定在彈簧 4 上, 在杆上裝有一排韌性鋼片 5, 这些鋼片應該选得使下面每一个鋼片的自然振动頻率都比上一个鋼片大 0.5 周/秒。在每个鋼片的自由端点上固定一个面向观察者的白色方塊。如果綫圈兩端联到交流發電机上 (就像联接伏特計一样), 那末鋼片在电磁鉄的推动下便开始摆动。

但是只有自然頻率等于交流电頻率的那一片摆动得最厉害。固定在它端头的白色方塊, 这时看起来就像灰色的小長条一样 (圖 13-44), 按照它所对的刻度, 便可讀出要測的頻率来。相鄰兩片的振动便弱得多, 而其

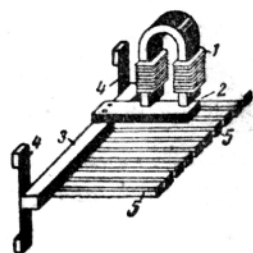


圖 13-43. 振動型頻率計的構造。

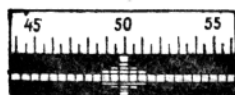


圖 13-44. 振動型頻率計的标度尺。

余各片的振动肉眼完全不能觉察。要想准确地量測頻率, 應該使用指針式頻率計。

13-12. 示波器

永磁型示波器用来研究平均頻率約在 1000 周/秒以下的电压 (电流) 瞬时值的曲綫, 同时也用来研究电路中的过渡历程。要想研究頻率更高的振动, 就要使用无惯性的电子型示波器 (参閱第 19-5 节)。

永磁型示波器的振动子的構造原理如圖 13-45 所示。可动系統裝在强有力的永久磁鉄或电磁鉄 (用直流激磁) 的磁極間。可动系統是一个扣絆狀的青銅綫圈, 套在滾柱上, 并且用彈簧拉紧; 这个彈簧产生系統的引导力。在綫絆的中部, 裝上一面小鏡子。由于引导力很强大, 而可动系統的质量又很小, 所以其自然振动頻率是足够大的 (約 2—12 千周/秒)。当我们所研究的振动現象其頻率比綫絆的自然頻率小好几倍的时候, 綫絆的偏轉度便与要測的电

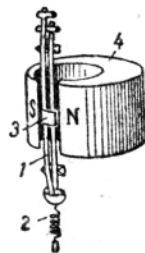


圖 13-45. 永磁型示波器的振动子。

流成正比。

示波器的綫絆与要研究其电流的电路接通,电流与永久磁铁的磁场相互作用,产生一个与通过綫絆电流的瞬时值成正比的偏轉力。当量测交流时,在这个力的作用下,綫絆便很快地振动,随着交流电的变化而偏轉。

我們可以借示波器的光学系統来观察这种振动(圖 13-46)。光綫从非常光亮的光源 1 (电灯或电弧)發出,經過透鏡 2、狭縫 3 和三棱

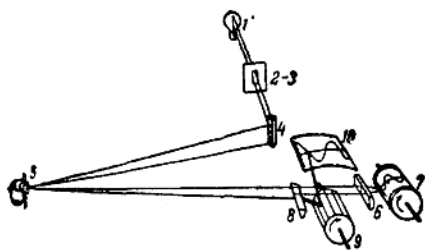


圖 13-46. 示波器光学系統簡圖。

鏡 4 以細条的形式落在振動子 5 的小鏡上;光綫从可动系統的小鏡上反射回来,通过聚光透鏡 6,在照像紙 7 上以小光点的形式呈现。当綫絆振动时,这个光点变成了光亮綫条;为了把它扩展成曲綫,可使照像紙以均匀的速度在垂直于小鏡的振动方向上运动。利用这个方法,小鏡的振动便在照像紙上划出要测的电流对時間的曲綫来。

我們也可在幕上观察周期性的过程,为此示波器設有下列裝置:一部分光束通过透鏡 8 朝向多边形柱体鏡 9,再从这里反射到毛玻璃制的屏幕 10 上。多边形柱体鏡用一个同步电动机带动旋轉,这电动机的电源,其頻率与示波电流相同,而通常是由同一交流电源来供应的。由于多边形柱体鏡是同步旋轉的,在每周期过程中,每一从振动小鏡来的同一入射角和反射角的光綫,对应着交流电一定的相角。因此在每一周期,光点重复地在幕上描划出同一在直角坐标系統中 $\alpha = F(i, t)$ 的电流曲綫来,光綫

形象这样地重复出現,使我們可以很明显的在幕上看到它。

要想攝取电压曲綫,示波器的綫絆应该加上外加电阻;要攝取电流曲綫就要加分流器。示波器有好几个可动系統(振動子),这样可以同时攝取几个电压和电流的曲綫;苏联制的 МП-2 型示波器具有 8 个振動子。

13-13. 电测非电学量的原理

前面我們已經提到量测技术电气化的重大优点。这里我們可以用电学方法量测非电学量的几个重要优越性列举如下:(1)量测可以自动化,量测仪器經常在准备状态之下;(2)远距离傳送讀数比較簡單;(3)所测的量的变化值可以无慣性地复現(尤其是靠着电子仪器的帮助);(4)量测結果可以自动地进行数学运算(加、减、乘、除、积分与微分);(5)量测范围比較寬广。这些优越性(当然还有其他优点)使得今天在苏联生产的机械化發展方面,更广泛地使用了电工仪表以量测非电学量。目前我們可以在飞机艙內、鍋爐设备中、汽車里、金屬切削車床里、紡織机內、糖果工厂內等等地方找到它。

量测非电学量的电工设备,其主要几部分可以大体上称为:發送器、中間的特別組合、原来的量测裝置。

發送器把非电学量变成电学量(例如我們要量测温度,温度的变化可以对發送器的电阻起作用)。發送器的特性以其轉換能力与灵敏度为代表。所謂轉換能力,就是它所能量测的非电学量的范围,也就是当發送器的誤差不超过許可值时,它的量测范围。發送器的灵敏度 S 是电学量的变化 y (在發送器的輸出端)和相对应的非电学量变化 x 的比(例如电阻的变化与温度变化的比),更准确些,应该是偏导数

$$S = \frac{\partial y}{\partial x}.$$

由于發送器用来量测相当不同的物理量，所以各种發送器的作用原理是很不相同的。在許多电测非电学量的裝置中，应用一种發送器，其中非电学量的变化引起电阻的变化。这种發送器叫电阻式發送器或叫 R -發送器。讓我們在这一类發送器中拿几个例子来看一下。圖 13-47 所示为一种在量测液面設備中的变阻器型

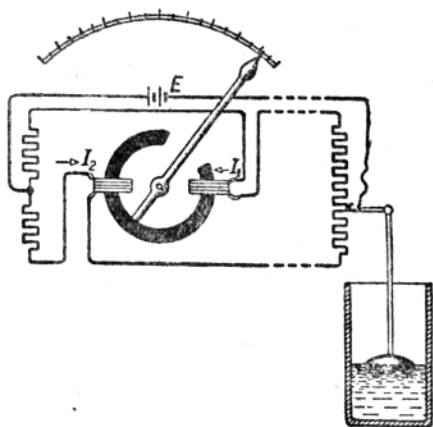


圖 13-47. 具有电阻發送器与电磁比率計的液面計綫路圖。

(所謂“电位計型”)电阻式發送器的構造。浮标放在要量测的容器中，用机械傳动的方法操縱变阻器的可动接触点，按照液面来改变接在具有鐮刀形鉄心的电磁比率計兩綫圈电路中电阻的比，这个比率計就是液面計的一部分。电流 I_1 、 I_2 决定于浮标的位置， I_1 、 I_2 流經两个固定綫圈，产生两个方向相反的力矩。其中每一个力矩都尽量要去吸动由鉄磁性物体制成的鐮刀形鉄心，使鉄心的中部和綫圈的中心靠近。但是力矩却随着鉄心的靠近而减小，然而向反方向作用的力矩这时却增加了，在鉄心的某一位置达成力矩的平衡。从 (13-8) 式可以看出，电磁型仪表中这两个力矩都是和电流的平方成正比的，因而也就和电源电压的平方成正比。但是这个电压的改变对两个力矩引起的影响是相同的，因此不会改变可动部分的位置。比率

計的标度尺直接按液面刻度。

圖 13-48 所示为具有两个碳柱 (1 与 2) 的电阻式發送器，用来量测压力 P 。碳柱由碳片堆成，它具有这样一种特性：它的电阻随着压力的改变而有很显著的变化。待测的力 P 作用于可动杠杆上，引起上面碳柱 1 压力的减低，因而使其电阻增加，同时下面碳柱 2 的压力增加，而它的电阻减低。可以把碳柱接在量测电桥上，作为两个臂。电阻的变化引起电桥对角綫中电流的变化，对角綫中接有电测仪表。仪表可以直接以压力为單位来分度。这种發送器構造簡單，碳柱容許很大的电流通过，具有很高的灵敏度，可以量测变化很快的压力。除了量测以外，它还可以应用在自动調整裝置中。

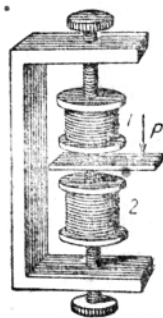


圖 13-48. 具有两个碳柱的电阻式發送器。

綫形电阻發送器張力計的示意圖如圖 13-49。是用来量测不同構造的变形程度的。它用細綫 (直徑 20 到 30 微米) 制成，細綫的电阻系数很大 (通常使用康銅——Cu 59%，Ni 40%，Mn 1%)。細綫用特制的膠貼在紙上。把發送器貼在要量测其变形程度的零件上。發送器的电阻的变化不仅是由于其尺寸的变化 (長度、截面积)，同时也由于物質構造的改變。

具有环管的电阻式發送器 (圖 13-50) 通常

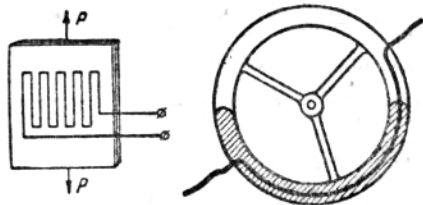


圖 13-49. 綫形电阻式發送器 (張力計)。圖 13-50. 具有环管的电阻式發送器。

应用于非电学量仪表讀数的傳送。它的主要部

分是一个密封的玻璃管，里面裝有鉑銻綫的电阻。管的一半盛以水銀。水銀可以把綫型电阻的一部分短路，短路部分的大小是随着管的位置变化而改变的。导线电阻的变化可用电学方法来量测。这种發送器用来傳送較大的角位移是很方便的。

●**感应式發送器** (L -發送器) 应用在量測设备的电源是交流电的情形中。这时，量測仪表一般地說是要比电阻式發送器来得复杂，但是感应式發送器具有許多重要的优点。圖 13-51 便是感应式液面指示器的接綫圖和外形圖 (除去外壳)，可以拿它来作为这类發送器的例

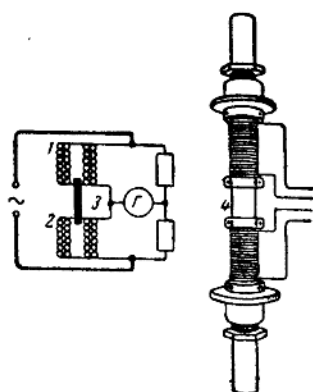


圖 13-51. 感应式發送器——液面計。

子。發送器的两个綫圈 1 和 2 包围着浮管 4。在管内浮标可移动鉄磁心 3，因而可以增加一个綫圈的电感而减少另一綫圈的电感。这样便破坏了交流电桥的平衡，这个交流电桥是以綫圈 1 与 2 为其兩臂的。因此，位于电桥对角綫的量測仪表 Γ 中产生电流，电流的大小由鉄心 3 的位置来决定。所以仪表 Γ 可以直接按液面高度来划分刻度。这种裝置特别适用于高压鍋爐，因为發送器的連系完全依靠电感，因而不会破坏鍋爐的密封。

电容式發送器 (C -發送器) 用来量測微小的移动或者尺寸。圖 13-52 所示为量測条帶厚

度 δ 的电容式發送器。条帶在平行板电容器的極板間移动，占据了板 II 之間空气隙的一部分

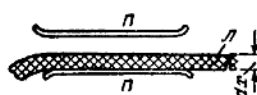


圖 13-52.

用来量測条帶 δ 厚度与特性的电容式發送器。

空間。这样就形成了一个有着分層介質的电容器 (參閱第 6-4 节)。条帶厚度的改变引起系統总电容的变化。

这种电容的改变可以用电学方法量測或者記錄下来，或者讓它去影响一个指示条帶厚度誤差超过容許范围的信号设备，或者自动地限制供应条帶的机构，使其只能送出厚度不超过許可范围的条帶。

圖 13-53 所示为用来量測微小尺寸的另一種电容式發送器 (測微計)。

移动仪器下部的接触杆 K ，可以改变發送器內空气电容器 C 的电容量。

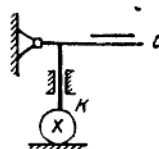


圖 13-53.

只有在最簡單的裝置中才可以直接量測發送器輸出电容式測微計。

端的电学量。通常在發送器和仪表之間需要許多中間樞紐。

如果电学量的变化小得不能直接量測的时候 (就像張力計或电容式發送器)，就必須用中間樞紐——电子管放大器 (參閱第 19-2 节)。

如果所測的量要傳送相当远的距离，通常适当地采用中間樞紐——轉換器，把發送器輸出的电学量轉換为另一种形式的电学量，后者在远距离傳送时比較簡單，而且不会發生畸变；例如电感的变化可以变成交流电頻率的变化。

在許多情形中，当正在量測时，必須消除电源电压变化的影响，例如这对于圖 13-51 的感应式發送器便是必須的。运用比率計的原理才可以消除这种影响。如果由于某种緣故不适于应用比率計的原理，例如由于指針式仪表的准确度不够，那么必須要有相当的中間樞紐——电

压稳定器。电压稳定器是一种保持负载电压恒定不变、不受电源电压波动的影响的设备。目前应用的是铁谐振式、离子式、电子式电压稳定器。

其实,在最简单的情况下,直读式仪表是用来当作电测非电学量设备中的量测器的,可是

在许多情形下,必须采用复杂的量测仪器——自动补偿器等。

当然,这里提到的仪表只是几个例子,目前在每一个工程部门,都有自己专门用途的仪器,用来电测各种非电学量。

第十四章 变压器

14-1. 总論

电工技术的主要任务之一是把能量从藏有廉价的自然资源(水落差, 泥炭, 煤)的地方输送到分布有用户的许多地方去。在这时候, 电力传输线的电压越高, 则输送同样功率所需的电流越小, 因而导线的截面积也就越小。因此, 经济的远距离输电只有在高压下才是可能的。但是要在发电厂里直接发出为输送数百公里远所需的高压电是极端困难的, 并且在如此高的电压下来应用电能也是很很不便的, 所以把低压的强电流转变为高压的但强度小到原来的许多分之一的电流或者倒过来的转变就显得十分必要了。在现代, 这一问题只有依靠工作于交流电之下的变压器才能获得既简便又经济的解决。

巴·尼·亚勃罗契柯夫在 1876 年研究并制成了变压器, 他把它应用在他自己所做的照明装置上。

变压器^①是以互感现象(第 5-5 节)为作用原理的静止的电磁装置。在变压器里面, 某一电压的交流电转变为同频率的另一电压的交流电。它有着在电方面互相绝缘的数个绕组(不少于两个)。和电源联接的绕组称作原绕组, 其他向外电路输出电能的绕组则称作副绕组。应用最广的是双绕组变压器(图 14-1), 我们在下面所要研究的也就是这种变压器。

如果原绕组端的电压——原电压 U_1 低于副电压 U_2 , 则变压器称为升压变压器; 相反的情形则称作降压变压器 ($U_1 > U_2$)。绕组按照额定电压的相对大小分为高压绕组 (B. H.) 和低压绕组 (H. H.) 两种。

^① 变压器的拉丁名 transformare——意为转换。

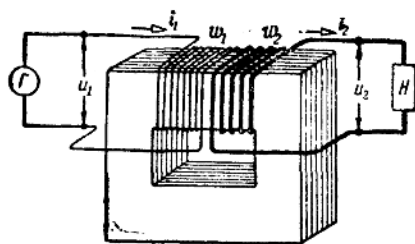


图 14-1. 具有铁心的双绕组变压器的装置图。

为了加强绕组间的磁的联系, 两个绕组一齐装在一个用电工钢片做成的闭合铁心上。在频率大约高于 20 仟周/秒时, 应用铁心就不适宜了, 这是由于铁损加大和磁通将挤缩于铁心表面的缘故(第 11-9 节)。因此制造空心变压器(没有铁心)供高频之用。

14-2. 变压器的作用原理

加在原绕组两端的电压 u_1 在这个绕组里产生交变电流 i_1 。和铁心线圈一样(第 11-7 节), 电流在变压器的铁心里激发出交变磁通 Φ 。由于这个磁通作周期变化, 在变压器的两个绕组里感应而生电动势:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{和} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}.$$

此处 w_1 和 w_2 分别为两个绕组的匝数。两个绕组中所感应的电动势的比值就等于这些绕组的匝数的比值:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

电动势的有效值和变压器磁通的幅值间的关系, 同铁心线圈一样, 可用以下的方程式来表示:

$$E_1 = 4.44 f w_1 \Phi_m, \quad (14-1)$$

$$E_2 = 4.44 f w_2 \Phi_m. \quad (14-2)$$

因此, 变压器的电动势的有效值间的比值也等于匝数间的比值:

$$E_1:E_2=w_1:w_2=k_{12}。(14-3)$$

这个比值称作变比。

变压器的效率很高, 平均约为 98%; 这就使得在额定负载下可以认为变压器原级绕组所取得的功率和副级绕组所发出的功率近似地相等, 亦即 $p_1 \approx p_2$ 或 $u_1 i_1 \approx u_2 i_2$, 于是,

$$i_1:i_2 \approx u_2:u_1 \approx w_2:w_1。$$

这个电流和电压瞬时值的比例对于幅值以至于有效值来说仍是正确的:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_2}{U_1}, (14-4)$$

这就是说, 当负载接近于额定负载时, 可以认为变压器各绕组中电流的比值等于相应的绕组中的电压或匝数的比值的倒数。

在变压器运行时, 原绕组和副绕组中的电动势分别起着不同的作用。原绕组中所感应的电动势 e_1 是作为反对原电流 i_1 的变化而产生的。就相位来说, 这个电动势差不多和电压 u_1 相反。和有感电路一样(第 7-7 节), 原电流

$$i_1 = \frac{u_1 + e_1}{R_1},$$

这里 R_1 是原绕组的有效电阻。由此得到原电压瞬时值的方程式:

$$u_1 = -e_1 + i_1 R_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1, (14-5)$$

这个式子可以看作是电平衡的条件: 加在原绕组两端的电压 u_1 永远为电动势 e_1 和绕组有效电阻上的电压降所平衡(第二项很小)。

副电路一边则另是一种情况。这里电流 i_2 是由电动势 e_2 所生的, 后者起着电源电动势的作用。当负载为纯电阻 R_n 时, 副电路的电流

$$i_2 = \frac{e_2}{R_2 + R_n};$$

其中 R_2 是副绕组的有效电阻 Φ 。

① 我们在此暂且不考虑由于漏磁存在而产生的原、副绕组的感抗, 关于这方面的问题将在以下提出。

就第一次近似来说, 副电流 i_2 对变压器原电路的影响将如下述。

经过副绕组的电流 i_2 力图在变压器铁心中产生磁通, 后者决定于磁化力 $i_2 w_2$ 。按照楞次定律, 这个磁通的方向必将与主磁通的方向相反; 换句话说可以说, 副电流力图削弱产生它的磁通。但是主磁通 Φ 的减弱将破坏电平衡关系 $u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}$, 而使原电压 u_1 的一边占优势, 所以伴随着副电流的出现原电流必将同时增加以抵消副电流的去磁作用而保持电的平衡关系。因此, 副电流的任何变化必定会引起原电流相应的变化。由于 $i_1 R_1$ 相当小, 所以从工程准确度看来副电流差不多不会影响到变压器主磁通的幅值以及它的随时而变化的性质, 因此主磁通的幅值 Φ_m 可以认为是一常数。这个常数 Φ_m 可以表征变压器运行于不变的原级外施电压 U_1 时的情形。

14-3. 变压器的空载运行

在变压器的原绕组上加以额定电压 U_1 ,

而将副电路开路, 这就是变压器的空载运行。变压器在这种运行情况下实质上与铁心线圈毫无区别。图 14-2 所表示的向量图差不多就是相应的铁心线圈的向量图的重叠, 所不同的只是某些符号变了, 另外还增添了一个向量 E_2 。

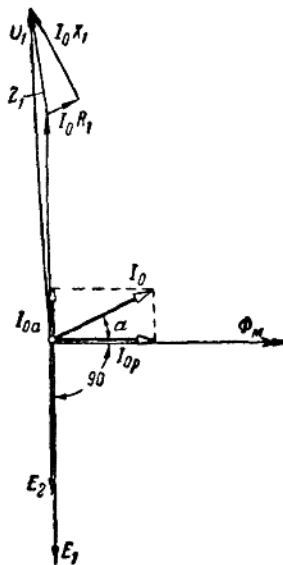


图 14-2. 空载运行时变压器的向量图。

经过原绕组的变压器空载电流