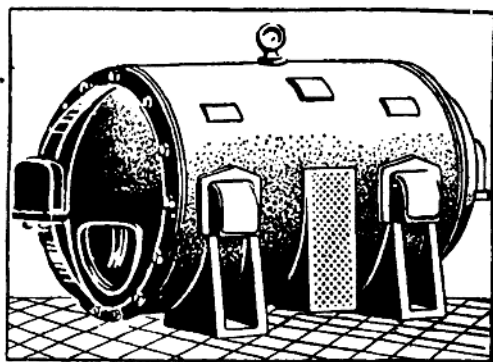


高频热处理丛书

第 8 册

高频加热用发电机

〔苏联〕P. П. 热日林 著



科学技术出版社

高频热处理丛书

第 8 册

高频加热用发电机

[苏联] P. И. 热日林著

崔思纯译

蔡瀛洲校

科 学



內 容 提 要

这本小册子叙述了被广泛地应用于金属感应加热装置上的感应式高频发电机結構的主要原理；研究了該型发电机运转的基本特性和与負荷参数相匹配的方法；并对企业中高频发电机的安装及运转作了說明。

这本小册子可供工业部門中将高频电流用在热加工方面的广大工作者参考。

高 頻 加 热 用 发 电 机

МАШИННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

原 著 者：(苏联)Р. П. Кежерин

原出版者 Машгиз • 1954 年版

譯 者 崔 • 恩 純

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 号)

上海市書刊出版登記證出 079 号

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海發行所总經售

統一書号：15119•514

開本 787×1092 1/32 • 印張 15/16 • 字數 41,000

1957 年 4 月第 1 版

1958 年 6 月第 2 次印刷 • 印數 4,001—6,000

定价：(10) 0.30 元

原 序

在熔煉、淬火、鍛造、模壓、釐焊及其他熱加工中，用于加熱金屬的許多高頻裝置是由高頻發電機供電的。高頻發電機的結構和制造如果很好，并且能得到妥善的運用，那麼此時它是一個很可靠的、很有效的電源。

維護人員對發電機內部發生的現象應該很好地了解，且對電機的各种工作條件能夠心中有數，只有這樣，電機才能正確地運轉和充分發揮其功能。但就工廠使用高頻加熱法的實際經驗所知，管理高頻發電機的人員並不總能充分了解發電機的性能。

高頻發電機和工頻為 50 周的标准同步電機相比，一直從工作原理解都具有許多特點。它與感應加熱裝置振盪回路并聯工作的條件也和标准同步發電機的工作條件根本不同。

但在一般書籍中關於這些問題几乎從來不提，因此就使得維護人員難于認識這類電機的特點。

這本小冊子里敘述了一些現在正在大量推廣的高頻發電機方面的基本知識，并介紹了選擇電機工作狀態的實際方法。

本書的內容是以“B. П. 沃洛格金教授”高頻電流科學研究所和蘇聯科學院高頻電熱試驗室的材料和實驗數據為基礎。本書對高頻發電機的近代情況亦作了概述，同時還研究了在調幅深的情況下無損耗無漏磁的理想感應式發電機的理論。

作者特別注意不飽和發電機，并力圖闡明對實用很重要的、最一般性的感應電機的特性。

作 者

目 录

原序

緒論	1
1. 发电机的基本电工学定律	2
2. 高频发电机的結構	11
3. 感应发电机的基本原理	18
4. 感应发电机的工作特性	28
5. 負荷与发电机的匹配	45
6. 常用的电机及其安装和運轉	53

緒 論

苏联电力网电流的标准频率是 50 周。較高的频率，在 10,000 周以下的叫做增高频率，而高于 10,000 周的叫做高频率。

感应加热用的增高频率电流可从功率达数百甚至数千千瓦的变频机取得。

增高频率的标准现在尚無明确規定，但依据經驗認為适当且广泛采用的有下列几种：500、1,000、2,500、8,000 周。感应加热装置可由变频机供电。变频机是由感应电动机和所謂感应发电机裝于同一机壳內組成，或者由單独的电动机和发电机組成。

本書將着重叙述感应发电机，也可称为“脉动”发电机。

在近代各种技术部門內，感应发电机与其他型式的电机相比已日見重要；它的主要用途是金属感应加热。

最早的各种感应发电机中，有一种就是由杰出的俄国电机师 П. Н. 雅勃罗契科夫設計成的；1877 年他取得这种結構的專利权。1882 年阿列克謝·克里明科又对感应发电机的結構作了进一步的改进。

但設計和制成特式增高频率和高频率发电机的功績应特別归之于 B. П. 沃洛格金教授。他从 1910 年到 1935 年間就創造出不同功率(0.5~600 千瓦)及不同频率(1,000~60,000 周)的各种电机。这些发电机对于发展我国無綫电技术有着重大影响；其中有几种直到今天还被用作工业裝置的电源。

1. 发电机的基本电工学定律

由机械能变为电能或由电能变为机械能的电机，均由两个相对转动的部分——定子和转子组成。定子和转子间有一空间，称为间隙。一般型式的电机的间隙都很小。例如：感应发电机的间隙仅为0.5~1.5公厘；只有发电厂所用的大型同步发电机，其间隙有时才达数十公厘。

间隙在电机中可以算作一个要紧部分，定子和转子间相互作用的机械力就在这个间隙中表现出来。当使转子转动的外力超过这种作用力时，电机便成为发电机（产生电能）；如由机械力本身使转子转动，则电机便成为电动机。

要使定子和转子之间产生相互作用的力，首先要在间隙中产生磁场。顺便提出，也可以制造不用磁场而用电场的电机，其中也包括高频电机在内。但是这种“静电式”电机由于体积笨重，还没有获得实际的应用。

电机间隙中的磁场可以有两种励磁方法：(1)永久磁铁；(2)通电的励磁绕组。高频电机可分为直流励磁式和交流励磁式。但无论哪一式的电机，都可以或用外电源励磁，或用自激方式励磁（自激系由电机本身供电）。下面我们只讲用直流外电源励磁的电机。

电机内导磁和导电部分统称为作用部分，以别于其余的结构部分。

转子和定子的磁作用部分通常用特种磁钢制成。这些作用

部分与空气隙一起組成一个完整的磁路。

我們要講一講磁路与磁場間的关系(图 1)。

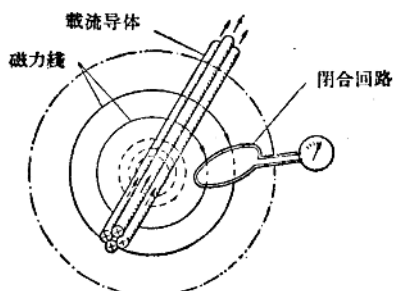


图 1. 载流导体的磁場。

——与伏特表电路耦合的磁力线；
 ----不与伏特表电路耦合的磁力线。

大家知道，电流通过导体，在它的周围就产生磁場，这导体就好象是磁場的產生源。载流导体束的特征是具有所謂磁动势，磁动势的值决定于导体的根数 w_0 和每根导体中通过的电流 i_0 的乘积。若以 F_0 表示磁动势，則得

$$F_0 = i_0 \cdot w_0. \quad (1)$$

磁动势的大小以安匝表示。

在磁动势的作用下，载流导体的周圍便产生磁通，这磁通可以想像为环繞载流导体的閉合綫，磁力綫一定圍繞在产生它們的导体周圍，而外层磁力綫則圍着距载流导体較近的內层磁力綫。这样的磁通模型就很明显地表示出磁場的特性，但应注意，这不过是模型。

关于磁場的一个重要概念就是磁感应概念，磁感应的大小取决于磁力綫的密度，以字母 B 表示，其計量單位为伏-秒/公尺² 或高斯 $\left(1 \frac{\text{伏-秒}}{\text{公尺}^2} = 10^4 \text{ 高斯} \right)$ 。

磁場主要定律之一是磁動勢定律，此定律有時稱為全流定律。其解說如下：

圍繞在載流導體束周圍的任何一根磁力綫，都由磁動勢（等於導體匝數與電流值的乘積）產生〔見公式（1）〕。另一方面，驅使磁力綫通過每段磁路所需的磁動勢 F_i ，是決定於該段磁路的長度 l_i 、磁力綫密度 B_i 及介質的導磁係數 μ_i 。因此

$$F_i = \frac{B_i l_i}{\mu_i} \quad (2)$$

磁動勢的定律是載流導體周圍的磁動勢，它等於各段磁路上驅使磁力綫通過磁路所需磁動勢之和。

每根磁力綫的磁動勢定律以下式表示之：

$$F_e = \frac{B_1 l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_2} + \dots + \frac{B_n l_n}{\mu_n} \quad (3)$$

式中下標 1、2、3、…… n 為磁力綫各段的標志。

上式在某些情況下是不方便的，例如，在磁力綫通過鋼材的情形中，因為導磁係數 μ 將視磁感應強度 B 而定。對於象鋼這一類的材料，應利用磁場強度 H 這一概念，磁場強度的意義是 $\frac{B}{\mu}$ ，故可說 H 是 B 的函數，可利用圖表來求得 H 的數值。磁場強度的單位是安匝/公尺²。 B 和 H 間的關係圖是根據鋼材試驗結果而繪制的。

利用磁場強度 H ，磁動勢定律即可寫成下式：

$$F_e = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n \quad (4)$$

如果載流綫圈如圖 2 那樣被繞在鋼制導磁體之內，則磁力綫的環形磁路將通過四段磁路——兩次通過鋼材，兩次通過空氣隙。驅使磁力綫穿過長為 δ 的空氣隙磁路的磁動勢，可用公式求得：

$$F_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} \delta, \quad (5)$$

式中: B ——空气隙中的磁感应强度, 伏·秒/公尺²; δ ——空气隙长度, 公尺; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ——空气的导磁系数, 亨/公尺。

驱使磁力线通过长为 1 公尺线段的磁动势, 称为单位磁动势, 它在数值上等于磁场强度 H 。对于钢材, 该值又与磁感应强度 B 有关。

不同钢材的单位磁动势与磁感应强度的关系图是各不相同的。这种关系图称为钢的磁化特性曲线图。若知道钢材各段的磁感应强度(磁通量已给定), 就可求得各段的单位安匝数, 再若知道各段磁路的长度, 就可求得各段磁路的磁动势。

如果磁通量所通过的磁路截面为 S , 则磁感应强度

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ 伏·秒/公尺}^2, \quad (6)$$

式中: Φ ——单位为伏·秒, S ——单位为公尺²。

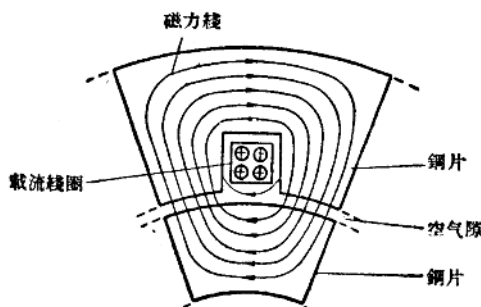


图 2. 基本磁路系统

磁力线通过磁路各段所需的磁动势 F_1 与磁通量 Φ_1 之比称为该段磁路的磁阻。以 r_m 表示, 写成公式:

$$r_{m1} = \frac{F_1}{\Phi_1} \frac{1}{\text{亨}} \quad (7)$$

磁阻的倒数 $\frac{1}{r_{m1}} = g_{m1}$ 称为該段磁路的磁导。

励磁繞組置放的位置随电机的型式而定，或是放在定子內，或是放在轉子內。励磁繞組放在槽內距間隙較近的地方，使其磁力綫能通过間隙而在槽的周圍形成一閉合磁路。除励磁繞組外，电机內还有工作繞組，它們是安放在另外的槽內。

电流通过工作繞組时正象通过励磁繞組一样，也产生磁动势。如果考察一下在电机轉动时的閉合磁力綫，就可相信，大部分的磁力綫总是同时圍繞在励磁繞組和工作繞組的导綫周圍；就是說，这些磁力綫是由两个繞組的合成磁动势而产生的。工作繞組所产生的磁动势有时称为反磁动势。

仅圍繞在一个繞組上的磁力綫称为漏磁通，它們在电机能量变换过程中是不起有功作用的。

第二个非常重要的定律是感应定律，电机就是根据它来制成的。感应定律是說明磁力綫(磁通)与导电回路相耦合时所发生的情况。

我們試想象，有一束载流导体——磁动势源——产生出磁通来，磁通的一部分穿过閉合的导电回路(图 1)。这个閉合回路就与导体束所产生的部分磁通相交連。根据感应定律：当穿过閉合回路的磁通变化时，即穿过閉合回路的磁力綫数量改变时，回路中将感应出电动势来，电动势 e 的大小，决定于磁通变化的快慢(速率)和工作繞組的匝数 w_p ：

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} w_p, \quad (8)$$

式中： $\Delta \Phi$ ——在 Δt 時間內磁通量的变化；負号表示只有磁通减

小而不是增大时 e 值才是正值。

在闭合回路中，不但外部磁通穿过时的变化能感应出电动势，就是它本身所产生的磁通在变化时亦能感应出电动势，例如在导体中通过交流电时。

电机内的转子旋转时，工作绕组与励磁绕组间的磁耦合也随之改变。这就是工作绕组内能感应出电动势的原因。

励磁绕组在电机间隙内所产生的磁场，能使转子的表面上引起一种将转子“拉向”定子的机械力。若转子处在对称位置时，这种力只是将转子均匀地拉向各方。间隙内磁场若是由两个绕组——励磁绕组和工作绕组所产生且工作绕组内通以有功负荷电流时，则磁力线的方向就不如前述与半径方向一致，而偏转某一角度。因此在转子表面上将出现一种使转子旋转的力，即有效力。在它的作用下，电机内即进行能量的变换。

为了表示按正弦律随时间而变化的磁值和电值，在电机学中采用向量表示法或符号表示法。根据这种方法，假如有一个电压

$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (9)$$

就可向量来表示它的正弦值。取正弦电压的振幅 U_m 作为向量的长度，并假定这个向量按反时针方向绕着平面上原点 O 匀速旋转(图 3)。此向量在固定轴 OY 上的投影，就将按正弦律随时间而变化。实际

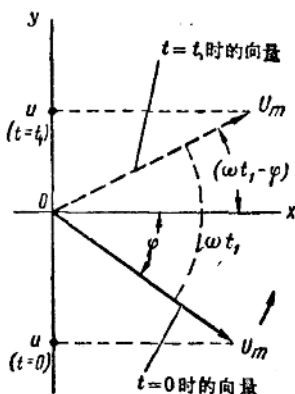


图 3. $t=0$ 和 $t=t_1$ 时的向量 u

上，一般所关心的只是正弦值的振幅 U_m 和初相角 φ ，而不是瞬

时值 u 。当 $t=0$ 时，正弦波的初相角在图上是以向量和垂直于 OY 轴的 OX 轴間所夾的角来表示。以向量来表示正弦值的图，称为向量图。

在电工学中最常用向量来表示正弦电流和电压。向量表示法方便之处是，能够很明显地对比出数个同一性質的振幅和不同值的相位，例如电流和电压的相位，从而确定出相位差。正弦电压和电流間的相位差，在向量图上可用相应的电压和电流向量間的夾角来表示。

向量表示法只适用于频率相同的电流、电压和其它量值的比較。用此法很容易求得几个正弦值的和或差，即按几何的向量合成方法求出平行四边形的对綫或开口多角形的封閉边。

各向量在向量图上不仅可从一原点引出来表示，且尚可認為比較方便時將其平行地移至图上任意一点来表示。如图4a,

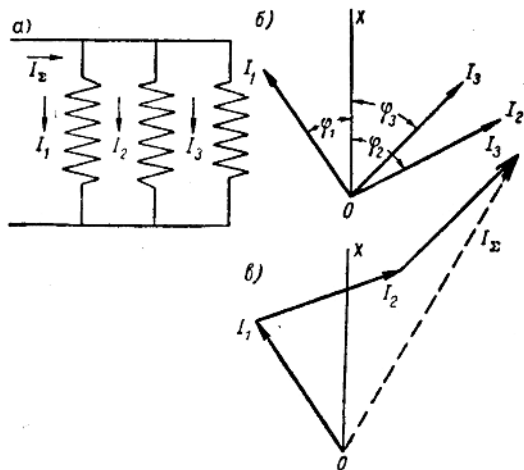


图 4. 在三條平行支路中交流电流 I_1 , I_2 , I_3 的向量

是一个具有三条支路的电路图，三交流电流分别沿着这三条支路流向共同点 A 。图 46 为上述三电流的向量图，可用以比较各电流的振幅及相位。图 4B 是用另一种方法表示上述三电流的向量图，用该图可以很容易地求出各向量的和。

采用向量表示法又可將电路中的一作用电流分解成若干电流成分。电路中一作用电流有时可用兩电流成分来代替。其一与电路中的电压同相，另一与电压成 90° 角。前一种电流成分称为有功电流，而后一种称为無功电流。如果無功电流的向量依反时针方向比电压向量轉过 90° 角，称为超前电流。如果依顺时针方向轉过 90° 角，則称为滞后电流。水变阻器內的电流，一般可作为純有功电流之一例，导納也可認為是純电导。綫繞变阻器內的电流在频率达 2,500~8,000 周时，就有無功成分的电流，因为一般構造的变阻器都有相当的电感。电导以 g 来表示。

在电容器的电容綫路中所流过的电流可認為是純無功的超前电流(或电容电流)。电容器的容納以 b_c 表示，且 $b_c = \omega C$ ，此处 C 为电容，其單位为法拉； $\omega = 2\pi f$ (f ——频率，單位为周)； b_c 通常視為正值。

若在电感綫圈內沒有能量損耗，則其中流过的是純無功的滞后电流。

实际上，在綫圈內除了無功电流(电感电流)以外，还有有功电流，后者是表现为发热现象的能量损失指标。

綫圈或其他裝置的感納以 b_L 表示， $b_L = \frac{1}{\omega L}$ 。此处 $\omega = 2\pi f$ ， L ——电感，亨利； b_L 通常視為負值。

在具有电导 g_n 和正或負电納 b_n 的兩条支路所組成的电路中(图 5)，电路的等效导納

$$y_n = \sqrt{g_n^2 + b_n^2} \quad (10)$$

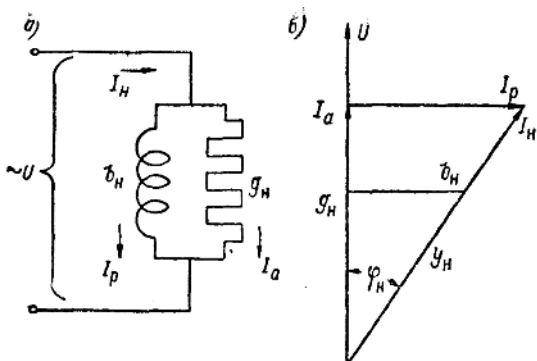


图 5. I_a 和 I_p 一电流的有功成分及无功成分

这样的电路中的电压和电流间的相角, 决定于下式:

$$\operatorname{tg} \varphi_H = \frac{b_H}{g_H}, \quad (11)$$

由此可得

$$g_H = y_H \cos \varphi_H, \quad (12)$$

$$b_H = y_H \sin \varphi_H. \quad (13)$$

如果电路是由具有电导 g_H 、感纳 b_L 和容纳 b_C 三条支路所组成, 则将 $(b_C - b_L)$ 代入上面公式中的 b_H , 就可求出 y_H 及 φ_H 。

在电流向量图上的各个向量, 都可按导纳的比例来测量。这时要将各支路的电流除以各支路的共同电压。于是得出的就不是电流向量图, 而是导纳向量图了。这样就可把导纳值看向量值。因此, φ_H 角也可以称为导纳 y_H 的相角。

电路中的导纳 y_H 有时又可以改成它的倒数 $z_H = \frac{1}{y_H}$ 来讨论, z_H 称为电路的阻抗。阻抗 z_H 又可看作电阻

$$r_H = z_H \cos \varphi_H \quad (14)$$

和电抗

$$x_H = z_H \sin \varphi_H \quad (15)$$

串联的结果。这里应特别注意， r_n 不等于 $\frac{1}{g_n}$ ； x_n 不等于 $\frac{1}{b_n}$ 。

电路中有线圈或其他电感元件时，可用电桥来测得线圈的电阻 r_n 和电感 L ，于是电抗 $x_n = \omega L$ 也可求得。线圈的导纳含有如下两个成分：

$$\text{电导 } g_n = \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2}, \quad (16)$$

$$\text{感纳 } b_n = \frac{x_n}{r_n^2 + x_n^2}. \quad (17)$$

导纳 y_n 的概念适用于由几个并联支路组成的电路；而它的倒数——阻抗 z_n 的概念，则用于由几个串联支路组成的电路比较方便。

2. 高频发电机的结构

只有频率不超过 1,000 周、功率不小于 500 千伏安的高频发电机才能根据具有凸极转子励磁的同步发电机的构造原理来制造。当功率更小和频率更高时，由于转子上相邻磁极间的间隙过小，所以使用这种结构的可能性就受到了限制。因而难以将励磁绕组放入转子内。

感应发电机与标准同步发电机不同，它并不受上述的限制。标准同步发电机内的励磁绕组和工作绕组绕在电机的不同部分上，一个绕在定子上，另一个绕在转子上，这样，当电机运转时，两绕组就相对地位移；在感应发电机内的这两绕组之间是永远没有相对运动的，通常把它们放在定子上，而在转子上是不放任何绕组的。

感应发电机的结构式样有多种。首先可根据励磁绕组放置的位置不同，将它们分为两类。第一类：励磁绕组放在定子槽

內,并且它們不環繞轉子的軸綫,这类称为分段磁路式。励磁繞組所产生的磁通跨越两段之間而成閉合回路,如图 6 所示。沿定子內表面一周极性的改变次数相当于定子励磁繞組槽的数目,在这种情况下,每一段即是一极。这种发电机的轉子是用 0.2~0.35 公厘厚的电机矽鋼片叠成。

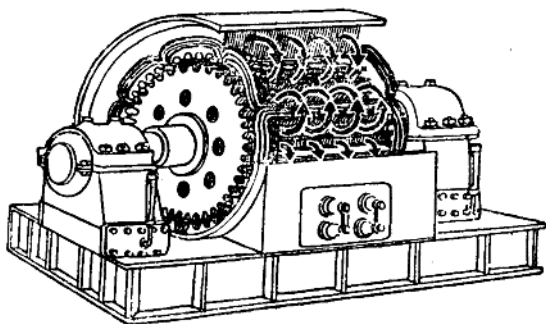


图 6. 分段磁路式感应发电机。箭头表示激励磁通的方向。

第二类:发电机的励磁繞組是成环狀繞着轉子的軸綫,故可称为环形磁路式。这类发电机一般是由两个或数个用鋼片叠成的定子組成,并压入鋼或鑄鉄制的实心体壳內(图 7)。轉子通常是用一整块鋼制成,轉子的周圍沿軸向銑成許多槽;有时为了减少同空气的摩擦,再用非磁性材料(如鋁)把槽填滿。环形励磁繞組是放在两定子之間的縫隙內。在此情况下,激励磁通从一个定子通过轉子和外壳到另一个定子而閉合。每个定子周圍內表面的极性总是不变的,并且相鄰两定子的极性总是相反。

感应发电机轉子的表面为齿狀(图 8)。轉子齿頂的寬度約为齿距的 40%。齿間凹槽的底常成圓形,槽深一般不超过槽寬。

为了解感应发电机的作用原理,現在我們假定定子上的齿