

电 力 机 车 丛 书

主 变 压 器 及 电 抗 器

许 荣 华 编

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 7 年 · 北 京

内 容 简 介

本书主要介绍韶山1型、韶山3型电力机车主变压器及电抗器的原理、结构、计算、试验、维护、故障等。此外，本书还介绍了电力机车用高压电流互感器和铁磁谐振稳压变压器的结构。对国外电力机车主变压器及电抗器的概况也作了介绍。

电力机车丛书

主变压器及电抗器

许荣华 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 张贵珍 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米 1/32 印张：7.25 插页：4 字数：171千

1987年8月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,000册 定价：1.75元

前 言

为了适应我国铁路干线电气化事业的迅速发展，满足广大现场的工人、工程技术人员的需要，编写了《主变压器及电抗器》这本书。

本书以韶山1型、韶山3型电力机车主变压器及电抗器为典型产品，介绍主变压器和电抗器的原理、结构、计算、试验、维护及故障。力求理论联系实际，并运用一些图表来说明，使其易于理解。此外，本书还介绍了6G、E-120、8K型等国外电力机车主变压器及电抗器的概况。

由于编者水平不高，书中错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1986.4

目 录

第一章 绪 言	1
第二章 变压器的工作原理	6
一、变压器基本工作原理	6
二、变压器的空载运行	10
三、变压器的负载运行	13
四、多绕组变压器及其运行特性	18
五、分裂变压器	28
第三章 韶山 1 型电力机车主变压器	34
一、概 述	34
二、主变压器器身	40
三、主变压器油箱	62
四、主变压器油保护装置	64
五、主变压器冷却系统	66
六、变压器油	70
七、试验、使用维护及典型故障	73
八、JDFP-5600/25型主变压器技术数据	81
第四章 韶山 3 型电力机车主变压器	83
一、概 述	83
二、主变压器器身	85
三、油箱	99
四、冷却系统	101
第五章 主变压器计算	105
第六章 电抗器	141
一、韶山 1 型电力机车平波电抗器	141
二、韶山 3 型电力机车平波电抗器	152

三、平波电抗器的计算	154
四、分流电抗器	158
五、分流电抗器电感计算	160
第七章 电流互感器	165
一、电流互感器基本工作原理	166
二、韶山1型电力机车用高压电流互感器的技术 数据和结构	168
三、试 验	171
四、故 障	174
五、低压电流互感器	174
第八章 铁磁谐振稳压变压器	176
一、工作原理	176
二、韶山3型电力机车用稳压变压器技术 数据和结构	179
三、有关设计计算的几个问题	186
第九章 国外电力机车主变压器及电抗器介绍	189
一、6G型电力机车主变压器及平波电抗器	191
二、E120型电力机车主变压器	214
三、8K型电力机车主变压器及电抗器	217

第一章 绪 言

电力机车主变压器是根据电磁感应原理制造的电气设备。

自从交流电力机车问世以来，电力机车主变压器就和机车结下了不解之缘。主变压器把接触网的25kV高压电降为具有多种电压的低压电，以满足机车各种电机、电器工作的需要。因此可以毫不夸张地说，没有主变压器就没有大功率电力机车。

主变压器是单相降压变压器。

电抗器、互感器由于其基本原理和结构与变压器有相似之处，常和变压器一起统称为变压器类产品。

数十年来，电力机车主变压器得到了迅速发展。我国自1958年以来，已生产过韶山1、韶山2、韶山3型电力机车的主变压器，在1985年生产了韶山4型电力机车主变压器。在1986年生产了用作高速客运的动车组的全密封动车变压器。

根据铁心结构的不同，主变压器可分为心式（例如韶山1、韶山3型电力机车主变压器）、壳式（例如韶山2、6G型电力机车主变压器）及辐射式（如瑞士Re4/4IV机车主变压器）变压器，如图1—1、1—2、1—3所示。

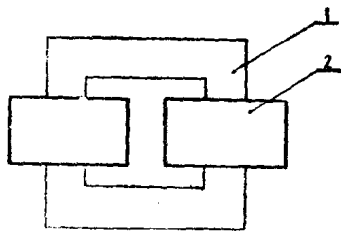


图1—1 心式变压器

1 — 铁心；
2 — 线圈。

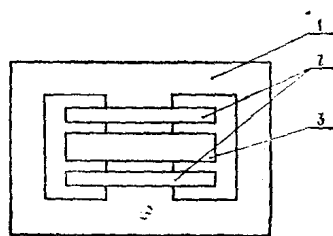


图1—2 壳式变压器

1 — 铁心；2 — 低压线圈；
3 — 高压线圈。

根据调压方式不同,主变压器可分为高压侧调压变压器、低压侧调压变压器(指调压开关调压)

及晶闸管控制调压变压器。而晶闸管电力机车的发展又给主变压器提出了新的课题,例如要求主变压器各牵引绕组之间磁的耦合要疏、辅助绕组和励磁绕组及取暖绕组对牵引绕组的耦合也要疏、各牵引绕组的阻抗电压要相等(所谓等阻抗变压器),这就出现了分裂变压器。例如联邦德国

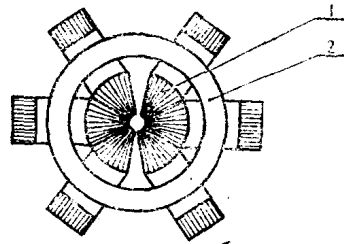


图 1—3 辐射式变压器
1——铁心; 2——线圈。

E120型电力机车主变压器及英国给巴西制造的机车主变压器,就是单相双线圈四分裂变压器,苏联给芬兰制造的 Sr_1 型机车主变压器则是单相双线圈双分裂变压器,通常辅助绕组、励磁绕组可以是不分裂的。壳式变压器只有一个铁心柱,要达到四分裂那样的效果有困难,故人们也注意如何在心式变压器上采用先进的绝缘结构、绕组型式以及新材料的应用,使其轻量化,达到较好的技术经济指标。

为了提高机车可靠性,增强平波电抗器的过载能力,平波电抗器改用油冷却并与主变压器共油箱。例如6G型电力机车(壳式)、瑞典 RC_4 及 RC_5 (心式)、瑞士 $Re4/4IV$ (辐射式)等电力机车。

在设计机车时,如何根据主变压器的容量来估计主变压器的体积和重量,是机车设计者很感兴趣的问题。

人们往往利用相似法则来解决这个问题。就是说,在一定的容量范围内,变压器在几何尺寸上是相似的,它的各种尺寸彼此成比例。这种估算虽属粗糙,但作为初步分析用,无疑是有价值的。

变压器的增长规律见表1—1,条件是铁心的磁通密度与线圈的电流密度不变。实际上,铁心的磁通密度决定于铁心的材

料，一般变化不大（例如，对于国产冷轧硅钢片 DQ151-35，考虑电网电压波动，磁通密度一般在1.6T左右）。线圈电流密度主要决定于材料和冷却条件，变化也不大。

磁通密度、电流密度不变时的

变压器增长规律

表 1—1

序 号	名 称	比 值
1	变压器线性尺寸	k
2	铁心柱有效截面 A_i	k^2
3	每柱磁通 $\Phi = B \cdot A_i$	k^2
4	每匝电势 $e_i = 4.44 f B A_i$	k^2
5	线圈导线总截面 $A \cdot N$ A ——线匝截面 N ——线圈匝数	k^2
6	线圈磁势 $IN = j A \cdot N$	k^2
7	变压器额定容量 $S = m \cdot U \cdot I = m \cdot e_i N I$ m ——相数，单相时 $m = 1$	k^3
8	有效材料重	k^3
9	变压器损耗（铜损加铁损）	k^3

若以容量 S 为基础，则由表 1—1 可以看出

$$G \propto S^{\frac{3}{4}}$$

$$P \propto S^{\frac{3}{4}}$$

即重量（因而体积）和损耗与容量的3/4次方成正比。

以上分析仅是从几何相似这个角度来考虑的，然而由于机车对主变压器的要求各异，例如机车主电路、阻抗电压、通风冷却等，都会对主变压器的重量、体积及效率产生较大影响。众所周知，过高的阻抗电压，会使变压器的铜重显著增加，甚至变成“铜变压器”。

机车用主变压器的特点大致可以归纳为以下几方面:

1. 耐振动。要求各部件有防松装置,有足够的强度和刚度。
2. 重量轻、体积小。尺寸受机车限制。
3. 检查、维修方便。

4. 电网电压变化大。这就要求磁通密度不能过高,以便在高网压下正常工作。

5. 为满足机车调速要求,变压器绕组要有较多的抽头。以韶山1型电力机车主变压器为例,仅导线焊接部位就有500处之多。

6. 对阻抗电压要求高,以满足机车对调速及整流器短路保护的要求。

7. 正、负半波对称性要好,避免铁心的直流磁化。应使波形畸变尽量小、对通信干扰影响尽量小。

8. 主变压器是多绕组变压器。各绕组之间耦合程度要适当,有的要求密耦合,有的要求疏耦合。对于晶闸管控制的机车主变压器,其辅助绕组受牵引绕组换流的影响要小。因为在换流时(不是指自然换流),牵引绕组流过的电流不但影响辅助绕组的电压变动率,而且还使辅助绕组的电压波形变坏。

9. 用铜多

不难证明,要使变压器使用材料的价格最低,应使变压器的铜重与铁重(指硅钢片)之比等于铜材价格与硅钢片价格之比。过去这个比值一般取1:4左右。现在一般都采用导磁性能优良的晶粒取向冷轧硅钢片,这就使比值变为1:3左右了。然而,电力机车主变压器为了满足机车要求,这个比值一般为1:2,有的甚至达到1:1(例如韶山1、韶山3型电力机车主变压器)。铜材用得多了不但使主变压器造价高,而且还使冷却困难,冷却器庞大,这对轻量化是不利的,变压器的效率也因此而受到影响。不过,对主变压器来说,低损耗、高效率并不是主要目标。为了减轻重量,通常是要牺牲一些效率指标的。

主变压器通常不做成干式的。

电力机车中还装有各种电抗器。例如,限制牵引电流脉动的

平波电抗器，改善牵引电动机换向的分流电抗器，改善功率因数的滤波器用谐波电抗器，电路换流用的换流电抗器等。

平波电抗器有干式的，也有油浸的（与主变压器共油箱）。按磁路来分，平波电抗器有闭磁路（壳式、心式），也有开磁路（如单柱式，无轭双柱式）。平波电抗器用油浸是为了提高机车的可靠性和过载能力，这是发展趋向。当然，用油浸并与主变压器共油箱，就不能采用散磁过大的开磁路结构。

分流电抗器一般有两种结构形式：开磁路（H形结构）和闭磁路结构。容量大的就不能用开磁路结构。如果牵引电机换向性能好，分流电抗器是可以取消的。

同主变压器一样，电抗器也要力求尺寸小、重量轻。一方面要适当提高绝缘材料等级，另一方面要选择省铜的铁心结构。

在电力机车车顶上装有电流互感器和电压互感器。电流互感器主要用作保护，称为保护级电流互感器（精度较低）。当原边电流过载时，给出信号，使其它保护电器动作。也有用作测量的，称为测量级电流互感器（精度较高）。

电压互感器用作机车网压及耗电量测量。韶山1型及韶山3型电力机车都未装电压互感器，网压表及电度表的电压线圈直接接在辅助绕组的端子上。这种接法有三个缺点：其一是电压数值不准，一般偏小。原因是辅助绕组对牵引绕组没有退耦。当牵引绕组流过电流时，那么辅助绕组的电压一般是下降的（只有机车启动时，起初几个级位是上升的）；其二是相相差过大；其三是辅助绕组的电压波形受主电路换流的影响，不是正弦的。按苏联经验，大约可使机车电度表的读数偏小5%。综上所述，在韶山4型电力机车车顶上装设了电压互感器。进口的8K型电力机车也装了电压互感器。

近年来，我国铁道电气化事业发展迅速，对主变压器的要求越来越高。学习和运用国内外变压器方面的先进经验，逐步提高我国电力机车主变压器及电抗器的技术水平，使之适应电力机车事业的需要，乃是我国电力机车工作者的一项重要任务。

第二章 变压器的工作原理

一、变压器基本原理

(一) 极性和同铭端

变压器的基本组成部分是铁心及线圈。图 2—1 所示为双绕组变压器原理图。

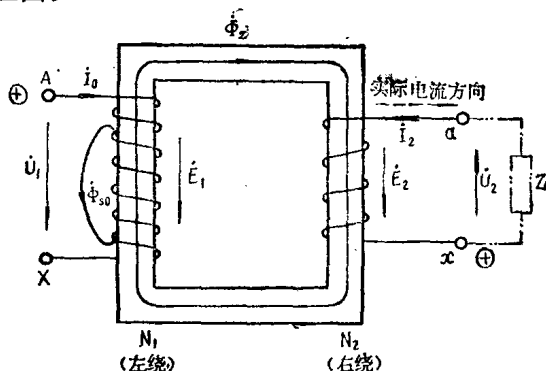


图 2—1 双绕组变压器原理图

通常一次线圈的头用字母 A 表示，尾用字母 X 表示；二次线圈的头用字母 a 表示，尾用字母 x 表示。当一次线圈接入交流电压 $\dot{U}_1$ 后，一次线圈就流过交流电流 $\dot{I}_0$ （空载电流）。 $\dot{I}_0$ 产生沿铁心闭合的主磁通 $\dot{\Phi}$ 和少量的沿线圈周围非铁磁介质而闭合的空载漏磁通 $\dot{\Phi}_{s0}$ 。空载主磁通 $\dot{\Phi}$ 的方向是按右螺旋法则确定的。

当由一次线圈产生的主磁通穿过二次线圈时，二次线圈内必然产生感应电势。假定二次线圈接一个负载 Z ，那么根据楞次定律，二次线圈的电流 $\dot{I}_2$ 实际应这样确定：根据右螺旋法则，由 $\dot{I}_2$ 产生的磁通应抵偿主磁通 $\dot{\Phi}$ 的变化，即和 $\dot{\Phi}$ 方向相反。因此实际的二次线圈电流 $\dot{I}_2$ 是由 a 端流出，如图 2—1 虚线箭头所示。

实际的二次线圈电压也和图 2—1 所示的 $\dot{U}_2$ 方向相反。注意，

这种分析对判别变压器的极性和同铭端很重要。

在图 2—1 中，为什么要把二次线圈的电压、电流方向都标成与实际相反呢？这是一个惯例问题。在各种电机、变压器中，为了用同一个方程式表示同一电磁现象，通常总是选定好各量（例如电压 $\dot{U}$ ，电流 $\dot{I}$ ，磁通 $\dot{\Phi}$ 等）的正方向，用箭头表示之。注意，这些箭头并不表示电压或电流的实际方向，例如电流就可以朝向箭头方向相反的方向流，这时电流就是负的了。

以图 2—1 为例。先看一次线圈，当 $\dot{U}_1$ 为正时， A 的电位高于 X 的电位， $\dot{I}_0$ 由 A 流向 X ，这就是所谓的“电动机”惯例，变压器像电动机一样，从电网吸取电能。 $\dot{\Phi}_2$ 的方向是按右螺旋法则定出来的， $\dot{I}_0$ 的方向确定后， $\dot{\Phi}_2$ 的方向自然也可确定。

电势 $\dot{E}_1$ 的方向应产生去磁的电流，即实际的 $\dot{E}_1$ 方向此时应向上。但因习惯上往往标 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{I}_0$ 为同一方向，这样 $\dot{E}_1$ 向下为正方向（与实际方向相反了）。按此可得 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_2}{dt}$ ，前面的负号就代表这个意义。

再来看 $\dot{E}_2$ 的方向。因为 N_2 的绕向和 N_1 的绕向相反，且此时穿过 N_2 的主磁通 $\dot{\Phi}_2$ 向下，也与 N_1 的主磁通方向相反，负负得正，因此 $\dot{E}_2$ 的方向就与 $\dot{E}_1$ 的方向相同，也向下了。 $\dot{I}_2$ 的方向应与 $\dot{E}_2$ 相同，如前述。至于 $\dot{U}_2$ 的方向，因为二次线圈习惯上采用“发电机”惯例，即当 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 同时均为正或同时均为负时，功率自变压器输出，这就要求电流 $\dot{I}_2$ 自高电位流出，因而 $\dot{U}_2$ 的正方向只能是向上（取决于 $\dot{I}_2$ 的方向）。

需要说明的是，这里为了分析方便，把一次线圈和二次线圈分别放在两个铁心柱上，而实际是不能这样分开放置的，因为这样的变压器是不能带负载运行的，因此一次线圈和二次线圈总是置于同一心柱上。

（二）电压比和电流比

根据电磁感应和磁势平衡规律，并忽略线圈电阻、漏抗、铁心损耗等，可得出一次电压

$$U_1 = E_1 = 4.44f \cdot N_1 \cdot A_l B_m \times 10^{-4} \quad (\text{V}) \quad (2-1)$$

式中 f ——频率，工频为50Hz；

N_1 ——一次线圈匝数；

A_i ——铁心柱有效截面 (cm^2) ；

B_2 ——铁心柱磁通密度幅值 (T) 。

同样，二次电压

$$U_2 = E_2 = 4.44 f \cdot N_2 \cdot A_i \cdot B_2 \times 10^{-4} \quad (\text{V}) \quad (2-2)$$

那么

$$K_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (2-3)$$

K_{12} 称为电压比，简称变比。

对于韶山1型电力机车主变压器，其 $N_1 = 1200$ 匝， $N_2 = 98$ 匝，那么

$$K_{12} = \frac{1200}{98} = 12.245$$

根据安匝平衡原理可得

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (2-4)$$

于是得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K_{12}} \quad (2-5)$$

即电流比为电压比的倒数。

(三) 容 量

一次线圈容量 $S_1 = I_1 U_1$

二次线圈容量 $S_2 = I_2 U_2$

型式容量 $S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{I_1 U_1 + I_2 U_2}{2} \quad (2-6)$

二次线圈的容量可以与一次线圈的容量不相等，例如韶山1型电力机车主变压器高压绕组（一次侧）容量 $S_1 = 5770 \text{ kVA}$ ，低压牵引绕组分成二组，每组容量为 3900 kVA ，故 $S_2 = 7800 \text{ kVA}$

（未计及辅助绕组容量）。因此该变压器的型式容量为 $S = \frac{1}{2}$

$(5770 + 7800) = 6785 \text{ kVA}$ 。通常所说的韶山1型电力机车主变压器容量为 6300 kVA ，是指容量等级（例如 5600 kVA ， 6300

kVA, 7000kVA等), 不是这种变压器的真实容量。

(四) 变压器的折合

一般说来, 变压器二次侧线圈与一次侧线圈之间没有直接的电气联接, 一、二次线圈的匝数通常都不相等, 这就给变压器的分析带来了困难。为了便于分析, 需要把二次侧的电压、电流、电阻、电抗等都折算到一次侧, 使二个电路变成一个电路, 经过折合的变压器, 其一次侧线圈和二次侧线圈的匝数比变为 1:1, 这就是折合的目的。

通常总是把二次侧的参数折合到一次侧, 经过折合的参数就在原参数的右上角加“'”, 如 E_2 、 I_2 、 r_2 、 X_2 、 Z_2 等右上角加“'”, 就变成 E'_2 、 I'_2 、 r'_2 、 X'_2 、 Z'_2 , 表示已经折合了。如电势

$$E'_2 = E_2 \cdot \frac{W_1}{W_2} = K_{12} E_2 = E_1 \quad (2-7)$$

$$\text{则电流} \quad I'_2 = \frac{I_2}{K_{12}} \quad (2-8)$$

电阻为 r'_2 , 因为

$$(I'_2)^2 \cdot r'_2 = I_2^2 \cdot r_2$$

$$\text{所以} \quad r'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \cdot r_2 = K_{12}^2 \cdot r_2 \quad (2-9)$$

$$\text{电抗} \quad X'_2 = K_{12}^2 \cdot X_2 \quad (2-10)$$

$$\text{阻抗} \quad Z'_2 = K_{12}^2 \cdot Z_2 \quad (2-11)$$

假如需要把一次侧的参数折合到二次侧, 则有

$$\left. \begin{aligned} E'_1 &= \frac{1}{K_{12}} \cdot E_1 \\ I'_1 &= K_{12} \cdot I_1 \\ r'_1 &= \frac{1}{K_{12}^2} \cdot r_1 \\ X'_1 &= \frac{1}{K_{12}^2} \cdot X_1 \\ Z'_1 &= \frac{1}{K_{12}^2} \cdot Z_1 \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

二、变压器的空载运行

(一) 空载电流和空载损耗

变压器一次线圈接入电网，二次线圈开路，此时的变压器运行称为空载运行，流过一次线圈的电流 I_0 称为空载电流。电力机车升弓、合闸后，起动前为这种工况。

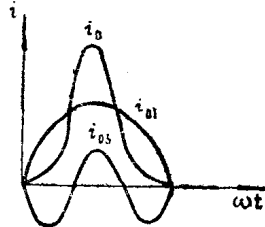
空载电流由有功分量 I_{0w} 和无功分量（励磁分量） I_{0m} 组成，即

$$I_0 = \sqrt{I_{0w}^2 + I_{0m}^2} \quad (2-13)$$

有功分量产生空载损耗 P_0 ，无功分量 I_{0w} 又称磁化电流，用以励磁。

通常 I_0 以额定电流 I_{1n} 的百分数来表示（标么值），即

$$\frac{I_0}{I_{1n}} \times 100\% \quad (2-14)$$



因为 I_0 相对很小，所以往往就把 I_0 当作磁化电流（或称励磁电流）。

图 2-2 磁化电流波形

需要注意的是，磁化电流 I_{0m} （视作空载电流 I_0 ）往往不是正弦的。这是因为变压器磁通密度 B_m 的额定工作点往往选择在磁化曲线的拐点附近，已经处于非线性区了，如图 2-2 所示。

由图可知， i_0 为一尖顶波，此尖顶波除含有基波 i_{01} 外，还有三次谐波 i_{03} 和其它高次谐波。此三次谐波将产生对通信线路的干扰和其它不利后果。

铁心在磁化过程中有磁滞现象，并产生损耗。这部分的损耗就叫做磁滞损耗，其数值用下式计算

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^{1.6} \quad (2-15)$$

可见磁滞损耗与频率 f 、磁通密度 B_m 有关。

* 式中的 B_m 是指磁通密度幅值。通常，磁通密度只用幅值表示，而不用有效值、平均值来表示，所以 B_m 有时就写成 B ，当然这里的 B 是指磁通密度的幅值。

除磁滞损耗外,铁心中还存在有涡流损耗。这是因为铁心是由硅钢片叠成的,它本身就是导体,它在交变磁通的作用下,产生涡流和涡流损耗。为了减少损耗,硅钢片不能太厚,一般厚度为0.30~0.35mm。涡流损耗用下式表示

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2-16)$$

涡流损耗与频率的平方、磁通密度的平方成正比。这样,铁损

$$P_{h+e} = K_h \cdot f \cdot B_m^{1.6} + K_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2-17)$$

在热轧硅钢片中,磁滞损耗占铁损的较大部分,而在冷轧硅钢片中,两者差不多相等。

由于空载运行时,空载电流在一次线圈中产生的电阻损耗很小,可略去不计,故通常所说的铁损就等于变压器的空载损耗。

韶山1型电力机车主变压器空载电流设计值为1.15% (指标么值),安培数值为 $1.15\% \times 231 = 2.66(A)$ 。空载损耗设计值为5400W。实际产品的空载电流和空载损耗皆比较小。

(二) 空载运行的矢量图和等值电路

图(2-3)为单相变压器空载运行的矢量图。主磁通 $\dot{\Phi}_2$ 与磁化电流 $\dot{I}_{0m}$ 同相位,一次线圈的漏磁通 $\dot{\Phi}_0$,是和空载电流 $\dot{I}_0$ 同相位的,这是因为 $\dot{\Phi}_0$ 经过非铁磁介质(例如空气)而闭合。由一次线圈的空载漏磁通 $\dot{\Phi}_0$ 在一次线圈中感应出来的电势 $\dot{E}_1$,滞后 $\dot{\Phi}_0$ 90°。 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 是由主磁通 $\dot{\Phi}_2$ 感应出来的,故滞后 $\dot{\Phi}_2$ 90°。

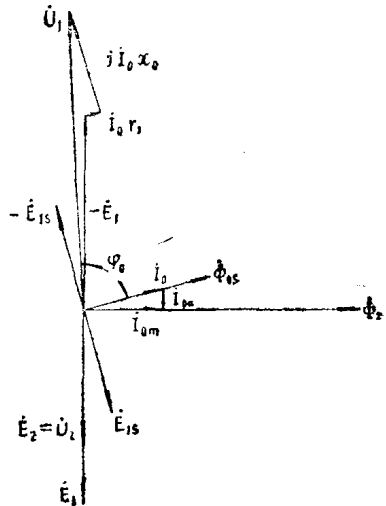


图 2-3 单相变压器空载运行矢量图

这时,在空载变压器一次线圈中存在有以下三种电势:

1. 电阻电势 $\dot{E}_r$

$$\dot{E}_r = -\dot{I}_0 \cdot r_1 \quad (2-18)$$

2. 空载漏抗电势 $\dot{E}_{1s}$,

$$\dot{E}_{1s} = -j\dot{I}_0 \cdot x_1 \quad (2-19)$$

3. 感应电势 $\dot{E}_1$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_{0m} Z_m \doteq -\dot{I}_0 Z_m \quad (2-20)$$

$$Z_m = r_m + jx_m$$

其模为

$$Z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2} \quad (2-21)$$

式中 r_m ——铁损的等值电阻;

x_m ——励磁电抗。

如果忽略 r_m , 则

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_0 x_m \quad (2-22)$$

根据克希柯夫定律可写出

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\sum E = -(\dot{E}_r + \dot{E}_{1s} + \dot{E}_1) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \cdot Z_{10} \end{aligned} \quad (2-23)$$

空载漏阻抗

$$Z_{10} = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} \quad (2-24)$$

按公式 (2-23) 可以绘出空载等值电路, 如图 (2-4) 所示。

(三) 空载合闸

空载合闸是一个过渡过程, 会产生很大的冲击电流, 有时甚至超过变压器的额定电流, 造成开关跳闸。此外还伴有过电压冲击, 称之为操作过电压。

产生合闸电流冲击的原因在于主磁通 Φ 有过渡过程。在过渡过程中, 主磁通瞬时值 Φ 与合闸相位及剩磁有关。考虑最严重的情况, 即 0 点合闸 (此时 $U_1 = 0$), 剩磁 Φ_r 取正号, 经过推导, Φ 可用

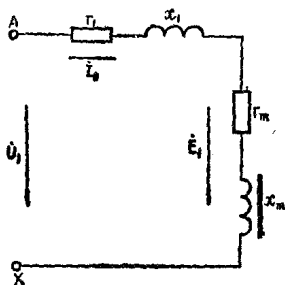


图 2-4
单相变压器空载等值电路