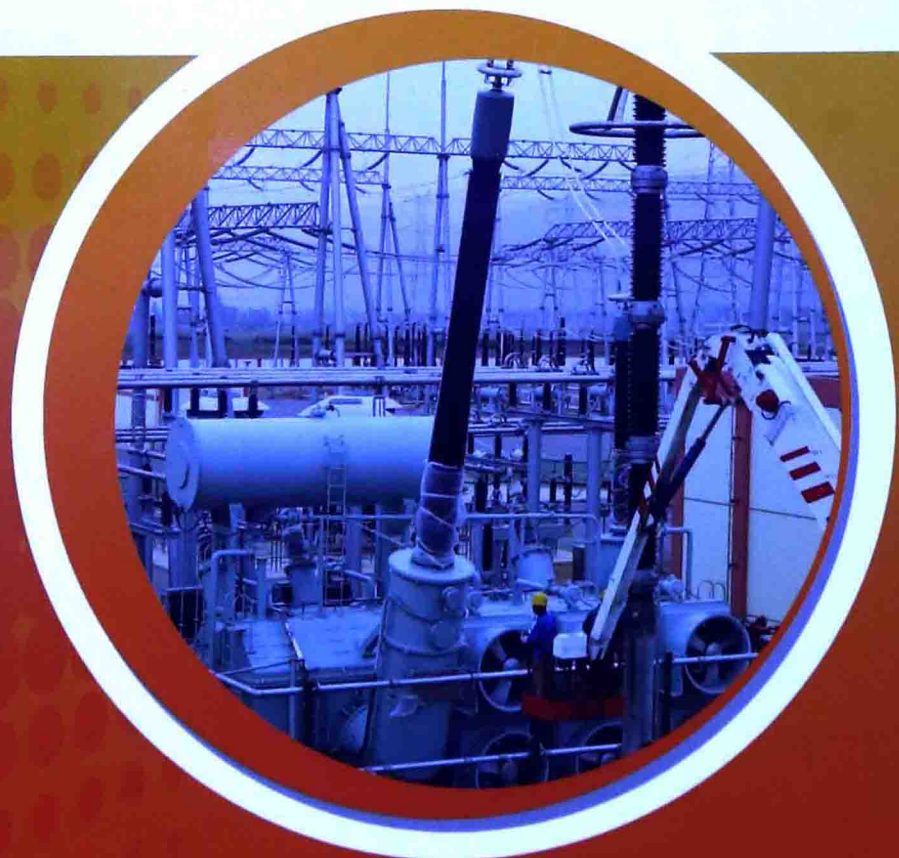


DIANQISHEBEIJIYUNXINGWEIHUXILIE  
BIANYAQIFENCE

张全元 编著

电气设备及运行维护系列 

# 变压器 分册



TRANSFORMER OPERATION AND MAINTENANCE  
EXPERIENCE

张全元

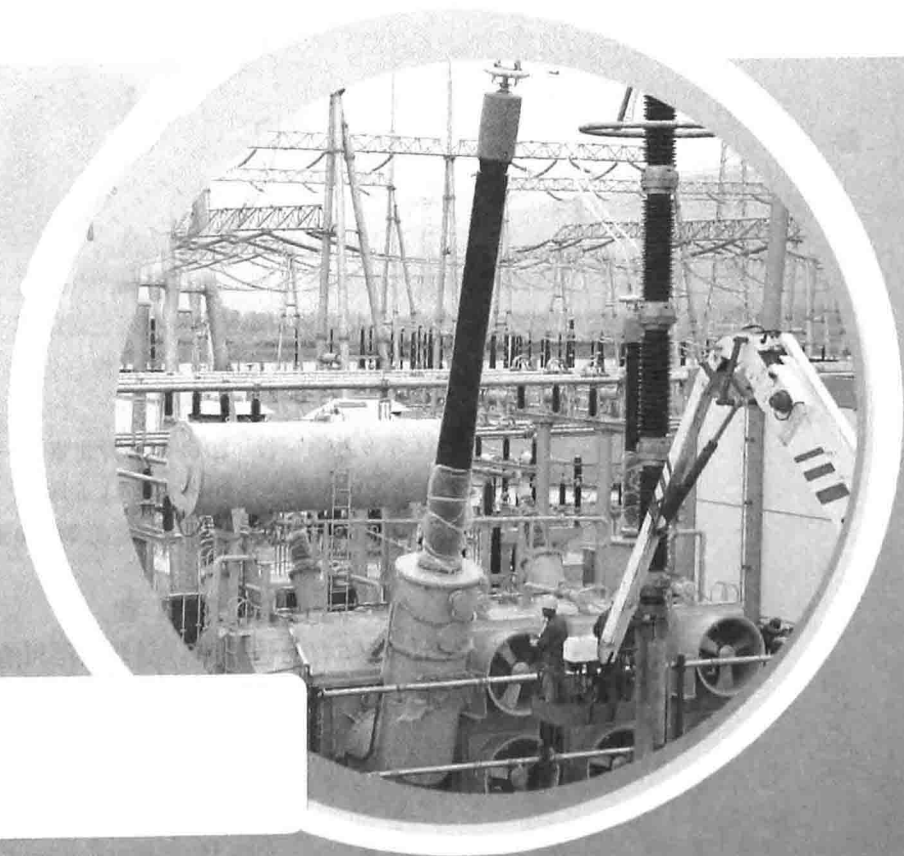


电气设备运行维护系列



变压器

分册



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

《电气设备及运行维护系列》主要从基础知识、原理、结构、相关标准要求及运行维护等方面对电气设备进行全面的介绍。本丛书内容是编者多年现场工作的经验与总结，实用性强。

本书为《变压器分册》，共分7章，主要内容包括变压器的基本知识、运行原理和基本结构，三相变压器、自耦变压器和干式变压器的结构特点及运行与维护。

本丛书可作为电力系统现场运行维护人员及技术管理人员的培训、自学用书，还可作为电力工作者及大专院校相关专业的阅读参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备及运行维护系列. 变压器分册/张全元编著. —北京:  
中国电力出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5123-5918-5

I. ①电… II. ①张… III. ①电气设备-维修②变压器-维修  
IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 108667 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 281 千字

印数 0001—3000 册 定价 36.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编 委 会

编 著 张全元

主 审 李洪波 陈元建 赵连政

编写人员 王永清 李广渊 刘光毅 刘克岐

杨爱民 周贤伟 余洁淑 张希成

周杰茹

# 前 言

自1981年1月参加工作到编写本书，作者在电力系统从事变电运行维护及培训工作已有33年。在这33年的工作中，有20多年的业余时间从事与变电运行、变电站设备技术、事故处理及仿真培训有关专业书籍的编写工作，并先后出版了《变电运行现场技术问答》、《变电站现场事故处理及典型案例分析》等八本专著，这些专著都是在工作中不断地总结，在总结中不断地深化，在深化中不断地探索，在探索中不断地提高。随着作者知识面的不断深入和拓展，萌发了编写有关电气设备及运行维护系列丛书的想法，经过与同行和出版社编辑的多次探讨，决定编写这套丛书。

本套丛书站在现场运行维护人员的角度，从设备的基础知识、原理、结构、标准规定、运行维护等方面进行全面介绍。

变压器是电力系统及变电站的重要设备，是传递能量的核心。本书作为本套丛书的第一本，共七章：第一章是变压器的基本知识，第二章是变压器的运行原理，第三章是变压器的基本结构，第四章是三相变压器，第五章是自耦变压器，第六章是干式变压器，第七章是变压器运行与维护。

本书由国网湖北省电力公司检修分公司张全元编著，由国网黑龙江省电力有限公司技能培训中心齐齐哈尔分部李洪波、国网湖北省电力公司检修分公司陈元建、国网冀北电力有限公司培训中心赵连政审核。

在编写本书时，参考了大量的相关书籍，在此对原作者表示衷心的感谢。对为本书提供资料及提出宝贵意见的读者和工程技术人员表示衷心的感谢。

由于经验和理论水平所限，书中难免出现疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014年6月

# 目 录

## 前言

第一章 变压器的基本知识	1
第一节 变压器的基础知识	1
第二节 变压器的基本原理	5
第三节 变压器的损耗	9
第二章 变压器的运行原理	10
第一节 变压器的空载运行	10
第二节 变压器的负载运行	14
第三节 变压器的运行特性	19
第四节 变压器的并联运行	21
第五节 变压器的不对称运行	26
第六节 变压器的突然空载合闸	27
第七节 切除空载变压器	31
第八节 变压器的突然短路	32
第三章 变压器的基本结构	36
第一节 铁芯	37
第二节 绕组	45
第三节 绝缘结构	59
第四节 分接开关	64
第五节 油箱	67
第六节 其他设备	75
第四章 三相变压器	82
第一节 三相变压器的磁路系统	82
第二节 变压器绕组及联结组别	83
第三节 三相变压器磁路系统和绕组连接对电势波形的影响	87
第四节 三绕组变压器	89
第五章 自耦变压器	92
第一节 自耦变压器的基本概念	92
第二节 自耦变压器的性能特点	94
第三节 三绕组自耦变压器及运行方式	96



<b>第六章 干式变压器</b> .....	98
第一节 干式变压器概述 .....	98
第二节 干式变压器的特点 .....	99
第三节 树脂浇注式干式变压器的结构 .....	102
第四节 辅件 .....	109
第五节 干式变压器应用选型 .....	112
第六节 运行维护 .....	112
<b>第七章 变压器运行与维护</b> .....	117
第一节 变压器运行 .....	117
第二节 油浸式电力变压器负载 .....	132
第三节 变压器检修 .....	140
第四节 变压器试验 .....	148
第五节 变压器巡视 .....	153
第六节 变压器验收 .....	161
第七节 220~750kV 油浸式电力变压器使用技术条件 .....	170
<b>参考文献</b> .....	178

# 变压器的基本知识

## 第一节 变压器的基础知识

变压器是一种静止的电机。它通过线圈间的电磁感应作用，可以把一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。

### 一、变压器的作用

变压器是电力系统中重要的电气设备，根据变压器在系统中所处的位置不同，它具有变换电压、变换电流、传输功率、变换阻抗的不同作用。例如：输配电变压器主要用来变换电压和传输功率，达到远距离输送电能并降低输送损耗的目的；用于控制和测量的互感器主要用来降低电压和减小电流，达到安全控制和测量的目的，保证人身和设备安全，并降低控制和测量成本；耦合变压器主要用来改变两个系统的阻抗匹配，实现理想的输出或接入阻抗，达到输出最大效率或最理想功率的目的。

用于电力系统升压或降压的变压器称为电力变压器，它在电力系统中占有极其重要的地位。发电厂发出的电能输送到用户的整个过程中，通常需要多次升压及多次降压，因此变压器的安装容量远大于发电机总装机容量，通常可达 5~8 倍。

发电厂发出的电压受发电机绝缘条件的限制不可能很高，一般为 6.3~27kV，要将发出的大功率电能直接输送到很远的用电区域几乎不可能。这是因为输送一定功率的电能时，输电线路的电压越低，线路中的电流和相应的线路损耗就越大，线路使用的金属量也大大增加。为此必须采用高电压（小电流）输电，即通过升压变压器把发电厂发出的电压升高到输电电压，一般为 110~1000kV，这样才能比较经济地输送电能。一般来说，输电距离越远，输送功率越大，要求的输电电压越高。对于用户来说，由于用电设备安全与绝缘的限制，需把高压通过降压变压器降低到用户所需的电压等级。通常大型动力设备采用 6kV 或 10kV，小型动力设备和照明则为 380V 或 220V。

在其他各领域也广泛使用各种类型的变压器，以提供特种电源或满足各种特殊的需要，如冶炼用变压器、焊接用变压器、船舶用变压器以及试验用调压变压器等。

### 二、变压器的分类

为满足不同的使用目的和适应不同的工作条件，变压器有多种类型。现在常用的主要类型有：

(1) 按变压器的用途可分为电力变压器、调压器、仪用互感器（TA、TV）和特殊变压



器（试验变压器、控制变压器）。

(2) 按变压器的绕组可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器。

(3) 按电源输出的相数分为单相变压器、三相变压器和多相变压器（如直流输电工程中的换流变压器、整流用六相变压器）。

(4) 按变压器的铁芯结构分为芯式变压器和壳式变压器。

(5) 按变压器冷却介质分为油浸式变压器、空气冷却式变压器（干式变压器）、充气式变压器（变压器器身放在一密封的铁箱内，箱内充以特种气体）。

(6) 按冷却介质分为油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、油浸强迫油循环风冷变压器、油浸强迫油循环水冷变压器及干式变压器。

(7) 按调压方式分为无励磁调压变压器、有载调压变压器。

(8) 按中性点绝缘水平分为全绝缘变压器、分级绝缘变压器。

(9) 按导线材料分为铜导线变压器、铝导线变压器。

(10) 按油箱的型式分为箱式变压器、钟罩式变压器和密封式变压器。

(11) 按防潮方式分为开放式变压器、灌封式变压器、密封式变压器。

### 三、变压器技术参数及含义

(1) 额定容量  $S_N$ ：指变压器在铭牌规定条件下，以额定电压、额定电流连续运行时所输送的单相或三相总视在功率。

(2) 容量比：指变压器各侧额定容量之间的比值。

(3) 额定电压  $U_N$ ：指变压器长时间运行时设计条件所规定的电压（线电压）值。

(4) 电压比（变比）：指变压器各侧额定电压之间的比值。

(5) 额定电流  $I_N$ ：指变压器在额定容量、额定电压下运行时通过的线电流。

(6) 相数：单相或三相。

(7) 联结组别：指表明变压器两侧线电压的相位关系。

(8) 空载损耗（铁损） $P_0$ ：指变压器一个绕组加上额定电压，其余绕组开路时，变压器消耗的功率。变压器的空载电流很小，它所产生的铜损可忽略不计，所以空载损耗可认为是变压器的铁损。铁损包括励磁损耗和涡流损耗。空载损耗一般与温度无关，而与运行电压的高低有关，当变压器接有负载后，变压器的实际铁损小于此值。

(9) 空载电流  $I_0(\%)$ ：指变压器在额定电压下空载运行时，一次侧通过的电流。不是指刚合闸瞬间的励磁涌流峰值，而是指合闸后的稳态电流。空载电流常用其与额定电流比值的百分数表示

$$I_0(\%) = \frac{I_0}{I_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

(10) 负荷损耗  $P_K$ （短路损耗或铜损）：指变压器一侧加电压而另一侧短接，使电流为额定电流时（对三绕组变压器，第三个绕组应开路），变压器从电源吸取的有功功率。按规定，负荷损耗是折算到参考温度（75℃）下的数值。因测量时实为短路状态，所以又称为短路损耗。短路状态下，使短路电流达额定值的电压很低，表明铁芯中的磁通量很少、铁损很小，可忽略不计，故可认为短路损耗就是变压器绕组的铜损。

(11) 百分比阻抗（短路电压）：指变压器二次绕组短路，使一次侧电压逐渐升高，当二

次绕组的短路电流达到额定值时，此时一次侧电压与额定电压比值的百分数。

(12) 额定频率：变压器设计所依据的运行频率，单位为赫兹（Hz），我国规定为50Hz。

(13) 额定温升  $\tau_N$ ：指变压器的绕组或上层油面的温度与变压器外围空气的温度之差，称为绕组或上层油面的温升。

变压器温升规定按 GB 1094.2—1996《电力变压器 第2部分：温升》执行。

(14) 铭牌：

- 1) 变压器名称，型号、产品代号。
- 2) 标准代号。
- 3) 制造厂名（包括国名）。
- 4) 出厂序号。
- 5) 制造年月。
- 6) 相数。
- 7) 额定容量。
- 8) 额定频率。
- 9) 各绕组额定电压。
- 10) 各绕组的额定电流，联结组别标号，绕组联结示意图。
- 11) 额定电流下的短路阻抗。
- 12) 冷却方式。
- 13) 使用条件。
- 14) 总质量（t）。
- 15) 绝缘油质量（t），品牌（厂商、型号）。
- 16) 强迫油循环（风冷和水冷）的变压器，还应注出满载时停油泵（水泵）及风扇电动机后允许的工作时限。
- 17) 绝缘的温度等级（油浸式变压器 A 级可不注出）。
- 18) 温升。
- 19) 联结图（当联结组别标号不能说明内部联结的全部情况时）。如果联结组别的联结方式可以在变压器内部变更，则应指出变压器出厂时的联结方式。
- 20) 绝缘水平。
- 21) 运输重（t）。
- 22) 器身吊重（t），上节油箱重（t）。
- 23) 空载电流（实测值）。
- 24) 空载损耗及负载损耗（ $K_w$ ，实测值）。多绕组变压器的负载损耗应表示各对绕组工作状态下的损耗值。
- 25) 套管型电流互感器的技术数据（也可采用单独的标志）。

各电压等级油浸式电力变压器技术参数和要求应符合 GB/T 6451—2008《油浸式电力变压器技术参数和要求》，干式电力变压器技术参数和要求应符合 GB/T 10228—2008《干式电力变压器技术参数和要求》。

#### 四、变压器型号及其含义

(1) 变压器型号的排列。变压器产品型号是用汉语拼音的字母及阿拉伯数字组成，每个拼音和数字均代表一定含义，见图 1-1。

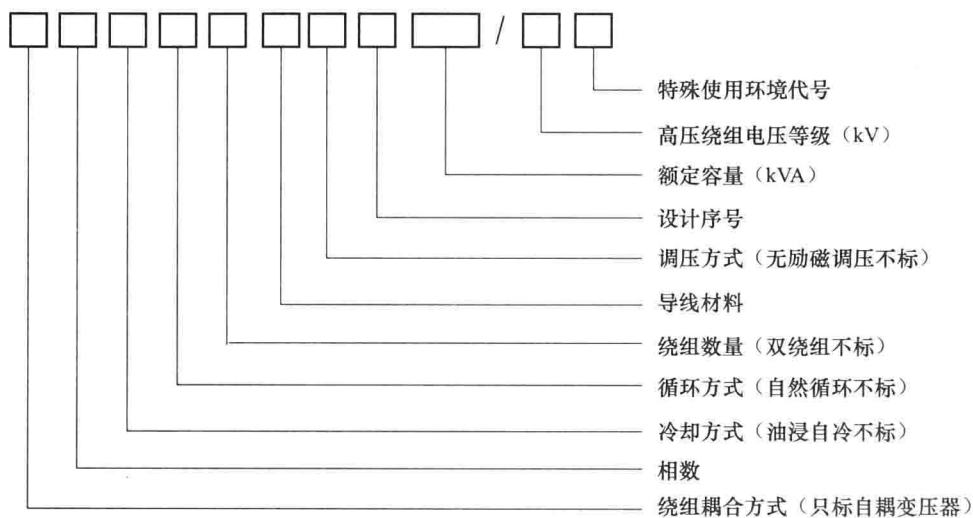


图 1-1 变压器产品型号排列方法

(2) 变压器型号中文字符号。在变压器的铭牌上，除规定运行数据外，还有用文字符号表示的变压器型号。变压器的产品型号已有新的国家标准，但目前旧型号的变压器仍在使使用，因此必须熟悉新、旧两种型号所代表的意义。新、旧型号及其所代表的意义对照如表 1-1 所示。

表 1-1 变压器型号的含义

含义符号	代表符号		含义符号	代表符号	
	新型号	旧型号		新型号	旧型号
单相变压器	D	D	双绕组变压器	不表示	不表示
三相变压器	S	S	三绕组变压器	S	S
油浸式	不表示	J	无励磁调压	不表示	不表示
空气自冷式	不表示	不表示	有载调压	Z	Z
风冷式	F	F	铝线变压器	不表示	L
水冷式	W	S	干式	G	K
油自然循环	不表示	不表示	自耦变压器	O	O <sup>①</sup>
强迫油循环	P	P	分裂变压器	F	F
强迫油导循环	D	不表示	干式浇注绝缘	C	C

① O 在前面表示降压变压器；O 在后面表示升压变压器。

(3) 变压器型号中文字符号后面的数字所代表的意义是：斜线的左面表示容量，单位为 kVA；斜线的右面表示高压侧的额定电压，单位为 kV。

(4) 型号举例。

1) S7-16000kVA/110kV 电力变压器表示：

三相油浸自冷双绕组铜线无载调压 7 型变压器，额定容量为 16 000kVA，额定电压为 110kV，习惯称法为三相双绕组无载调压变压器。

2) SFSZ8-31500kVA/110kV 表示:

三相油浸风冷三绕组铜线有载调压变压器, 额定容量为 31 500kVA, 额定电压为 110kV, 习惯称法为三相三绕组油浸风冷有载调压变压器。

3) ODSPLZ9-120000kVA/220kV 表示:

自耦单相水冷强迫油循环三绕组铝线有载调压变压器, 额定容量为 120 000kVA, 额定电压为 220kV, 习惯称法为单相自耦强迫油水冷三绕组有载调压铝线变压器。

## 第二节 变压器的基本原理

### 一、变压器的工作原理

变压器是一个应用电磁感应定律将电能转换为磁能, 再将磁能转换成电能, 以实现电压变化的电磁装置。

在讨论变压器基本工作原理时, 首先分析理想化的情况, 然后再考虑实际的工作状态。

#### (一) 理想变压器的工作原理

对于理想化的变压器, 首先假定变压器一次、二次绕组的阻抗为零, 铁芯无损耗且磁导率很大。下面对理想变压器的工作原理按照空载和负载两种状态分别介绍。

图 1-2 为变压器的工作原理图。空载状态时, 一次绕组接通电源, 在交流电压  $\dot{U}_1$  的作用下, 一次绕组产生励磁电流  $\dot{I}_\mu$ , 励磁磁动势  $\dot{I}_\mu N_1$ , 该磁动势在铁芯中建立了交变磁通  $\Phi_0$  和磁通密度  $B_0$  ( $B_0 = \Phi_0 / S_c$ ,  $S_c$  是铁芯的有效截面积)。根据电磁感应定律, 铁芯中的交

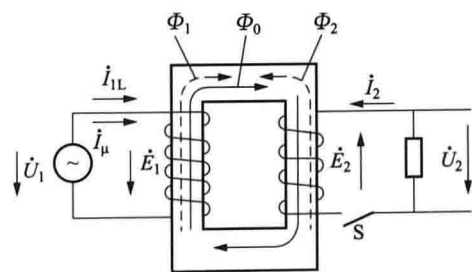


图 1-2 变压器的工作原理图

变磁通  $\Phi_0$  在一次绕组两端产生自感电动势  $\dot{E}_1$ , 在二次绕组两端产生互感电动势  $\dot{E}_2$ , 表达式如下

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_0 S_c \times 10^{-4} \quad (1-2)$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_0 S_c \times 10^{-4} \quad (1-3)$$

式中  $f$ ——频率, Hz;

$N_1$ ——变压器一次绕组的匝数;

$N_2$ ——变压器二次绕组的匝数;

$B_0$ ——铁芯的磁通密度, T。

在理想变压器中, 一次、二次绕组的阻抗为零, 则一次、二次侧电压  $U_1$ 、 $U_2$  为

$$U_1 = E_1 = 4.44 f N_1 B_0 S_c \times 10^{-4} \quad (1-4)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44 f N_2 B_0 S_c \times 10^{-4} \quad (1-5)$$

得到

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可见, 改变一次绕组与二次绕组的匝数比, 可以改变一次侧与二次侧的电压比, 这就是变压器的工作原理。

假设将图 1-2 中的开关 S 接通，变压器开始向二次负载供电，二次回路产生负载电流  $\dot{I}_2$ ，反磁动势  $N_2\dot{I}_2$ ，反磁通  $\dot{\Phi}_2$ 。此时，一次回路同时产生一个新的电流  $\dot{I}_{1L}$ ，新的磁动势  $N_1\dot{I}_{1L}$ ，新的磁通  $\dot{\Phi}_1$ ；与  $N_2\dot{I}_2$ 、 $\dot{\Phi}_2$  相平衡。此时有

$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = 0 \quad (1-7)$$

$$N_1\dot{I}_{1L} + N_2\dot{I}_2 = 0 \quad (1-8)$$

由此得到

$$\dot{I}_{1L} = -\frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2 \quad (1-9)$$

## (二) 变压器实际的工作状态

实际工作的变压器，一次、二次绕组有电阻和漏抗，铁芯有损耗，漏磁通不与一次和二次绕组全部交链。

假设一次、二次绕组的阻抗为  $Z_1$ 、 $Z_2$ ，则相应的阻抗压降  $\Delta\dot{U}_1$ 、 $\Delta\dot{U}_2$  为

$$\Delta\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-10)$$

$$\Delta\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-11)$$

$\Delta\dot{U}_1$  使一次绕组感应电压降低， $\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1$ ； $\Delta\dot{U}_2$  使二次绕组负载电压降低， $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \Delta\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ ；这导致匝数比不等于一次侧与二次侧的电压比，而等于感应电动势比

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-12)$$

式中  $k$ ——变压器的电压比。

变压器正常工作时铁芯要产生空载损耗  $P_0$ ，铁芯损耗的能量由电源侧供给，其影响相当于在理想变压器的一次侧并联一个铁芯损耗等效电阻  $r_m$ ，在一次回路中引入一个铁损电流  $\dot{I}_{Fe}$ ，此时，铁损电流  $\dot{I}_{Fe}$  和励磁电流  $\dot{I}_\mu$  合成为空载电流  $\dot{I}_0$ 。空载电流  $\dot{I}_0$  与一次电流负载分量  $\dot{I}_{1L}$  合成为一次电流  $\dot{I}_1$ 。

实际变压器一次、二次绕组所产生的磁通，并没有全部通过主磁路铁芯，也没有全部与一次和二次绕组交链，这部分磁通经过非铁磁物质闭合，称为漏磁通  $\Phi_\sigma$ ，漏磁链与产生该漏磁通的电流  $I$  之比称为漏感  $L_\sigma$ 。

$$L_\sigma = \frac{N}{I}\Phi_\sigma \quad (1-13)$$

因此，漏磁通的影响相当于在理想变压器的一次、二次回路中引入漏电感  $L_{\sigma 1}$ 、 $L_{\sigma 2}$ ，乘以角频率 ( $\omega = 2\pi f$ ) 后得到相应的漏电抗  $x_{\sigma 1}$ 、 $x_{\sigma 2}$ 。

将电压、电流和阻抗均用复数表示时，变压器在负载条件下的一次、二次电动势平衡方程可以写为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-14)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-15)$$

式中  $Z_1$ ——变压器一次侧的漏阻抗， $Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1}$ ；

$r_1$ ——变压器一次侧的漏电阻；

$Z_2$ ——变压器二次侧的漏阻抗， $Z_2 = r_2 + jx_{o2}$ ；

$r_2$ ——变压器二次侧的漏电阻。

### (三) 变压器的阻抗参数和标么值

假定变压器空载试验测得了变压器的一次电压  $U_1$ 、空载电流  $I_0$  和空载损耗  $P_0$ ，由于变压器一次侧的漏阻抗与铁芯的励磁阻抗相比小到可以忽略不计，因此，变压器励磁阻抗  $Z_m$ 、励磁电阻  $r_m$ 、励磁电感  $x_m$  可以用式 (1-16) 计算

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= \frac{U_1}{I_0} \\ r_m &= \frac{P_0}{I_0^2} \\ x_m &= \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

假定变压器短路试验测得了变压器的一次电压  $U_1$ 、短路电流  $I_k$  和短路损耗  $P_k$ ，则变压器的短路阻抗  $Z_k$ 、短路电阻  $r_k$ 、短路电感  $x_k$  可以用式 (1-17) 计算

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= \frac{U_1}{I_k} \\ r_k &= \frac{P_k}{I_k^2} \\ x_k &= \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

式中， $r_k = r_1 + r_2'$ ， $x_k = x_{o1} + x_{o2}'$ ，且  $r_2' = k^2 r_2$ ， $x_{o2}' = k_2 x_{o2}$ 。

变压器短路阻抗  $U_k$  有如下定义式

$$U_k = \frac{I_{1N\phi} Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N\phi}} \times 100 (\%) \quad (1-18)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{kr} &= \frac{I_{1N\phi} r_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N\phi}} \times 100 (\%) \\ U_{kx} &= \frac{I_{1N\phi} x_k}{U_{1N\phi}} \times 100 (\%) \\ U_k &= \sqrt{U_{kr}^2 + U_{kx}^2} (\%) \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

式中  $I_{1N\phi}$ ——变压器一次侧额定相电流；

$U_{1N\phi}$ ——变压器一次侧额定相电压；

$U_{kr}$ ——变压器短路阻抗的电阻分量；

$U_{kx}$ ——变压器短路阻抗的电抗分量。

在工程实际中，通常把某些物理量表示成与某一选定的同量纲的基值之比的形式，称为标么值（或相对值）。在电机或变压器中，常取各物理量的额定值作为基值，在物理量符号的右下角标注“\*”表示为该物理量的标么值。

例如，一次、二次电压和电流的标么值  $U_{1*}$ 、 $U_{2*}$ 、 $I_{1*}$ 、 $I_{2*}$  可以表示为

$$\begin{aligned} U_{1*} &= \frac{U_1}{U_{1N\phi}} \\ U_{2*} &= \frac{U_2}{U_{2N\phi}} \end{aligned}$$



$$I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1N\phi}}$$

$$I_{2*} = \frac{I_2}{I_{2N\phi}}$$

一次、二次阻抗的基值  $Z_{1N}$ 、 $Z_{2N}$  分别取

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}}$$

$$Z_{2N} = \frac{U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}$$

相应的一次、二次绕组的漏阻抗的标么值  $Z_1^*$ 、 $Z_2^*$  为

$$Z_{1*} = \frac{I_{1N\phi}}{U_{1N\phi}} Z_1$$

$$Z_{2*} = \frac{I_{2N\phi}}{U_{2N\phi}} Z_2$$

如果各物理量的标么值乘以 100，则变成额定值的百分值。因此，标么值很容易转换为百分值。

采用标么值的主要方便之处在于：不论变压器的容量相差多大，用标么值表示的参数及性能数据变化范围小，便于不同容量的变压器之间相互比较；一次、二次侧的各物理量不需经过折算，因为用标么值表示时，折算值与未折算值相等，各物理量的数值及其计算大为简化。

标么值基值的选择及特点将在第二章详述。

## 二、变压器的效率

变压器将一种电压的电能转变为另一种电压的电能的过程中，产生了损耗，致使输出功率小于输入功率。输出功率与输入功率之比，称为效率  $\eta$ ，有如下定义式

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1-20)$$

式中  $P_1$ ——变压器的输入功率；

$P_2$ ——变压器的输出功率。

$P_1$  与  $P_2$  之间有如下关系

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu} \quad (1-21)$$

式中  $P_{Fe}$ 、 $P_{Cu}$ ——变压器的总铁损和总铜损。

在式 (1-20) 中， $P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2$ ，因此，变压器的效率与负载情况（负载阻抗  $Z_L$ 、功率因数  $\cos\varphi_2$ ）有关，也与变压器本身的损耗有关。由于变压器铁损与变压器铁芯材料品质及铁芯饱和程度有关，而与负载情况关系不大，因此，近似认为变压器工作电压不变时，铁损也不变；变压器的铜损与负载电流密切相关，与负载率的二次方成正比。因此，变压器的效率是随负载情况变化的量。

为了使总的经济效益良好，变压器平均效益较高，一般使变压器的最大效率发生在负载率为 50%~60%、铜损与铁损比在 3~4 的情况下。

变压器的辅机（风机、油泵等）也要产生损耗，但变压器效率的定义式中未包含这个因素。习惯上将辅机损耗与变压器效率分开表述。

### 第三节 变压器的损耗

变压器的损耗有空载损耗（铁损）和负荷损耗（短路损耗或铜损）。

#### 1. 空载损耗 $P_0$

变压器空载时，输出功率为零，但要从电源中吸取一小部分有功功率，用来补偿变压器内部的功率损耗，这部分功率变为热能散发出去，称为空载损耗，用  $P_0$  表示。

变压器的空载损耗包括三部分：

(1) 铁损  $P_{Fe}$ ，是由交变磁通在铁芯中造成的磁滞损耗和涡流损耗。由于铁芯在磁化过程中有磁滞现象，并有了损耗，这部分损耗称为磁滞损耗，磁滞损耗占空载损耗的 60%~70%。磁滞损耗的大小取决于硅钢片的质量、铁芯的磁通密度  $B_m$  和电源的频率  $f$ 。当铁芯中有交变磁通存在时，绕组将产生感应电压，而铁芯本身又是导体，因此就产生了电流和涡流损耗，该损耗为有功损耗。涡流损耗的大小与磁通密度的平方  $B_m^2$  成正比，与电源的频率的平方  $f^2$  成正比。减少涡流损耗的方法是用具有绝缘膜的硅钢片。

(2) 一次绕组的空载铜损  $P_{cu}$ ，是由空载电流  $I_0$  流过一次绕组的铜电阻  $r_1$  而产生的。

(3) 附加损耗  $P_{ij}$ ，是由铁芯中磁通密度分布不均匀和漏磁通经过某些金属部件而产生的。

变压器的空载损耗中，空载铜损所占比例很小，可以忽略不计，而正常的变压器空载时铁损也远大于附加损耗，因此变压器的空载损耗可近似等于铁损。

变压器的空载损耗很小，不超过额定容量的 1%。空载损耗一般与温度无关，而与运行电压的高低有关，当变压器带负载后，变压器的实际铁损比空载时还要小。

#### 2. 负荷损耗（短路损耗或铜损）

负荷损耗一般分为两部分，即导线的基本损耗和附加损耗。

(1) 导线的基本损耗：由一、二次绕组通电流后产生。

(2) 附加损耗（铁损）：附加损耗包括由漏磁场引起的导线本身的涡流损耗和结构部件（如夹件、油箱等）损耗。附加损耗占导线的基本损耗有一定的比例，容量越大，所占比例越大。

对三绕组变压器，负荷损耗有三个，以其中的最大值作为该变压器的额定负荷损耗。负荷损耗是考核变压器性能的主要参数之一。实际运行中的变压器负荷损耗不是上述规定的负荷损耗值，因为负荷损耗不仅取决于负荷电流的大小，还与周围环境温度有关。负荷损耗与一、二次电流的平方成正比。

由以上分析可知，变压器的铁损近似等于空载损耗，当电源的电压和频率不变时，主磁通不变，铁损也基本不变，故称铁损为不变损耗。

变压器在运行时，其负荷损耗（铜损）随负荷电流的大小而变化，故称负荷损耗（铜损）为可变损耗。

研究表明，当变压器的可变损耗（铜损）等于不变损耗（铁损）时，变压器的效率最高。

## 变压器的运行原理

在一次绕组上加电压后，变压器就进入运行状态。本章从变压器空载运行、负载运行、运行特性（电压变化率和效率）、并联运行、不对称运行、空载合闸及突然短路等方面分析变压器的运行原理。

### 第一节 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接在交流电源上，而二次绕组开路时运行叫做空载运行。由于二次绕组没有电流，因此空载运行是比较简单的，但它却是变压器的一种基本运行状态，因此分析变压器时往往先从空载运行开始。

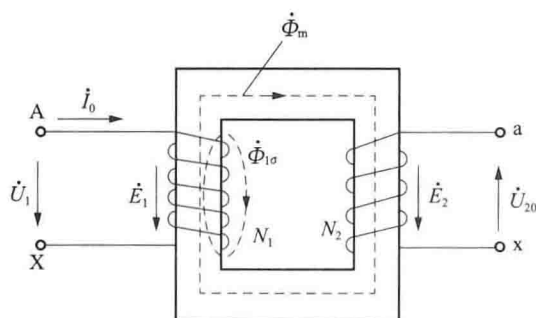


图 2-1 单相变压器空载运行示意图

一、变压器空载运行时的物理情况

#### 一、变压器空载运行时的物理情况

图 2-1 是单相变压器空载运行的示意图。当一次侧加上额定电压为  $\dot{U}_1$ 、额定频率为  $f$  的正弦波形时，图中各物理量的正方向按规定标出。一次绕组在电压  $\dot{U}_1$  的作用下将有空载电流  $\dot{I}_0$  流过，并产生相应的空载磁动势，在其作用下铁芯内将产生磁通。该磁通可分为两个部分，其中主要部分磁通  $\dot{\Phi}_m$  以闭合铁芯为路径，分别与一、二次绕组相交链，是变压器传递能量的主要因素，称它为主磁通；还有另一部分磁通  $\dot{\Phi}_{1\sigma}$  仅和一次绕组相交链而不与二次绕组相交链，主要是通过非磁性介质而形成闭合回路，这部分磁通称为一次绕组的漏磁通。根据磁路欧姆定律，在一定磁动势作用下所产生的磁通大小与磁路的磁阻成反比。由于变压器铁芯都是用高导磁材料硅钢片制成的，它的磁导率  $\mu$  为空气的数千倍。因此空载运行时，绝大部分磁通都在铁芯中闭合，只有很少部分漏在铁芯外。根据有关试验分析，空载运行时漏磁通仅占全部磁通的 0.1%~0.2%，而 99% 以上是主磁通。

当外加电压为额定频率的正弦波形时，磁通的波形也基本上按正弦规律变化，磁通的正弦规律变化方程为

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$