

一次设备篇

BIANDIAN SHEBEI YUNXING WEIHU PEIXUN JIAOCAI

变电设备运行维护 培训教材

● 主 编 黄院臣 杨爱晟



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

丛书编委会

主 编 梁建伟 曹明德
副主编 黄院臣 郭林虎 张晓亮
编 委 郑会权 尉 宾 黄晋华 杨爱晟 李 强
潘力志 史新华 陈慧杰 吕亚明 黄 河
刘鹏涛
主 审 沈 同

本分册编写组

主 编 黄院臣 杨爱晟
副主编 梁珍海 朱晓中 袁改莲 田瑞萍
参 编 黄 河 吕亚明 刘鹏涛 张瑞杰 魏 强
王海峰 王 峰 陈书明 李 岭 宋红霞
审 核 潘力志 史鹏斌 刘守斌 辛 华
张志平 李 策 张永利

前 言

在经济、技术飞速发展的大潮下，我国电力系统强势发展，新设备、新技术日新月异，超（特）高压技术和智能技术更是处于领先地位。同时，随着国家电网公司“两个转变”的要求，“三集五大”体系建设不断深入，大运行、大检修模式迫切要求变电运维人员具有复合型知识，不断更新技术、技能。

面对新形势新要求，为了加强广大变电运维人员的技术、技能的培训，在多位领导和专家的指导下，主要以新建 220kV 站和 500kV 站以及最新发展的智能站设备为主体，结合“大运行、大检修”，积极探索新培训教材的编写。编写中，坚持以满足现场需求为指导，紧跟新设备新技术发展趋势。

本套教材在内容选取上既考虑一定的理论基础，又注重于生产实际知识、操作技能和安全技能，突显了近年来发展的一些新东西，如 500kV 变电站设备的主要特点、智能变电站、一体化电源系统等。

本套教材在编写方式上，积极对基础教育和继续教育进行思考，力求内容实用、精练，结构重点突出，着眼于主要知识（技术）和实际知识（技术）的应用，积极探索对事物的认知方法、创新分析和表述技巧，努力为广大现场工作者和新参加工作的学生提供一本可读性较强的读物。由此，使本书内容更具有系统性、实用性和新颖性，能够满足变电运维人员的需要。

本分册为《变电站运行维护培训教材（一次设备篇）》，共分 14 章，主要内容包括：变压器原理、结构及有关概述；变压器的运行分析；三相变压器磁路及联接方式；三相变压器的相关运行问题；变压器的并联运行；三绕组变压器及自耦变压器；变压器的巡视检查及运行维护；六氟化硫（SF₆）断路器；真空断路器；组合电器；隔离开关；仪用互感器；防过电压装置；并联补偿电容器。

本书第一～第七章由山西省电力公司经济技术研究院黄河、山西省电力公司人资部吕亚明、山西省电力公司高培中心刘鹏涛、山西省阳泉供电公司张瑞杰编写；第八～第十四章由山西省太原供电公司魏强、王海峰、王峰，山西省电力公司经济技术研究院黄河，山西省晋城供电公司李岭、宋红霞、陈书明编写。

本书在编写的过程中，参阅了大量的相关专业书籍和网络资料，在此对原著表示谢意！

由于经验和能力所限，书中难免不足之处，敬请读者提出宝贵意见。

编者

目 录

前言

第 一 章	变压器原理、结构及有关概述	1
第 二 章	变压器的运行分析	4
第一节	变压器的极性问题及测试	4
第二节	变压器中各物理量的规定正方向	6
第三节	变压器的空载运行分析	8
第四节	变压器的负载运行分析	19
第五节	物理参数计算及相关测定	29
第六节	标么值概念及阻抗标么值	33
第七节	变压器的主要运行性能分析	36
第 三 章	三相变压器磁路及联接方式	48
第一节	三相变压器的磁路系统	48
第二节	关于变压器的联接和联接组别	50
第三节	三相绕组的基本联接方式	50
第四节	三相变压器的联接组别及一、二次电压相位移	53
第五节	变压器绕组接线的测定	57
第 四 章	三相变压器的相关运行问题	61
第一节	三相变压器无载运行时的电动势波形	61

第二节	三相变压器的不对称运行问题	64
第三节	V/V 联接变压器	75
第 五章	变压器的并联运行	77
第 六章	三绕组变压器及自耦变压器	84
第一节	三绕组变压器	84
第二节	自耦变压器	90
第 七章	变压器的巡视检查及运行维护	95
第一节	变压器的巡视检查	95
第二节	变压器的正常操作	96
第三节	变压器的缺陷管理	96
第四节	变压器的异常运行及事故处理	96
第 八章	六氟化硫 (SF₆) 断路器	105
第一节	SF ₆ 断路器基本原理结构	105
第二节	SF ₆ 断路器巡视检查及运行维护	117
第三节	SF ₆ 断路器验收	119
第四节	SF ₆ 断路器故障分析及检修	120
第五节	SF ₆ 断路器解体检修防护	122
第 九章	真空断路器	124
第一节	真空断路器基本原理结构	124
第二节	真空断路器巡视检查及运行维护	131
第三节	真空断路器验收	131
第四节	真空断路器故障分析及检修	134
第 十章	组合电器	137
第一节	组合电器基本原理结构	137
第二节	组合电器巡视检查及运行维护	171
第三节	GIS 设备验收规定	175
第四节	GIS 装置的运行异常与故障处理	176
第五节	GIS 装置事故案例分析	177

第十一章 隔离开关 185

- 第一节 隔离开关简介 185
- 第二节 隔离开关的巡视检查及运行维护 188
- 第三节 隔离开关和接地开关验收 191
- 第四节 隔离开关故障分析和预防措施 192
- 第五节 接地开关简介 194
- 第六节 隔离开关异常案例分析 195

第十二章 仪用互感器 198

- 第一节 传统电磁、电容式仪用互感器 198
- 第二节 新型电子式仪用传感器简介 217
- 第三节 互感器及合并单元 (MU) 225
- 第四节 互感器的巡视检查与运行维护 242
- 第五节 互感器的异常运行与事故处理 245
- 第六节 互感器异常及案例分析 250

第十三章 防过电压装置 253

- 第一节 避雷器 253
- 第二节 避雷针 262
- 第三节 避雷线 267
- 第四节 接地网 271
- 第五节 二次过电压防护 280
- 第六节 防过电压装置的巡视检查与运行维护 285
- 第七节 防过电压装置的验收 286
- 第八节 防过电压装置的异常运行与事故处理 287
- 第九节 防过电压装置异常案例分析 290

第十四章 并联补偿电容器 292

- 第一节 无功补偿 292
- 第二节 并联补偿电容器补偿原理 294
- 第三节 并联补偿电容器的运行性能 301
- 第四节 并联补偿电容器的运行与维护 304

第五节	并联补偿电容器的异常运行与事故处理	305
第六节	串联电抗器的应用	307
第七节	电抗器故障案例分析	310
第八节	静止无功发生器	313
参考文献		315

变压器原理、结构及有关概述

自交流电广泛应用以来，变压器发挥着重要作用，它的出现使电能的远距离输送和多级使用成为可能性。

一、变压器基本原理及基本分析方法

变压器是典型的“电磁互感”元件，亦即是一个互感式电量变换器。它可以把某一电压的交流电能转变为同一频率的另一电压的交流电能，同时也变换着电流和阻抗。工作过程中虽有一些功率损耗，但总体能量是守恒的。所以称之为变压器，是因为它在电路中主要作用是改变电压。

总括地讲，变压器基本工作原理就是电磁感应互感原理的具体实现，由一次到二次是以“电—磁—电”两个过程完成的。一次绕组中的交变电量——动电生磁——铁心中的交变磁通环链两个线圈——动磁生电——在二次绕组中感应电动势并生成感应电流（二次电流），完成了“电生磁—磁生电”的过程。从中可见：一次中变化的电量是动因；磁通环是一、二次之间的中间环节即能量传递的纽带；二次绕组中生成的电量是效果。在电磁互感的基础上，通过改变各侧绕组的匝数，即可达到改变电压的目的。

当然，也有少部分情况采用“分压”变压的情况（如自耦变压器中、调压装置中），但其容量要受到一定限制。

当变压器的一次侧（原边）接到额定电网上且二次侧（副边）开路时，称为空载状态。此时其一次侧有一较小电流称为空载电流，此电流通过励磁在铁心中形成主磁通，并按比例（变比 K ）在二次侧产生感应电动势或形成空载端电压。

当二次侧（副边）接上负载后，一次电流将随二次电流的变化而变化，始终维持着电动势、磁通势的平衡。并且由于内电流的影响，将使二次侧端电压有所改变，其电压变化的大小决定于负载的大小及性质，和变压器本身的特性。在额定状态下其二次电压变化的数值直接影响到负载的运行情况，是一个重要的参数。

另外，变压器内部有损耗，即效率也随负载而变化，也是一个重要性能。

从本书第二章开始，将对变压器各状态、各物理量的情况以及相互关系进行讲解，分析变压器中能量传递的规律，运行中的损耗和效率等。

分析性能的方法是把有关电磁基本规律应用到变压器的电路和磁路中，从而确定变压器中的电压、电动势、电流、磁势、磁通和回路的阻抗相互之间必须满足的关系，列出方程式，据此计算变压器的性能。分析中需充分运用正方向、相量和等值电路的方法。

首先是以单相变压器电路进行分析，然后再在单相分析基础之上，以三相对称原则分析三相变压器电路。另有一些电路、磁路上的特殊性和联接组别多样性问题等。



本章只讨论稳态状态，至于突发时的过渡过程问题则在另外章节讨论。（电磁式互感器与变压器的原理相同，有关极性和联结等问题也基本类同）。

二、主要结构

变压器主要由电路和磁路两部分组成，另有相关的附属设施。

1. 铁心

由高导磁率的钢片叠成铁心作为互感磁路（采用 0.35 或 0.5mm 的硅钢片叠成，是为了增加铁心电阻，减少涡流以降低铁心温度）。铁心的基本形式分心式和壳式两种：线圈包围着铁心就为心式，铁心包围着线圈就为壳式，大型变压器均采用心式铁心。运行中，铁心必须一点接地，以防止悬浮电位出现，但绝不允许多点接地，那将构成回路而出现新的环流，影响铁心温度。铁心涡流及悬浮电位是由于交变磁通感应造成。

2. 线圈

由铜或铝导线绕成的各侧线圈。一般大型变压器都做成心柱式结构，各线圈套在一起，并且低压绕组靠近铁心，以降低线圈与铁心的绝缘等级。

3. 附属设施

箱体及散热装置等附属设施，包括保护设施和调压设施。

4. 绝缘设施

绝缘设施包括导体的匝间、层间、相间以及与铁心和外壳之间等各部分绝缘。其中，大型变压器箱体内盛满电气化学油浸着铁心和线圈，起绝缘和导热作用。

三、大致分类

主要的电气元件，在各类电系统中有着广泛的作用，只是在弱电系统中主要用于传递电信号；而在强电系统中主要用于传输电功率以及其他专门用途。

1. 电力变压器

电力变压器可分为单相变压器和三相变压器，分别用于不同的系统。其中有双绕组式、三绕组式、多绕组式、自耦式。电力变压器还可分为无载调压（停电调压）和有载调压（有专门的调压装置）两种，分接头一般装在高压侧，因为高压侧电流小，容易实现。

2. 电压互感器和电流互感器

电压互感器和电流互感器多用于测量，也叫仪用变压器。

3. 小型变压器

小型变压器用于低压系统和弱电系统。

4. 专用变压器

专用变压器有试验变压器、整流变压器、电炉变压器、电焊变压器等。

按照工业设备的划分原则，变压器是一种静止电器，隶属于电器设备，但它的基本原理同电机一样主要是电磁耦合。

四、变压器型号及额定技术数据

1. 型号中的相关代码

(1) 相数：单相 (D)，三相 (S)。



(2) 线圈外冷却介质：矿物油（—），不燃性油（B），气体（Q），空气（K），成型固体（C）。

(3) 箱体外冷却方式：空气自冷（—），风扇冷却（F），水冷（W）。

(4) 循环方式：自然循环（—），强迫循环（P），强迫导向（D），导体内冷（N），蒸发冷却（H）。

(5) 线圈形式：双圈（—），三圈（S），自耦（O）。

(6) 调压方式：无载调压（—），有载调压（Z）。

(7) 线圈材质：铜（T），铝（L）。

2. 额定技术数据

(1) 额定电压（伏，V/千伏，kV）。一次额定电压 U_{1N} （指所要接的系统电压）；二次额定电压 U_{2N} （指对应于一次额定电压，在空载状态时的值）。三相变压器中指线电压。

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = K \text{ (变比)}。$$

(2) 额定容量（伏安，VA/千伏安，kVA）额定容量 S_N 指额定视在功率。在三相变压器中指三相功率。

(3) 额定电流（安，A）。额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} ，在三相变压器中指线电流。

(4) 额定频率（赫兹，Hz）。强电系统国标规定额定频率 f 为 50Hz，弱电系统有不同的数值。

(5) 接线图及连接组。接线图（包括调压分接头）及连接组用图形和符号表示。

(6) 阻抗电压。阻抗电压（短路电压）百分数 $U_D(\%)$ 。

(7) 其他。空载损耗百分数；短路损耗（瓦，W/千瓦，kW）；空载电流百分数 $I_0(\%)$ ；各部分质量（千克，kg）。

变压器一般作为电源元件，其额定电压要比系列额定略高些，且为了生产和使用的统一性，对变压器的额定容量也作了系列规定。

第二章

变压器的运行分析

第一节 变压器的极性问题及测试

一、变压器绕组端的极性和名称

1. 变压器一、二次绕组的极性

所谓“电位极性”，是指电路中关于电位的两极的标记或区别；即正电位点或高单位点也叫正极性点，负电位点或低电位点也叫负极性点。

在交流电路中，一端极点用“·”标记，另一端极点无须标记。由电磁学可知，处在同一互感环境的多个线圈之间，真正有意义的是对应的同极性点关系，关乎到几个交流量之间的相位问题。

变压器的一相电路是由上、下两绕组组成，从电路角度讲是由两个两端电路的组合物，且中间通过“电磁互感”联系着的（电磁耦合）。则依照电磁互感原理，在一次和二次两侧电路之间必然存在互感极性关系，亦即相对正负点问题。

就是说，一次、二次绕组共同链着主磁通 Φ ，当主磁通变化时，在两个绕组中所感应的电动势（电压）存在同极性关系。即当一个绕组的某一端点的电位为正时，在另一个绕组中必有一个对应的正电位端点，此两点就是一、二次绕组对应的同极性端点，（同时另两点也是同极性点）。图 2-1 所示为单相绕组的极性及两种不同连接。

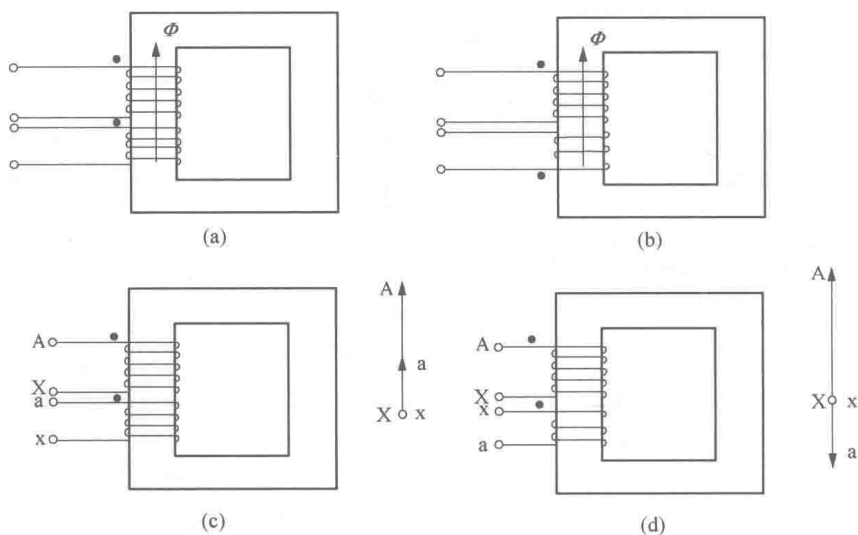


图 2-1 单相绕组的极性及两种不同连接

2. 同极性端的标记原则及线圈绕向关系

根据电磁互感原理，是以原线圈的电流方向（流入点）或由此产生的主磁通方向为起点来判断另一个线圈的互感电动势和极性关系的。并且线圈之间的绕向不同而在其上产生的互感电动势的方向（或极性点）也是不相同的。

标记原则（或叫判断方法）：若在两个互感线圈中同时通以电流，若它们所产生的磁通在线圈内是相互增强的，那么，这两个电流的流入端（或流出端）就互为同极性端。如果磁通相互削弱，则两个电流的流入端（或流出端）就互为异极性端。一般标出一对同名端。

图 2-1 (a) 中，两线圈绕向相同，依照主磁通方向用“右手螺旋定则”判断，两个线圈的对应同极性端都在上（或都在下）；

而图 2-1 (b) 中，两个线圈绕向相反，依照极性标记原则，其对应的同性端点一个在上、一个在下。

3. 绕组端线标注名称及引起的电压相位变化

变压器与外电路连接时，每绕组的首、末端都要标注名称（箱盖上或出线端处），一般高压侧用 $A \rightarrow X$ ，低压侧用 $a \rightarrow x$ ，（其中 A 、 a 、 X 、 x 分别为同名端）。

而端线可能有两种标注法，它将产生不同的一、二次电压相位关系。即端线的同名端与同极性端对应时，一、二次两个电压相位同向，见图 2-1 (c)；若端线的同名端与同极性端不对应时，其两个电压相位反向，见图 2-1 (d)。

实际中，变压器与外电路连接是以端线同名端进行连接的，所产生的相位关系如何，就要看其极性关系了。极性是相位关系的基础。

可见，由于一、二次绕组之间的极性和端线名称两个方面，决定了上、下电动势（电压）之间的“相位”关系。（在忽略了漏阻抗压降后，亦可将一、二次的电动势看作是两个电压）。

二、同极性的测试

实际工作中，有时可能因各种原因而搞不清变压器的同极性，需要进行测试。极性测试接线图如图 2-2 所示。

1. 交流法测试

把高、低压两个绕组的末端 X 和 x 连起来，在高压侧 $A \rightarrow X$ 加一交流低压（易测试），用一电压表测量高压侧电压 U_{AX} 、低压侧电压 U_{ax} 和高、低压绕组间电压 U_{Aa} ，见图 2-2 (a)。

分析：当交流电通过高压绕组时，必在低压绕组中感应电动势，而此时一、二次绕组是反向串联着的（ $A-X-x-a$ ），则按电压正方向惯例 U_{Aa} 应为 $(A \rightarrow X) - (x \leftarrow a) = U_{AX} - U_{ax}$ 的关系式，即此时 U_{Aa} 应是端电压 U_{AX} 和 U_{ax} 的相量差关系。

则当 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$ 为两电压值之差时，就表明 U_{AX} 与 U_{ax} 是同相位的，也就表明 A 和 a 是同极性点。

若当 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$ 为两电压值之和时，就表明 U_{AX} 与 U_{ax} 是反相位的，也就表明 A 和 a 是异极性点。而 A 和 x 才是同极性点。

2. 直流法测试

用一个干电池接在高压侧，用一个直流电表（万用表、毫安表或毫伏表）接在低压侧，见图 2-2 (b)。当开关 S 瞬间合上时，在高压绕组中会有一个瞬间通流，而在低压绕

组中将有一感应电动势，电表的指针因之摆动一下。

如果 S 在合上时，电表指针是向表盘的正向摆动，则电池正极所连的 A 端头和电表正极所连的 a 端头就为同极性端。

若当 S 在合上时，电表指针是向表盘的负向摆动，那电池正极上的端头和电表负极上的端头为同极性端。

在实验过程中，开关 S 的合闸拉闸不要太快，因合闸时的指针摆动方向与拉闸时的指针摆动方向正好相反，拉合太快，当中没有间隔就可能造成观察错误。

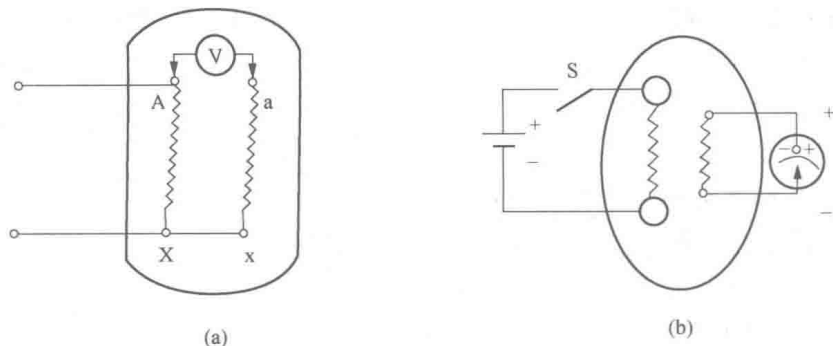


图 2-2 极性测试接线图

(a) 交流法；(b) 直流法

以上关于极性问题，都是基于电磁感应电动势的方向的根本问题。

3. 关于加极性和减极性

上述测试中可以看出：若两同名端同时为正，也就是两电动势同向时称为“减极性”，可见减极性为通常极性关系，对应于单相变压器 I/I-12 接线组；若一次侧首端为正时二次侧尾端为正，也就是两电动势反向时称为“加极性”，对应于单相变压器 I/I-6 接线组。这就是由于绕组绕向不同或端线标注名称不对应造成的。

第二节 变压器中各物理量的规定正方向

分析变压器运行情况时，我们将要遇到的是一次端电压 \dot{U}_1 、通过一次侧的电流 \dot{I}_1 、铁心中的主磁通 Φ 、一、二次绕组中的主感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 、二次电流 \dot{I}_2 以及二次端电压 \dot{U}_2 等物理量。这些量都是随时间变化的正弦量，为了正确表示它们在电路中的情况以及各量之间的相位关系，要先规定它们的参考方向或叫正方向，才可以用数学方法加以研究。图 2-3 所示为变压器各物理量的正方向。

正方向方法是将物理现象转化为数学问题的桥梁，是物理量的一个参照系。它本身并不代表某量的实际方向，只起了指路牌的作用。例如实际电流方向若与正方向一致时，这时我们说这电流为正值；若实际电流方向若与正方向相反时，电流即为负值。这就是使用‘正方向’的实际意义。

箭头方向的选定从原理上来说原是可以任意的，但电磁现象的规律是一定的，表示

电磁规律的方程式必须与选定的箭头方向配合,否则不能正确地表示出真实的规律。所以在各种电机课中为了用同一方程式表示同一电磁现象,往往在规定箭头方向时采用习惯上通用的方法——即惯例。

在以下分析中处处要用到相量(表示时间概念)和电磁感应定律(基本定律)。

图 2-3 中 A 点与 a 点为同极性点,并标出了变压器的惯例正方向。

(1) \dot{U}_1 的正方向。一次绕组 A-X 作为负载性质先接受一个外加电源电压,就以极性点标起,规定正方向为 A 点指向 X 点电压降的方向,即 \dot{U}_1 为正时 A 点电位高于 X 点。

(2) \dot{i}_1 的正方向。在 \dot{U}_1 推动下, \dot{i}_1 从高电位流向低电位,即从 A 点流入原绕组至 X 点的方向。

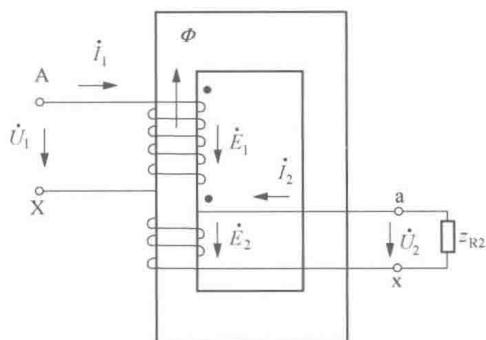


图 2-3 变压器各物理量的正方向

因为变压器一次侧具有负荷性质:这样当 \dot{U}_1 和 \dot{i}_1 同时为正或同时为负时(交流电: A 点和 X 点交替为正负),功率总是正的从电网输入到变压器一次侧,这就要求电流 \dot{i}_1 自高电位点流入。即一次侧采用的是“电动机惯例”。

(3) $\dot{\Phi}$ 的正方向。必须根据电流的正方向和‘右手螺旋定则’来确定,即正电流产生正磁通($\dot{\Phi} = Li$)。即在图 2-3 中线圈顺时针绕向,当电流从 A→X 时,按右手螺旋定则它所产生的磁通的方向(此时向上)即为 $\dot{\Phi}$ 的正方向。(注意:电流确定时,线圈绕向不同,则 $\dot{\Phi}$ 的方向会不同)。

(4) \dot{E}_1 的正方向。对于电源和一次绕组就是一个交流电感电路,若按图 2-3 的 $\dot{\Phi}$ 一开始正在增长时,电动势的方向应产生消磁的电流即实际的 e_1 此时向上,但为了总体反映电磁感应现象的全过程,习惯上规定标 \dot{I}_1 和 \dot{E}_1 为同一方向,这样就使 \dot{E}_1 向下为正方向(与电流 \dot{I}_1 同一方向,由 A 点经绕组内部指向 X 点)。

这是研究电磁感应现象的统一规定,才能得到且符合电磁感应定律的统一表达式 $\dot{e}_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$,它是涵盖整个电磁感应变化过程的,反映了电感电路中自感电动势在每时每刻都应与外加电压等值而反向 $\dot{u}_1 = -\dot{e}_1$ (忽略电阻影响)。现在分析上述正方向规定、数学表达式和物理现象的关系:当一次磁通 $\dot{\Phi}$ 在正的增大时, $\frac{d\phi}{dt}$ 变化率为正,得出的 e_1 为负的,也就是此时 \dot{E}_1 的实际方向与正方向相反由 X→A (向上),它产生消磁电流;而当一次磁通 $\dot{\Phi}$ 在正的减小时, $\frac{d\phi}{dt}$ 变化率为负,得出的 e_1 为正的,也就是此时 \dot{E}_1 的实际方向与正方向相同由 A→X (向下),它产生助磁电流。总之电磁感应规律统一性,反映在变压器中其感应电动势 \dot{E}_1 所激发的感应电流 \dot{I}_L 而激励的自感磁通 $\dot{\Phi}_L$ 总是要阻止原磁通 $\dot{\Phi}$ (一次电流 \dot{I}_1 、一次电压 \dot{U}_1) 的变化。



(5) \dot{E}_2 的正方向。由于二次绕组与一次绕组的绕法一样，且在同一个主磁通 $\dot{\Phi}$ 上，所以 \dot{E}_2 的正方向与 \dot{E}_1 取为一致，即由 a 点经绕组内部指向 x 点（实际上也是根据 $\dot{\Phi}$ 的正方向和电磁感应定律来的）。

(6) \dot{I}_2 的正方向。为了使正向电动势产生正向电流，正向电流产生正向磁通（符合右手螺旋定则），规定在 \dot{E}_2 作用下， \dot{I}_2 自 a 点流入绕组至 x 点的方向。

(7) \dot{U}_2 的正方向。按电流流出点 x 点为高电位点，规定 \dot{U}_2 的正方向为 x 点指向 a 点电压降的方向，即 \dot{U}_2 为正时 x 点电位高于 a 点电位。

因为变压器二次侧对于负载而言具有电源性质：当 \dot{U}_2 和 \dot{I}_2 同时为正或同时为负时，功率总是正的从变压器二次侧输出，这就要求电流 \dot{I}_2 自高电位点流出。即副边为“发电机惯例”。

综合以上所述的惯例，在理想变压器情况下（绕组电阻等于零、没有漏磁通、铁心无损耗），且在负载为纯电阻时，上述各量的相量关系如图 2-4 所示。

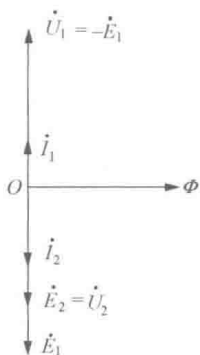


图 2-4 理想变压器电阻负载时的相量图

通过图 2-3 和图 2-4，我们大致可以看到变压器的任一瞬间各物理量的方向关系以及它们表示出的物理现象，是以下作进一步分析的基础。

总结上述规定正方向的过程中考虑了三个问题：①电磁规律是一定的，要遵守电磁感应定律 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 及磁通势与磁通方向一致的规律，表示电磁规律的方程式必须与所选正方向相配合；②在考虑磁通势与磁通方向时应注意绕组的绕向；③按变压器通用运行方式（一次输入二次输出），其惯例也是按此原则定的（当然惯例不同于规律，不是不可变的。若惯例改变，如 \dot{E}_1

的正方向反过来，那么电动势公式就成了 $e = +N \frac{d\Phi}{dt}$ ，相量图也应作相应改变。但惯例应该便于说明现象，应该有共同的了解，一般多采用上述惯例）。

第三节 变压器的空载运行分析

变压器空载运行（二次侧开路 $i_2 = 0$ ），不仅是一种可能出现的状态，而更在于空载分析将为整个变压器运行分析铺设一定的基础。我们首先根据电磁感应定律，分析绕组中发生的电磁感应现象以及电动势（电压）平衡关系；分析空载电流情况。进而依据电路基尔霍夫定律，求出一、二次绕组回路的电动势（电压）平衡方程式，并作出等值电路图和总体相量图。

一、一次感应电动势与外施电压的关系

变压器空载情况如图 2-5 所示。当一次侧接于额定电网时，外施电压 u_1 使原绕组 N_1

中立即出现空载电流 i_0 ，并形成磁通势 $F_0 = i_0 N_1$ 产生交变磁通，因此也叫励磁电流。

磁通的绝大部分通过高导磁率（低磁阻）的铁心闭路称为主磁通 Φ_0 ，它同时交链一、二次绕组。此外，另有一少部分漏磁通 Φ_{01} 散逸在铁心以外的空间，通过低导磁率（高磁阻）的其他介质闭路，仅与一次绕组相链。

交变磁通将在绕组中感生电动势并发生电磁现象，从而实现一、二次绕组间的电压变化及能量传递。分析的意义，就在于认识物理过程即工作原理，求出电动势（电压）平衡方程即计算方法。

1. 一次绕组自感主电动势

因外施电压 u_1 为正弦波，则磁通与电压成正比，故磁通也为正弦波，设主磁通表达式为

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t \quad (2-1)$$

根据上面所规定的电动势正方向，可得一次侧主感电动势瞬时值表达式为

$$e_{01} = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega N_1 \Phi_{0m} \cos \omega t = E_{01m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-2)$$

若以相量来表示，则主感电动势的有效值形式（即模值除以 $\sqrt{2}$ ）为

$$\dot{E}_{01} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_0$$

可见主感应电动势也为正弦波，其相位落后于主磁通 $\frac{\pi}{2}$ （弧度）= 90° （角度）。

$E_{01m} = \omega N_1 \Phi_{0m}$ 是电动势的最大值；又因有效值 $E_{01} = E_{01m} / \sqrt{2}$ ， $\omega = 2\pi f$ ，则电动势的有效值为

$$E_{01} = E_{01m} / \sqrt{2} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m} \quad (2-3)$$

注意后面分析要用到有效值形式。

Φ 为韦伯时， E 为伏； Φ 为麦克斯时， $E = 4.44 f N_1 \Phi_{0m} \times 10^{-8}$ 伏。且问题开始时是以瞬时值形式进行的，以后为了简便起见，正弦量可以用相量有效值形式。

即根据电磁感应原理，感应电动势总是（通过自生磁通与一次磁通的作用）阻止一次电压（电流）的变化，式（2-2）中的负号即表示了这种“阻止”关系。

所以，在忽略了一次侧电阻和漏磁通的情况下，可以认为一次侧外施电压 \dot{U}_1 与一次侧主感应电动势 \dot{E}_{01} 的关系为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_{01} \quad (\text{有效值 } U_1 \approx E_{01} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}) \quad (2-4)$$

图 2-6 所示为主磁通、主感应电动势以及外施电压之间的相位关系。

一般以主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 为基准相量。依照式（2-2），感应电动势落后于磁通 90° ；依照式（2-4），外施电压 \dot{U}_1 与感应电动势 \dot{E}_{01} 反向（相差 180° ），两者相互对应。

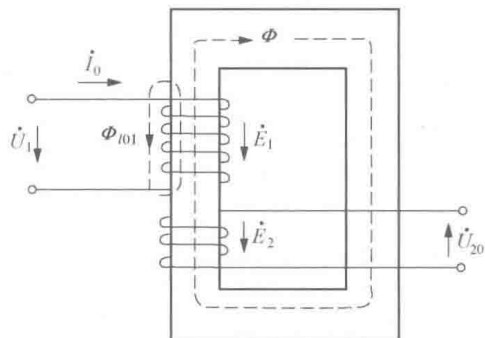


图 2-5 变压器空载情况