

电机工程手册

第25篇 变压器、互感器、调压器与电抗器

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会

机械工业出版社

3.21073
-10
25:2

电机工程手册

第25篇 变压器、互感器、 调压器与电抗器

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册

3652 / 15



机械工业出版社

本篇综合介绍变压器、互感器、调压器与电抗器的设计、制造的基本技术内容、主要经验以及常用的公式、数据和曲线；对上述产品的工作原理、性能、结构、试验以及安装、运行和维护，对有关的特种产品和某些重要新技术以及各类产品的发展趋向等，也均有概要介绍。

第 25 篇 变压器、互感器、调压器与电抗器

(试 用 本)

沈阳变压器研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张 9 $\frac{3}{4}$ ·字数 268 千字

1977 年 9 月北京第一版·1977 年 9 月北京第一次印刷

印数 000,001—120,000 ·定价 0.74 元

*

统一书号: 15033·4467

毛主席语录

人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结。在有阶级存在的社会内，阶级斗争不会完结。在无阶级存在的社会内，新与旧、正确与错误之间的斗争永远不会完结。在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

编辑说明

(一) 我国自建国以来，特别是无产阶级文化大革命以来，机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下，坚持政治挂帅，以阶级斗争为纲，贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》，使出版工作更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查，以便广大机电工人使用，有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的基础理论，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，

共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《电机工程手册》第25篇, 由沈阳变压器研究所主编, 参加编写的有沈阳变压器厂、西安变压器电炉厂、常州变压器厂、上海变压器厂、上海互感器厂、上海电压调整器厂、山西省机械设计研究所等单位。许多有关单位为编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

符 号 表

1. 电工常用通用符号

a	——两中心间距离
l	——长度
b	——宽度
h	——高度
δ	——厚度、相角差
r, R	——(内、外)半径
d, D	——(内、外)直径
A	——面积
V	——体积
$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	——平面角
φ	——相角
t	——时间
T	——周期、绝对温度
τ	——时间常数
f	——频率、比值差
ω	——角频率
F	——力、磁势
G	——重量
M	——力矩、互感
η	——效率
θ	——温度
q	——单位面积热负载
C	——热容量、电容
E, e	——(有效值、瞬时值)感应电势
E	——电场强度、弹性模数
U, u	——(有效值、瞬时值)电压
I, i	——(有效值、瞬时值)电流
H	——磁场强度
B	——磁通密度
j	——电流密度
ϕ	——磁通
μ	——磁导率
R, r	——电阻
X, x	——电抗
Z, z	——阻抗
Y, y	——导纳
ρ	——电阻率
L	——电感
N	——线圈匝数
P	——有功功率
Q	——无功功率
S	——容量(视在功率)
$\cos \varphi$	——功率因数
p	——单位损耗
q	——单位激磁容量

2. 本篇常用通用符号

K	——电压(电流)比
K_{xy}	——自耦变压器效益系数
K_{Rz}	——纵向洛氏系数
K_{Rh}	——横向洛氏系数
K_{ts}	——附加损耗系数
K_{wl}	——涡流损耗系数
S_z	——变压器每柱容量
P_0	——空载损耗
P_s	——短路损耗
P_z	——总损耗
P_r	——直流电阻损耗
P_{tj}	——附加损耗
P_{js}	——结构损耗
U_z	——阻抗电压
U_r	——电阻电压
U_x	——电抗电压
u_z	——阻抗电压百分数
u_r	——电阻电压百分数
u_x	——电抗电压百分数
U_ϕ	——相电压
E_z	——匝电势
B_z	——铁柱磁通密度
B_E	——铁轭磁通密度
B_x	——铁心磁通密度
I_0, i_0	——空载电流、激磁电流
I_{0a}, i_{0a}	——空载电流有功分量、损耗电流
I_{0r}, i_{0r}	——空载电流无功分量、磁化电流
I_ϕ	——相电流
ϕ_z	——铁心主磁通
A_z	——铁柱有效截面
A_E	——铁轭有效截面
A_x	——铁心有效截面
r_0	——激磁电路的等值电阻
x_0	——激磁电路的等值电抗
z_0	——激磁电路的等值阻抗
D_z	——铁柱直径
A_D	——单根导线截面
l_x	——油箱长度
b_x	——油箱宽度
h_x	——两线圈净高度平均值
a_z	——铁柱中心距
$\Delta\theta_{Q-y}$	——线圈对油的平均温升
$\Delta\theta_{Q-k}$	——线圈对空气的平均温升(简称线圈温升)
$\Delta\theta_{y-k}$	——油对空气的平均温升
$\Delta\theta_{M-k}$	——油箱顶层油对空气的温升(简称油面温升)

目 录

编辑说明

符号表

第1章 变 压 器

1 概 述	25-1
1.1 用途和分类	25-1
1.2 结构概况	25-2
1.3 主要技术参数	25-3
1.4 变压器容量与重量的关系	25-4
2 变压器原理	25-4
2.1 基本工作原理	25-4
2.2 变压器的空载运行	25-5
2.3 变压器的负载运行	25-6
2.4 变压器运行性能	25-8
2.5 三线圈变压器	25-8
2.6 自耦变压器	25-9
3 变压器的结构和设计	25-10
3.1 设计的一般程序	25-10
3.2 铁心	25-10
3.3 线圈	25-14
3.4 绝缘结构	25-19
3.5 短路性能计算	25-24
3.6 油箱、冷却装置和温升计算	25-28
3.7 引线及分接开关	25-35
3.8 套管及其他组部件	25-43
4 变压器联接组标号	25-44
4.1 线圈绕向、端子标志及矢量关系	25-44
4.2 线圈联接法	25-45
4.3 联接组标号	25-46
5 变压器制造工艺	25-46
5.1 铁心制造	25-46
5.2 线圈制造	25-47
5.3 引线焊接	25-48
5.4 器身干燥处理	25-48
5.5 装配	25-49
5.6 油净化工艺	25-50
5.7 环氧树脂浇注工艺	25-50

6 变压器试验	25-50
6.1 出厂试验	25-51
6.2 型式试验	25-55
6.3 其他试验	25-56
7 变压器安装、运行和维护	25-57
7.1 变压器安装	25-57
7.2 变压器运行	25-59
7.3 变压器主要组件的维护	25-61
7.4 变压器油的维护与监视	25-62
8 干式变压器	25-62
8.1 用途和特点	25-62
8.2 结构特征	25-63
8.3 计算要点	25-64
9 变流(整流)变压器	25-65
9.1 用途和特点	25-65
9.2 主要技术参数和技术要求	25-66
9.3 结构特征	25-68
9.4 平衡电抗器	25-70
10 电炉变压器	25-72
10.1 用途和特点	25-72
10.2 结构特征	25-73
10.3 计算要点	25-76
11 高压试验变压器	25-79
11.1 用途和特点	25-79
11.2 主要技术要求	25-79
11.3 结构型式	25-80
11.4 计算要点	25-81
11.5 试验变压器的串级	25-82
12 其他特种变压器	25-83
12.1 矿用一般型变压器	25-83
12.2 矿用隔爆型变压器	25-83
12.3 船用变压器	25-83
12.4 中频变压器	25-84

第2章 互 感 器

1 电压互感器	25-85
1.1 工作原理	25-86

1.2 结构特征	25-88
1.3 设计要点	25-90
1.4 试验	25-93
2 电流互感器	25-94
2.1 工作原理	25-95
2.2 误差补偿	25-96
2.3 结构特征	25-98
2.4 设计要点	25-99
2.5 试验	25-101
3 特种互感器	25-102
3.1 电容式电压互感器	25-102
3.2 零序电流互感器	25-104
3.3 直流互感器	25-105

第3章 调压器

1 接触调压器	25-109
1.1 结构与工作原理	25-109
1.2 设计及工艺要点	25-110
2 移圈调压器	25-111
2.1 结构与工作原理	25-111
2.2 设计及工艺要点	25-112
3 磁性调压器	25-114
3.1 结构与工作原理	25-114
3.2 计算要点	25-115
4 感应调压器	25-116

4.1 工作原理	25-116
4.2 结构特点	25-119
4.3 计算要点	25-120
5 调压器组成的稳压装置	25-122
5.1 稳压器	25-122
5.2 稳压器主回路方案的选择	25-123
5.3 稳压控制线路方案的选择	25-124

第4章 电抗器

1 空心式电抗器	25-126
1.1 用途和特点	25-126
1.2 结构特征	25-126
1.3 计算要点	25-127
1.4 制造与安装	25-129
2 铁心式电抗器	25-129
2.1 用途和特点	25-129
2.2 结构特征	25-131
2.3 计算要点	25-132
3 饱和电抗器和自饱和电抗器	25-134
3.1 饱和电抗器	25-135
3.2 自饱和电抗器	25-139
附录 常用电力变压器主要系列产品 技术数据表	25-142
参考文献	25-145

第1章 变 压 器

1 概 述

1.1 用途和分类

电力的经济输送、分配与安全使用，需要升高或降低电压；变压器就是根据这种需要，利用电磁感应原理制成的一种电器。

变压器一般分电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电力的主要设备。按用途分类，电力变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器（联接几个不同电压等级的电网用）和厂用电变压器（供发电厂自用电用）等几种。它还可以按线圈数、相数、冷却方式以及调压方式等分类，如表25·1-1。特种变压器是根据冶金、矿山、化工、交通等部门的不同要求，提供各种特种电源或作其它用途。主要的特种变压器的用途和分类如表25·1-2。

表25·1-1 电力变压器的分类和型号

型号中代表符号排列顺序	分 类	类 别	代表符号
1	线圈耦合方式	自 耦	O
2	相 数	单 相 三 相	D S
3	冷却方式	油浸自冷 干式空气自冷 干式浇注绝缘 油浸风冷 油浸水冷 强迫油循环风冷 强迫油循环水冷	— G C F S FP SP
4	线圈数	双线圈 三线圈	— S
5	线圈导线材质	铜 铝	— L
6	调压方式	无载调压 有载调压	— Z

表25·1-2 主要的特种变压器的用途和分类

名 称	用 途	特征型号
整流变压器 附平衡电抗器	交直流电能变换	Z K
电炉变压器 附串联电抗器 电阻炉变压器	电能与热能交换	H K ZU
试验变压器	高压试验用	Y
矿用变压器	矿井下配电用	K
船用变压器	船舶配电用	S
中频变压器	1000~8000赫兹交流系统用	R
大电流变压器	大电流试验用	D

变压器的用途十分广泛，品种、规格繁多。通常，变压器的安装总容量约为发电机安装总容量的6~8倍。互感器、调压器和电抗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。这类产品在电力系统中应用概况见图25·1-1。

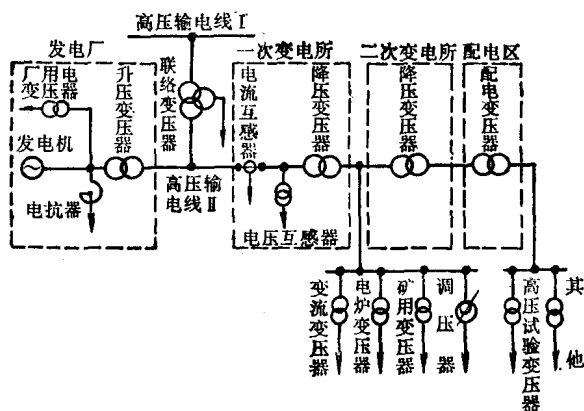


图25·1-1 变压器类产品应用示意图

随着国民经济的发展,电力系统中发电机容量与输电电压不断提高,要求发展更大容量、更高电压的电力变压器。同时,为了加强电网联网和集中控制,适应负载变化与改善供电质量的需要,还要求积极发展有载调压和自动调压装置。图 25·1-2 为

330 千伏 360 兆伏安有载调压电力自耦变压器外形图。特种变压器除要求发展更多的品种、系列外,还应注意发展组合成套装备,以适应工农业和某些特殊场所的不同需要。

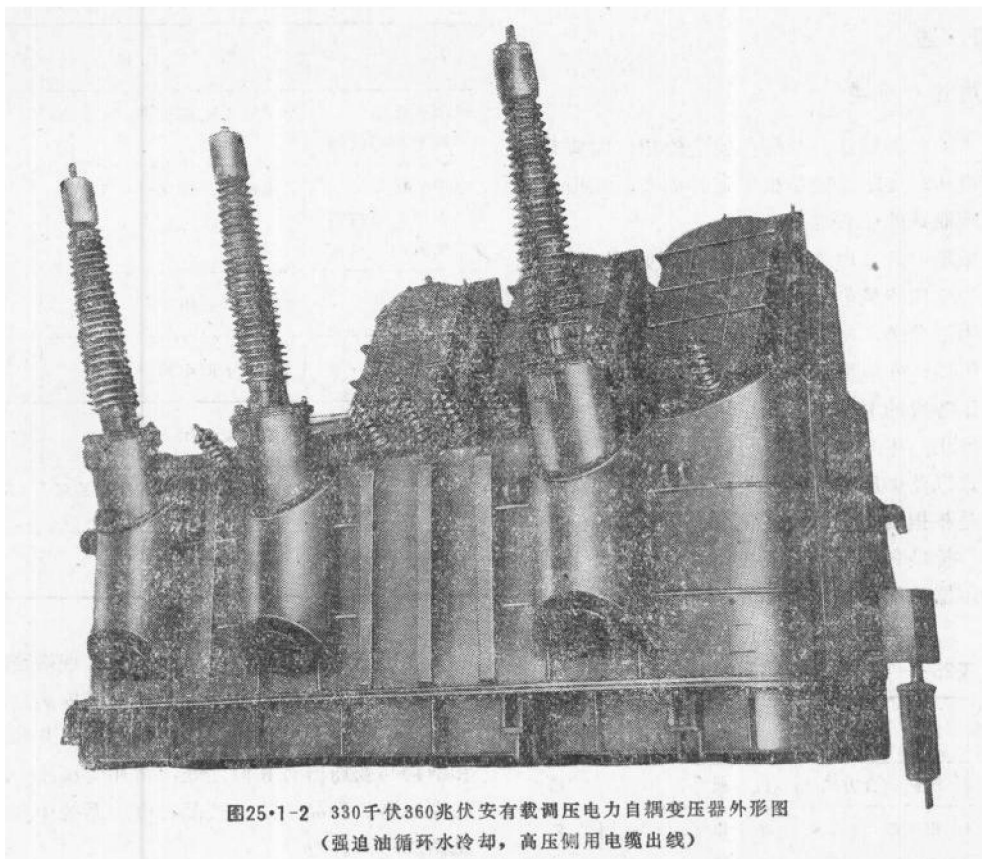


图25·1-2 330千伏360兆伏安有载调压电力自耦变压器外形图
(强迫油循环水冷却,高压侧用电缆出线)

1.2 结构概况

目前,油浸式变压器是生产量最大、应用面最广的一类变压器。图25·1-3和表25·1-3为油浸式电力变压器结构的一般概况。

变压器结构对提高效率、节约材料、提高劳动生产率、降低成本、缩小运输尺寸和重量以及提高运行可靠性等有直接影响。

变压器的某些结构零部件要承受相当大的机械负载、热负载和高电压的作用,尤其是变压器的线圈和绝缘,必须具有足够的机械强度、绝缘强度和耐热能力,能经受住一定的过电压、过电流和短路电磁力的冲击。

改进变压器结构,不仅取决于结构设计工作的发展,而且有赖于新材料、新工艺、新技术和新装备以及标准化、系列化、通用化工作的发展和协同配合。例如,为了扩大铝线和铝合金线的应用,不断提高变压器的技术经济性能,除了应持续地开展结构设计研究以及注意电子计算技术在变压器计算和科研上应用外,同时应积极研究提高冷轧硅钢片与铝和铝合金线的性能。中小型变压器的生产,要进一步提高效率,减轻劳动强度,应注意推广和发展有利于实现机械化、自动化生产的某些铁心和线圈的新结构以及相应的生产线与新工艺。大型和特大型变压器则要积极开展电场、漏磁场、热场以及短路电磁力的模拟和测试研究,以便掌握改进结构

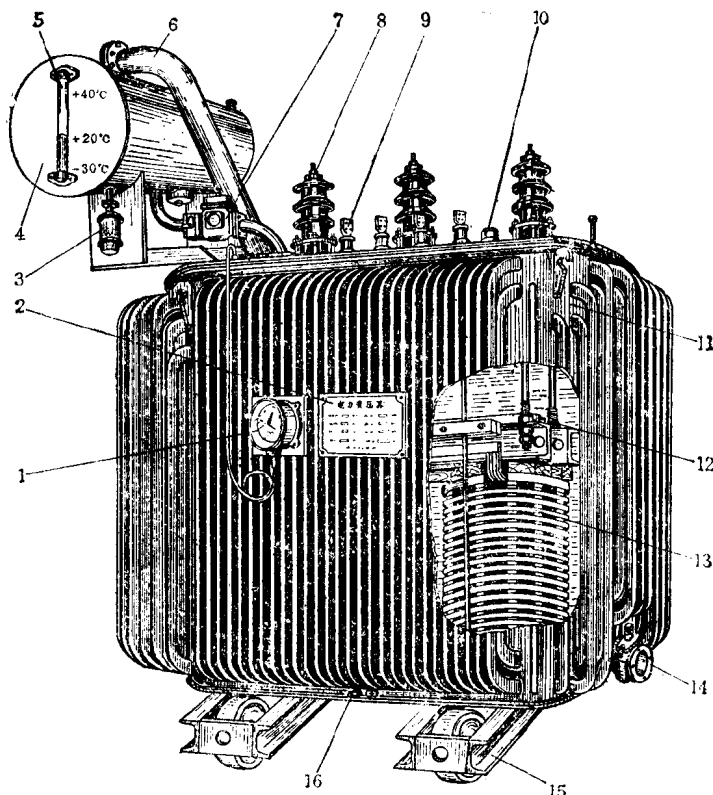


图25-1-3 油浸式电力变压器
1—讯号式温度计 2—铭牌 3—吸湿器 4—储油柜 5—油表 6—安全气道
7—气体继电器 8—高压套管 9—低压套管 10—分接开关 11—油箱 12—铁
心 13—线圈及绝缘 14—放油阀门 15—小车 16—引线

表25-1-3 变压器的结构概况表

变 压 器	器 身	铁 心
		线 圈
		绝 缘
		引线及分接开关等
	油 箱	油箱本体（包括箱盖、箱壁、箱底等）
		附件（包括放油阀门、活门、小车、油样活门、接地螺栓、铭牌等）
	冷却装置	散热器或冷却器
	保护装置	储油柜、油表、安全气道、吸湿器、测温元件、净油器、气体继电器等
	出线装置	高压套管、低压套管

的有关的规律。

1.3 主要技术参数

变压器在规定的使用环境和运行条件下，其主要技术参数包括：额定容量、额定电压及其分接、额定频率、线圈联接组标号以及额定性能数据（阻抗电压、空载电流、空载损耗和短路损耗）等，这

些技术参数一般都标注在变压器铭牌上。它们的定义与数据在本篇有关章节中有所规定和说明。

1.3.1 额定容量等级

按GB 1094-71规定，我国现在采用的额定容量等级基本上是按 $\sqrt[10]{10}$ 的倍数增加的，即所谓R₁₀容量系列，具体容量等级为：10，20，30，40，50，

63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000, 25000, 31500, 40000, 50000, 63000, 90000, 120000, 150000, 180000, 260000, 360000, 400000 千伏安等 (1967 年以前曾采用过 R_s 容量系列)。通常, 容量为 630 千伏安及以下的变压器统称为小型变压器, 800~6300 千伏安的变压器统称为中型变压器, 8000~63000 千伏安的变压器统称为大型变压器, 90000 千伏安及以上的变压器统称为特大型变压器。

1.3.2 额定电压组合和联接组标号

不同容量等级的油浸式电力变压器的电压组合和联接组标号见表 25·1-4。

表25·1-4 油浸式电力变压器的电压组合和联接组标号表 (JB 1300~1304-73)

类别	容量 kVA	电压组合 kV			联接组标号
		高压	中压	低压	
1	10~1600	6, 10		0.4	Y/Y ₀ -12
2	630~6300	6, 10		3.15, 6.3	Y/Δ-11
3	50~1600	35		0.4	Y/Y ₀ -12
4	800~31500	35 (38.5)		3.15~10.5 (3.3~11)	Y/Δ-11 (Y ₀ /Δ-11)
5	6300 ~120000	110 (121)		6.3, 11 (10.5, 13.8)	Y ₀ /Δ-11
6	6300 ~63000	110 (121)	38.5	6.3, 11	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
7	31500 ~120000	220 (242)		6.3~13.8 (38.5)	Y ₀ /Δ-11 (Y ₀ /Y ₀ -12)
8	31500 ~63000	220 (242)	121	6.3, 11 (38.5)	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11 (Y ₀ /Y ₀ /Y ₀ -12-12)
9	63000 ~120000	220 (242)	121	10.5, 13.8 (38.5)	0-Y ₀ /Δ-12-11 0-Y ₀ /Y ₀ -12-12
10	120000以上	110 以上	按 技 术 协 议		

1.4 变压器容量与重量的关系

10千伏及35千伏标准系列铝线圈电力变压器容量与重量的关系近似曲线见图 25·1-4; 110 千伏标准系列铝线圈 (双线圈、三线圈) 电力变压器容量与重量的关系近似曲线见图 25·1-5。

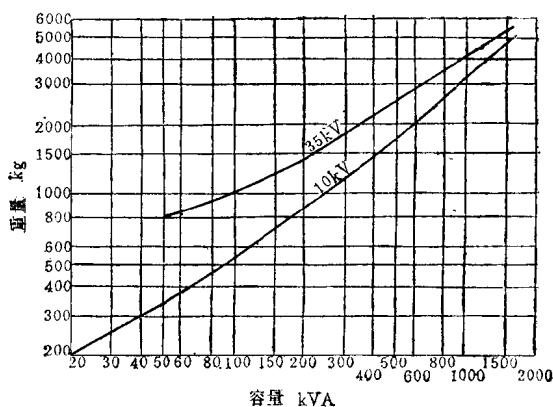


图25·1-4 10千伏及35千伏电力变压器容量与重量的关系近似曲线

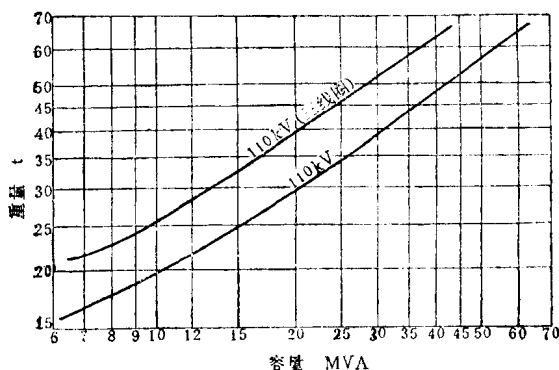


图25·1-5 110千伏电力变压器容量与重量的关系近似曲线

2 变压器原理

2.1 基本工作原理

为了便于了解变压器的主要作用——改变电压及电流, 先忽略变压器中的次要因素, 即假设变压器线圈的电阻、漏磁通和铁损都很小, 可略去不计; 铁心的磁导率很大, 激磁磁势也可忽略不计。图 25·1-6 为一台单相变压器 (或三相变压器的一相) 的原理图, 图中箭头符号表示各有关量的正方向 (以下均同)。

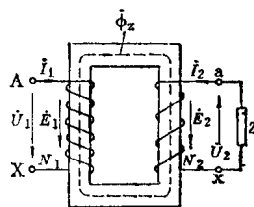


图25·1-6 变压器基本工作原理图

2.1.1 电压比

当变压器一次侧接到频率为 f 和电压为 U_1 的正弦交流电源, 二次侧开路时, 铁心中将产生主磁通 ϕ 。根据电磁感应定律和电势平衡规律, 可推导出:

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\phi_{\text{max}} \quad (25.1-1)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\phi_{\text{max}} \quad (25.1-2)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{12} \quad (25.1-3)$$

K_{12} 为变压器的电压比。上列公式说明, 适当选择一、二次线圈匝数比 $\frac{N_1}{N_2}$, 就可以把一次侧电压改变到所需要的二次侧电压。

2.1.2 电流比

当二次侧接上负载阻抗 Z , 二次线圈中就有电流 I_2 , 一次侧线圈也同时有 I_1 输入, 以平衡二次线圈的磁势, 由此得出:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (25.1-4)$$

$$\text{或} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K_{12}} \quad (25.1-5)$$

2.1.3 容量

从公式 (25.1-3) 和公式 (25.1-5) 可以得出:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (25.1-6)$$

当一、二次侧的电压和电流为额定值时, 变压器容量 S 为额定容量, 以 S_n 代表。

2.1.4 阻抗折算关系

二次侧负载阻抗

$$Z = \frac{E_2}{I_2}$$

折算到一次侧时

$$Z' = \frac{E_1}{I_1} = K_{12}^2 Z \quad (25.1-7)$$

实际上, 变压器铁心的磁导率不是常数, 产生磁通需要激磁磁势, 即 $I_0 N_1 = I_1 N_1 - I_2 N_2$, 且产生损耗; 线圈有电阻和漏磁通。在分析变压器的工作状况时必须考虑这些因素的影响。

2.2 变压器的空载运行

当变压器一次侧接到额定电压和额定频率的正

弦交流电源, 二次侧开路时, 一次线圈内有空载电流 I_0 , 产生磁势 $I_0 N_1$, 从而产生主磁通 ϕ_z 与一次线圈的漏磁通 ϕ_{110} (ϕ_{110} 约占全部磁通的 0.1~0.2%, 一般可忽略不计)。空载运行原理图见图 25.1-7。

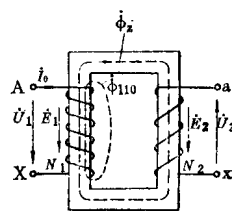


图25.1-7 单相变压器空载运行原理图

2.2.1 空载电流和空载损耗

空载电流包括有功分量 I_{0a} 和无功分量 I_{0r} 。前者又称损耗电流, 用以供给空载损耗 P_0 (空载电流在一次线圈中产生的损耗略去不计); 后者又称磁化电流, 用以激磁。上述各量的相位关系见图 25.1-9。

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad (25.1-8)$$

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0 \approx E_1 I_{0a} \quad (25.1-9)$$

通常 I_0 以额定电流 I_{1n} 的百分数表示, 即 $\frac{I_0}{I_{1n}} \times 100$ 。采用冷轧硅钢片时, 中小型变压器的空载电流一般为 2~8%, 大型变压器则往往小于 1%。

当铁心没有饱和, 磁通按正弦变化时, i_{0r} 接近于正弦波。但铁心趋于饱和时, i_{0r} 为一尖顶波, 见图 25.1-8。此尖顶波除含基波 i_{01} 外, 还有一较强的三次谐波 i_{03} 和其它高次谐波。磁化电流的三次谐波分量对某些三相变压器的运行会引起不利的影响 (参见本章 4.2)。

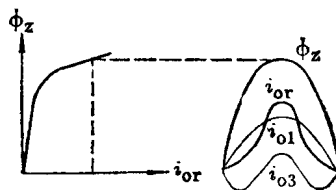


图25.1-8 磁化电流波形

2.2.2 矢量图和等值电路

图 25.1-9、图 25.1-10 分别为空载运行矢量图和等值电路。由于 I_0 以及一次线圈的电阻 r_1 和 ϕ_{110} 均较小, 一次线圈的电阻电压 $I_0 r_1$ 和电抗压降 $I_0 x_1$ 可忽略不计, 即 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$

$$\text{则} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{12} \quad (25.1-10)$$

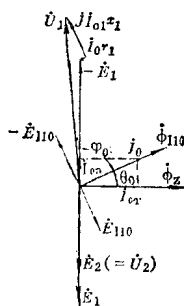


图25-1-9 单相变压器空载运行矢量图

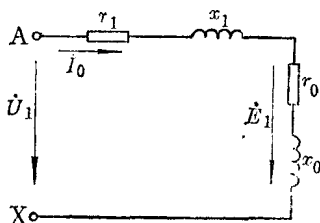


图25-1-10 单相变压器空载运行等值电路

变压器空载运行时，近似于一个带铁心的电感线圈。由图 25-1-10 可见

$$\dot{U}_1 = I_0 [(r_1 + jx_1) + (r_0 + jx_0)] = I_0 (z_1 + z_0) \quad (25-1-11)$$

$$-E_1 = I_0 (r_0 + jx_0) = I_0 z_0 \quad (25-1-12)$$

式中 r_0 、 x_0 、 z_0 分别代表激磁电路的等值电阻、等值电抗和等值阻抗，均不是常数。但在变压器实际运行中，当 U_1 变动不大时，可不考虑 z_0 的变化。在数值上 z_0 比 z_1 要大得多，这是由于在额定电压下的空载损耗比空载时的线圈电阻损耗大得多，而主磁通比漏磁通大得多。

2.2.3 空载合闸

变压器空载合闸接到电源的瞬间，由于铁心的饱和与剩磁的影响，瞬时电流往往比稳态运行时的空载电流大，甚至可达额定电流的数倍。

空载合闸过程主要表现为磁通变化的过渡过程。瞬时主磁通的大小，决定于合闸时电压的瞬时值和铁心中的剩磁。合闸时电压瞬时值为零，情况最为严重，瞬时主磁通在第一个半波内就达到将近稳态磁通最大值 ϕ_{2max} 的两倍，如图 25-1-11 所示。此时若铁心剩磁 ϕ_r 与第一个半波的磁通方向一致，则瞬时主磁通将增加为 $(2\phi_{2max} + \phi_r)$ 。由于铁心

的饱和，瞬时电流就很大，其中含有较强的高次谐波。这个电流将在几个周波内衰减而达稳定，因而对变压器没有直接危险，但能引起一次侧过电流保护装置动作，使变压器从电源断开。遇到这种情况，可重合闸几次，当瞬时主磁通较小时，就可不跳闸。

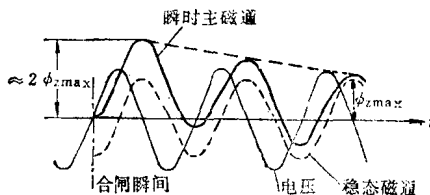


图25-1-11 合闸瞬间电压为零值的瞬时主磁通 (不包括铁心剩磁)

2.3 变压器的负载运行

在空载运行的基础上，当二次侧接上负载阻抗 Z 时，变压器将有电流 I_2 输出，同时输入电流也从 I_0 相应增加到 I_1 。由于变压器内电流的影响，将使二次侧电压 U_2 有所改变，其变化大小取决于负载的大小和性质以及变压器本身的阻抗。

2.3.1 负载运行时的基本方程式

图 25-1-12 为负载运行原理图， ϕ_{11} 、 ϕ_{12} 分别代表一、二次线圈漏磁通。按照磁路的全电流定律，两线圈的磁势平衡方程式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (25-1-13)$$

$$\text{故 } I_1 = I_0 + I_{12} = I_0 + \left(-\frac{I_2}{K_{12}} \right) \quad (25-1-14)$$

式中 I_{12} 为 I_1 的负载分量，用以抵消 I_2 所产生的磁势。

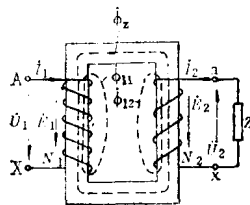


图25-1-12 单相变压器负载运行原理图

根据电势平衡规律，可推导出一、二次电压的基本方程式：

$$\dot{U}_1 = -E_1 + I_1 (r_1 + jx_1) = -E_1 + I_1 z_1 \quad (25-1-15)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 z_2 \quad (25\cdot1-16)$$

式中 r_1 、 r_2 、 x_1 、 x_2 分别代表一、二次线圈的电阻和漏电抗。

2.3.2 矢量图和等值电路

图 25·1-13、图 25·1-14 分别为负载运行矢量图和等值电路。由于 $I_1 z_1$ 一般只有 U_1 的 2~5%，可认为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。因此，负载运行时 ϕ_z 和 I_0 与空载运行时相差不多。当 I_0 很小时， I_1 和 I_2 仍近似地与 N_1 和 N_2 成反比。负载运行时，变压器自电源汲取的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (25\cdot1-17)$$

二次侧输出功率为

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - E_1 I_{0a} - I_1^2 r_1 - I_2^2 r_2 \quad (25\cdot1-18)$$

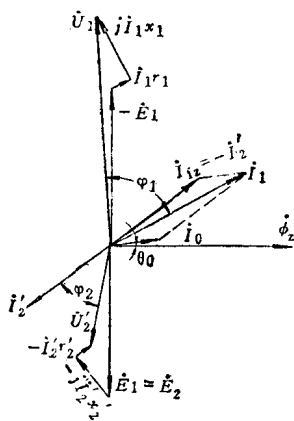


图 25·1-13 单相变压器负载 (感性) 运行矢量图

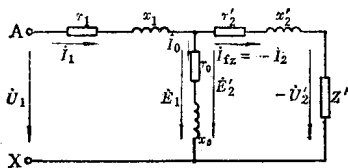


图 25·1-14 单相变压器负载运行等值电路

2.3.3 阻抗电压和短路损耗

由于变压器的空载电流很小，它对 z_1 的压降可忽略不计。因此，图 25·1-14 等值电路可简化为图 25·1-15，图中 $r_{12} = r_1 + r_2$ ， $x_{12} = x_1 + x_2$ 。

当二次线圈端子短接 (稳态短路)，即 $Z' = 0$ ，则 $U_2' = 0$ 。此时，为使一次线圈产生额定电流 I_{1n} 而施加的电压，称为阻抗电压 U_z ；变压器自电源汲取的功率，即为短路损耗 P_s 。(计算公式参见本章 3·5·1)

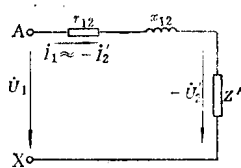


图 25·1-15 忽略空载电流的等值电路

$$U_z = I_{1n}(r_{12} + jx_{12}) = I_{1n} z_{12} \quad (25\cdot1-19)$$

通常阻抗电压以额定电压的百分数表示，即

$$u_z = \frac{U_z}{U_{1n}} \times 100 \quad (25\cdot1-20)$$

当施加的电压为额定一次电压 U_{1n} 时，稳态短路电流

$$I_{1s} = \frac{U_{1n}}{z_{12}} = \frac{I_{1n}}{u_z} \times 100 \quad (25\cdot1-21)$$

阻抗电压是变压器的一个重要参数，它与变压器的成本和动、热稳定等有关，还对电力系统的稳定、供电质量以及继电保护等有联系。为了降低运行中的电能损失和电压波动，阻抗电压应小些；从减小短路电流考虑，阻抗电压应大些。但阻抗电压过大或过小，都会导致制造成本增加。标准系列电力变压器的阻抗电压百分数在 JB1300~1304-73 中都有一定规定。阻抗电压百分数的两个分量与容量有关：电阻电压百分数 u_r 随容量的增加而减小，而电抗电压百分数 u_x 则增大。 $\frac{u_x}{u_r}$ 的比值，一般大型变压器可达 10~15，中小型变压器则在 1~5 的范围内。

2.3.4 突发短路

当忽略空载电流时，变压器相当于一个阻抗 $z_{12} = r_{12} + jx_{12}$ 。稳态短路电流 I_{1s} 一般为额定电流的几倍到二十几倍。二次侧突发短路时，若不考虑系统阻抗，则

$$i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \left[\cos \varphi_0 e^{-\frac{r_{12}}{x_{12}} \omega t} - \cos(\omega t + \varphi_0) \right]$$

短路电流 i_{1s} 变化的过渡过程取决于二次侧突发短路时一次电压 u_1 的初相角 φ_0 。当 $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ 时， $i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \sin \omega t$ 。这种情况与稳态短路相同，没有过渡过程。当 $\varphi_0 = 0$ 时，即电压 u_1 过零时发生短路，

$$i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \left(e^{-\frac{r_{12}}{x_{12}} \omega t} - \cos \omega t \right), \text{ 如图 25·1-16 所}$$

示,情况最为严重。当 $\omega t = \pi$ 时,短路电流的不对称峰值为

$$i_{1sm} = \sqrt{2} I_{1s} (1 + e^{-\frac{\pi r_{12}}{x_{12}}}) = \sqrt{2} K_s I_{1s} \quad (25 \cdot 1-22)$$

$$\text{式中 } K_s = 1 + e^{-\frac{\pi r_{12}}{x_{12}}}$$

中小型变压器的 $K_s = 1.2 \sim 1.4$

大型变压器的 $K_s = 1.7 \sim 1.8$

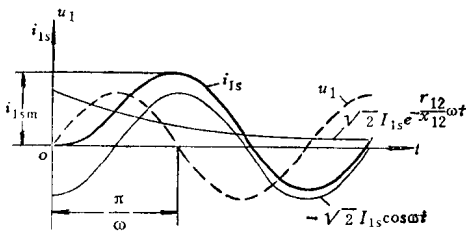


图25-1-16 突发短路时的电流曲线

变压器应能承受 i_{1sm} 产生的电磁力和热作用而无损伤,即保证变压器的动、热稳定。

2.4 变压器运行性能

2.4.1 电压变动率

变压器负载运行时,由于有阻抗电压,二次电压将随着负载电流和负载功率因数的改变而改变。

变压器的电压变动率

$$\varepsilon\% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \times 100$$

式中 U_{2n} ——额定二次电压;

U_2 ——负载时的二次电压。

当已知变压器的电阻电压百分数 u_r 及电抗电压百分数 u_x 时,可按不同的负载系数 K_{fz} 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$,用下式计算电压变动率:

$$\begin{aligned} \varepsilon\% &= K_{fz} (u_r \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2) \\ &+ \frac{K_{fz}^2 (u_x \cos\varphi_2 - u_r \sin\varphi_2)^2}{200} \quad (25 \cdot 1-23) \end{aligned}$$

如不需要特别准确时,则可按下式计算

$$\varepsilon\% = K_{fz} (u_r \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2) \quad (25 \cdot 1-24)$$

式中 $K_{fz} = \frac{\text{输出容量}}{\text{额定容量}}$;

$\sin\varphi_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2\varphi_2}$, 滞后电流取正值,超前电流取负值。

电压变动率是衡量变压器供电质量好坏的指标之一。当变压器的阻抗电压百分数一定时,电压变动率主要与负载功率因数有关。当 $\cos\varphi_2 = 1$ 时, ε 为最小; $\cos\varphi_2$ 较小时, ε 主要取决于 u_x ,大型变压器的 u_x 较大, ε 就较大。

2.4.2 效率

变压器的效率为输出的有功功率 P_2 与输入有功功率 P_1 之比,以百分数表示

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

负载运行时, P_2 与负载系数 K_{fz} 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关。若略去变压器中阻抗电压的影响,则效率为

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + K_{fz}^2 P_s}{K_{fz} S_n \cos\varphi_2 + P_0 + K_{fz}^2 P_s} \right) \times 100 \quad (25 \cdot 1-25)$$

通常,中小型变压器 η 约在95~98%的范围内,大型变压器一般在99%以上。

2.5 三线圈变压器

三线圈变压器大多用于二次侧需要两种不同电压的场合。图25-1-17表示三线圈变压器结构的示意图。

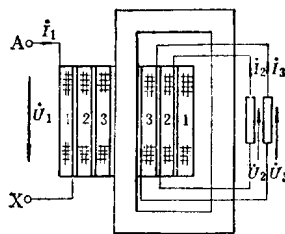


图25-1-17 单相三线圈变压器结构示意图

2.5.1 电压比

三线圈变压器的空载运行原理与双线圈变压器基本相同,但有三个电压比

$$\left. \begin{aligned} K_{12} &= \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \\ K_{13} &= \frac{N_1}{N_3} = \frac{E_1}{E_3} \approx \frac{U_1}{U_3} \\ K_{23} &= \frac{N_2}{N_3} = \frac{E_2}{E_3} \approx \frac{U_2}{U_3} \end{aligned} \right\} \quad (25 \cdot 1-26)$$