

变压器的理论与计算

[苏] C. B. 瓦修京斯基 著

机械工业出版社

本书研究变压器理论与计算的基本问题,包括变压器的励磁特性,多线圈变压器与自耦变压器理论,变压器线圈与复杂变压器回路的电抗与损耗计算,变压器的不对称运行与过渡过程,变压器的电动力与热特性等。书中内容基本上反映了当前变压器理论发展的水平。

本书的读者对象是高等院校电机专业高年级学生、毕业生与研究生。本书也可供从事变压器设计制造、试验研究、运行维护的广大工程技术人员参考。

本书是由沈阳变压器研究所组织翻译的。参加本书翻译工作的有:赵育文(绪论与第一章)、张喜德(第二章)、张万和(第三章)、崔立君(第四章)、杜恩田(第五章)、陆安业(第六章)、张怀灵(第七章)、吕让沅(第八章)及宋铁章(第九章)等同志,并由崔立君同志担任全书译文的校对工作。

**ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА
ТРАНСФОРМАТОРОВ
С. Б. ВАСЮТИНСКИЙ
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЭНЕРГИЯ» 1970**

变压器的理论与计算

[苏] С. Б. 瓦修京斯基 著

崔立君 杜恩田 等译

*

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登记证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 ·印张16·字数350千字

1983年7月重庆第一版·1983年7月重庆第一次印刷

印数 00,001—18,900·定价 2.45 元

*

统一书号: 15033·5390

序 言

目前，变压器在电力工程的各个领域获得了广泛的应用。变压器作为动力装置用于变换电压或联络不同电压的电网与系统，也用于电力拖动、电力牵引、电加热和电力工程的其它领域。在无线电工程及自控设备中，各类变压器的应用更为广泛。现代变压器的额定电压与容量的变化范围是相当大的。

这些年来还未曾出版过一部详尽论述一般和特殊用途变压器理论与计算的书。因此，对出版这样一部书籍的渴望是不容置疑的。

我向读者推荐的 C. Б. 瓦修京斯基著的《变压器的理论与计算》这部书，在某种程度上填补了这个空白。诚然，著者不可能在本书中讨论所有的问题，特别是在分析变压器的电磁过程及设计近代电力变压器和微型变压器中所遇到的那些最复杂、最重要的问题。但是，本书所论述的问题，却能用来解决许多重要的实际问题。可以预料，C. Б. 瓦修京斯基的著作，对在现代电力工程各领域中从事变压器设计和使用的许多工程师与科研人员肯定是有帮助的。

苏联科学院通信院士

Г. Н. 彼得罗夫

作者序

近二十年来,发表了大量有关变压器漏磁、线圈与结构件损耗、电动力以及有关变压器理论与计算等问题的论文。这是由于,随着电力系统的发展,变压器数量在增加,单台容量与额定电压在提高,因而也就出现了一系列需要解决的新课题。

在此二十年中,苏联的技术文献里几乎没有一部书能够系统地总结变压器理论与计算问题。三十年前Г.Н.彼得罗夫教授撰写的杰出著作《变压器学》(动力出版社,1934)已是图书之珍品了。

本书打算填补这个空白。笔者深知此项任务之艰巨,并不打算对变压器理论的所有问题都作详细论述。有些问题,例如漏磁、线圈损耗、变压器不对称运行等讨论较详,而其它一些问题,例如油箱壁与结构件损耗、变压器过电压等则叙述得较为简略。书末详细地列出了参考文献。

对讨论的所有问题几乎都推导到便于实用的形式。在数学分析中采用技术单位制。

本书第一章阐述变压器的励磁问题。研究了考虑涡流去磁作用时的铁心损耗,以及电压为非正弦波时的铁心损耗。还研究了电网参数不同时励磁电流谐波对相电压畸变的影响。变压器的噪声问题也占有相当的篇幅。

在第二章中研究多线圈变压器,包括它的等值电路、电压变化率、效率以及三线圈变压器的并联运行特性。

第三章研究自耦变压器。这一章除了分析单相自耦变压器的工作原理外，还详细地研究了不同接法（星形、三角形、开口三角形、延长三角形与双曲折形）的三相自耦变压器。比较了上述各种接法的优缺点。详细地研究了在自耦变压器和系统的中点处于各种状态时，线对地短路所引起的自耦变压器过电压问题。

第四章是最长的一章。本章阐述变压器的漏磁问题。本章由简至繁由粗至精循序渐进地论述了线圈电抗及漏磁场在线圈中所引起的损耗的计算方法。

第五章实质上是第四章的续篇。这一章阐述了复杂变压器回路电阻和电抗的计算方法，首次在本国文献中详细地介绍了功率法。此外，还介绍了平均几何距离法。

在第六章中详细地研究了三相变压器和自耦变压器的不对称运行。本章末尾叙述了用功率法计算正序、负序和零序阻抗的方法。

在第七章中研究变压器的过渡过程：变压器合闸、突发短路及过电压。

第八章阐述变压器的电动力问题。首先研究对应于突发短路电流幅值的稳态力的计算方法，然后研究动态过程，最后研究变压器机械强度的计算方法。

第九章分析变压器的热特性和热过程。讨论了油浸式变压器的现有冷却方式和新的冷却方式（蒸发冷却、应用制冷设备、应用超导现象）。分析了安装高度和油箱颜色对变压器温升的影响。研究了变压器发热的过渡过程和允许温升。

本书所阐述的变压器理论比电工专业大学生所学的电机学普通教程更深一些。本书可以作为电机专业的大学生在学学习变压器专业课时的参考书，也可以作为毕业设计的参考

书。

本书可供从事变压器生产、运行和试验的工程技术人员使用。

A. B. 安德罗诺夫工程师在审阅初稿上做了许多工作，Г. П. 纳加因科硕士和 A. Д. 克拉西里尼克夫工程师校订了初稿并提出许多珍贵意见，对此笔者表示衷心感谢。

对本书的各种希望与意见请函寄：列宁格勒，Д-41，Марсово поле，Д.1，动力出版社列宁格勒分社。

C. B. 瓦修京斯基

目 录

序言

作者序

绪论..... 1

第一章 变压器的励磁..... 6

1-1 概述 6

1-2 铁心结构 7

1-3 电工钢片及变压器铁损 15

1-4 考虑涡流去磁作用时铁心钢片的涡流损耗 17

1-5 外施电压为非正弦波时铁心钢片的损耗 21

1-6 由空载试验确定铁损和励磁电流 25

1-7 电流与电压的谐波 28

1-8 变压器的噪声 40

第二章 多线圈变压器 47

2-1 概述 47

2-2 三线圈变压器 50

2-3 三线圈变压器的电压变化率和效率 58

2-4 三线圈变压器同双线圈及三线圈变压器的并联
运行 62

2-5 线圈多于三个的变压器 70

第三章 自耦变压器 79

3-1 概述 79

3-2 单相自耦变压器 79

3-3 自耦变压器的优缺点 89

3-4 自耦变压器的计算 90

3-5 三相自耦变压器 94

3-6	星形连接的自耦变压器电流和电压的三次谐波	106
3-7	线路接地引起的自耦变压器过电压	109
3-8	中点接地时各种情况的对比	117
3-9	线圈接成星形的自耦变压器的调压	118
第四章	漏磁	123
4-1	概述	123
4-2	线圈高度相等磁势均布的同心式双线圈变压器 器的漏抗	125
4-3	多层线圈的漏抗	131
4-4	具有交错式线圈的变压器的漏抗	139
4-5	磁势分布不均匀的变压器线圈的漏抗	146
4-6	漏磁场引起的变压器损耗	155
4-7	双线圈变压器同心式线圈中的涡流损耗	159
4-8	多层线圈的涡流损耗	168
4-9	三线圈及多线圈变压器线圈的涡流损耗	173
4-10	漏磁场在交错式线圈中引起的损耗	181
4-11	变压器线圈由不完全换位引起的损耗 (环流损耗)	183
4-12	考虑到漏磁场的实际分布时变压器线圈涡流损 耗的确定	197
4-13	考虑涡流去磁作用时线圈漏感抗和导线损耗的确定	205
4-14	减小变压器中漏磁场引起的损耗的措施	225
第五章	变压器复杂线圈和变压器回路的有效 电阻和感抗计算	229
5-1	概述	229
5-2	多线圈变压器理论应用到复杂线圈的阻抗计算	230
5-3	功率法	234
5-4	平均几何距离法	265
5-5	位于不同心柱上的变压器线圈的漏电感	274
第六章	三相变压器和自耦变压器的不对称运行	278

6-1 概述	278
6-2 应用对称分量法研究变压器的不对称运行	280
6-3 没有零序分量的双线圈变压器的不对称运行	284
6-4 没有零序分量的某些不对称特例	286
6-5 没有零序分量的双线圈变压器不对称运行的 一般情况	289
6-6 线圈接成 Δ/Y 的变压器的不对称运行	291
6-7 线圈接成 Y/Y 的变压器的不对称运行	295
6-8 线圈接成 $Y/\text{分}$ (星形-中点引出的曲折形) 的变压 器的不对称运行	301
6-9 线圈接成 $Y/Y/\Delta$ 的三线圈变压器的不对称运行	309
6-10 变压器在一相断开时的运行	313
6-11 星形连接的自耦变压器的不对称运行	322
6-12 用功率法计算正序、负序和零序阻抗	333
第七章 过渡过程	349
7-1 概述	349
7-2 变压器空载合闸	349
7-3 三相突发短路	357
7-4 变压器的过电压	361
7-5 变压器的过电压保护	376
第八章 变压器的电动力	385
8-1 概述	385
8-2 变压器线圈上作用力的方向	386
8-3 双线圈变压器同心式线圈上作用力的计算	389
8-4 三线圈变压器的线圈上作用力的计算	396
8-5 交错式变压器线圈上作用力的确定	401
8-6 突发短路时的动态力	407
8-7 变压器机械强度计算	417
第九章 热特性和热过程	433

9-1	概述	433
9-2	变压器的散热形式	434
9-3	油浸式变压器的现有冷却方式	451
9-4	新冷却方式	455
9-5	油浸式变压器在稳定状态下的温升	466
9-6	变压器安装处的海拔高度和油箱颜色对其温升的 影响	473
9-7	负载周期性变化时变压器的发热	476
9-8	发热的过渡过程	478
9-9	在变动负载下变压器的温升及变压器的允许过负载	486
9-10	在短时间大电流冲击下变压器的发热	489
9-11	绝缘老化	491
参考文献		494

绪 论

可以毫不夸张地说，只有发明了变压器，交流系统才有可能广泛应用。正是由于有了变压器，才有可能以适合于发电机的电压而生产电力；以相应于最低损耗的电压传输电力；以适合于用电设备参数的电压使用电力。变压器不仅可以将电压变换到适合于电路各分支的电压水平，还可以将各分支连接到统一电网。

此外，变压器结构最简单，效率也高。变压器的有功损耗与无功损耗很小，几乎在任何情况下都可以认为变压器的一次容量与二次容量，不论是视在容量还是有功与无功容量，彼此相等

$$m_1 U_1 I_1 = m_2 U_2 I_2$$

$$m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 = m_2 U_2 I_2 \sin \varphi_2$$

式中 m_1 与 m_2 是一次和二次线圈的相数。通常 $m_1 = m_2$ ，但有时候也不相等，例如，三相变为六相的变压器。

变压器本身虽然相当简单，但它仍存在着一系列相当复杂的问题，这些问题引起许多从事电力系统运行与变压器制造人员的注意。下面列举其中几个较为常见的问题。首先就是变压器的损耗问题。电力系统中安装的变压器，容量为发电机容量的4~5倍，所以尽管变压器效率相当高(大容量变压器可达99.5%)，可是变压器的电能损耗仍然相当可观。下面的初步估算足以证明这点。假设变压器的安装容量是

2亿千伏安(约相当于苏联1955年的安装容量),若变压器的损耗为0.5%,一年中以最大容量运行4000小时,每一度电价格为1戈比,则一年中变压器电能损耗的价值即为4000万卢布。

在变压器制造的整个历史阶段,一直力图依靠采用更好的硅钢片来降低变压器的空载损耗。从1900到1910年开始采用含硅的电工钢片期间,以及从1935年开始采用冷轧硅钢片以来,这一损耗都有过大幅度的下降。下面数字可以说明硅钢片质量的进步。厚度为0.35毫米的现代优质牌号冷轧硅钢片,在磁密为1特斯拉时的单位损耗为0.45~0.5瓦/公斤,而四十年代末期生产的厚度为0.5毫米的热轧硅钢片,在相同的磁密下损耗保证值为1.65瓦/公斤,在1900年则大约为5瓦/公斤。

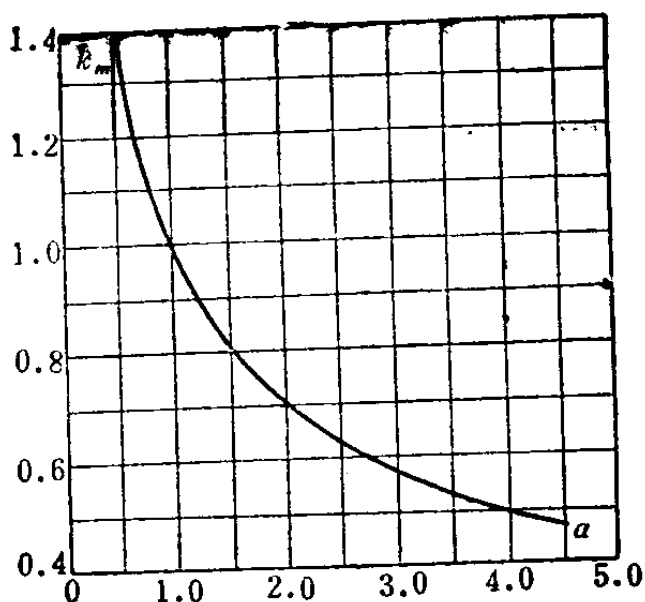
降低铁损与空载电流的愿望也反映在铁心结构上。近一个时期,用卷料硅钢片代替板材,大大减少了铁心片的接缝数;采用冷轧硅钢片时接缝做成斜的;心柱与铁轭各用绑带绑扎以代替螺杆夹紧;铁心与铁轭做成相同截面的;等等。所有这些措施都降低了变压器铁损和励磁电流。

在设计时,变压器的空载损耗与短路损耗之比,其实可以为任意数值,因为这一比值是由变压器中铜与硅钢片的用量比决定的。不过,以不同比值来制造变压器绝非没有区别。因为,只有在固定损耗与可变损耗相等的负载条件下,亦即在负载系数 $k_m = \sqrt{p_{OH}/p_{KH}}$ 时,变压器的效率才最高。这里 p_{OH} 是额定电压下的空载损耗, p_{KH} 是额定电流下的短路损耗。

图B-1是负载系数 k_m 与 $\alpha = p_{KH}/p_{OH}$ 的关系曲线。由此曲线可以看出,在设计变压器时,应选择与变压器预定的运行条

件相应的损耗比。例如，如果变压器将在高负载下运行，则以低的损耗比设计为宜，反之亦然。对于近代的电力变压器通常取 $\alpha=3\sim6$ 。

随着系统容量的增长，变压器单台容量日益增大。在一定限度内，变压器在几何尺寸上是相似的，也就是说，它的各种尺寸彼此成比例。对于这



图B-1 对应于最高效率的系数 k_m 与损耗比 α 的关系曲线

种几何上相似的变压器，当铁心磁通密度与线圈电流密度均相同时，表B-1列出的“增长规律”是正确的。

由表B-1可以看出：几何上相似的变压器，损耗与容量的 $3/4$ 次方成正比；每匝电势与额定容量的 $1/2$ 次方成正比；等等。

由于技术上与经济上的原因，变压器的单台容量越来越大。例如，不希望在电厂与电站里堆列一些容量不大的变压器，否则将使电厂与电站的操作线路复杂，建筑量增大，运行困难，等等。增大变压器容量还可以降低单位容量的有效材料用量，也可以改善变压器的某些运行特性，如效率提高，空载电流百分数减小等等。在单台容量增大的同时，变压器的额定电压也在增高，因为容量大的变压器，送电的距离一般也较远。随着额定电压的增高，又产生了一系列涉及线圈绝缘及其过电压保护的问题，从而又需要研制冲击强度高新型线圈，改善过电压保护特性等等。

表B-1 磁通密度 B 与电流密度 J 均相同时几何相似的变压器
尺寸与参数的增长规律

名 称	比 值
变压器线性尺寸	k
铁心柱有效截面 $S_{ct,a}$	k^2
每柱磁通 $\Phi = BS_{ct,a}$	k^2
线圈的每匝电势 $E_0 = 4.44fBS_{ct,a}$	k^2
线圈导线总截面 $S_0\delta = Sw$ (S —线匝截面, w —线圈匝数)	k^2
线圈磁势 $F_0\delta = Iw = JSw$	k^2
变压器额定容量 $S_H = mUI = mE_0wl$	k^4
有效材料重	k^3
变压器损耗(铜损加铁损)	k^3

在提高变压器容量的同时,必须采用更有效的冷却措施。将变压器器身简单地浸在充油的油箱中,对变压器的冷却来说,可以收到良好的效果,这是因为油自然冷却的散热系数为空气自然冷却的5.5~6倍。随着变压器容量的增长,损耗的增长速度比冷却表面增长得快。因而需要采用排管式或散热器式油箱并在线圈与铁心中设置油道来人为地增加冷却表面。当容量达到某一数值之后,还需要采用强迫油循环,并使油在专门的冷却器中,用水和空气来冷却。现有国产大型电力变压器基本上都采用心式铁心和同心式线圈(螺旋式、连续式或饼式)。由于在水平放置的线段当中,很难在其近旁建立油的强迫循环,因此,这种线圈线段本身的冷却是很困难的。这个问题可以用带有竖直油道的新式线圈来解决。

随着变压器容量及其尺寸的增长,漏磁场也跟着增强,与漏磁场相关的变压器线圈损耗、铁心外层硅钢片与变压器

其它金属结构件中的损耗也都增大。变压器设计不当时，由漏磁场而引起的损耗可能超过线圈的欧姆损耗。漏磁场引起的损耗不仅降低了效率，还会引起局部过热。这是变压器设计时必须考虑的问题。有时为了降低漏磁场引起的损耗，采用铜质或铝质的电磁屏蔽或者采用变压器硅钢片制成的磁分路。

变压器中的短路力是和漏磁场密切相关的。随着容量的增长，短路力已越来越成为危险性的问题。

容量的增长，电压的提高，结构的复杂化，引出了一系列新的理论问题。其中有一些已经解决，另一些还有待于将来去解决。

近些年来，在电力系统中已开始广泛采用自耦变压器。在自耦变压器中，线圈之间既有磁的联系也有电的联系。因此，在自耦变压器中，由线路接地而引起的过电压和带有冲击特性的过电压，都比一般变压器更为严重。在有载调压问题上也存在一些难题。在一般变压器中，有载调压装置往往连接在接地的中点上，这样，调压装置的电压等级可以比在线端调压时低。而在自耦变压器中，如果采用中点调压，则会带来所谓相关调压这个根本性的缺点。因此，采用自耦变压器，除了过电压问题之外，还得再考虑另一个相当复杂的问题，即有载调压问题。

在星形连接的自耦变压器中，必须采用一个三角形连接的第三线圈。带有这种线圈的自耦变压器的研究，也是一项相当复杂的课题。

第一章 变压器的励磁

1-1 概 述

变压器是由电能输入侧，即一次线圈侧励磁的。建立一次与二次线圈间互感磁通的电流称为励磁电流或磁化电流。在有铁磁性铁心的变压器中，该磁通在铁心中流通，叫做主磁通。

在空载状态下，由于空载漏磁小得可以忽略不计，所以一次线圈的全部电流均为励磁电流。因此，空载电流的磁势 $F_0 = I_0 w_1$ 全部都是励磁磁势。变压器负载时，一次电流只有一部分是励磁电流，另一部分是负载分量。双线圈变压器负载时的磁势方程为

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_M$$

或者

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_M w_1$$

式中 $\dot{I}_M w_1$ ——建立主磁通的合成磁势。

主磁通与两个线圈都完全交链并在变压器铁心中流通。符号上方的点表示它是复数量。磁势方程可以改写为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_M - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_M + \dot{I}_{1HF}$$

式中 $\dot{I}_{1HF}$ ——一次电流的负载分量；

$\dot{I}_M$ ——变压器的励磁电流或磁化电流。

如果在空载和负载时，在一次线圈端所施加的电压是相

等的，则空载电流和负载时的励磁电流二者在大小、相位与波形上相差很小。这点可由变压器一次线圈的电势方程中看出

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

式中 $\dot{U}_1$ ——外施电压；

$\dot{E}_1$ ——由主磁通产生的电势；

$\dot{I}_1 Z_1$ ——一次线圈的阻抗压降。

上式最后一项在空载时极小，而在额定负载时等于 $(1\sim 2)\% E_1$ 。所以，电势 E_1 和铁心中的磁通值在空载与负载时相差亦很小。由变压器空载试验所测得的铁损和其它励磁特性也同样与负载时相差极小。

变压器的励磁特性主要取决于铁心结构、钢片牌号和磁通密度。线圈结构与连接方式在这方面所起的作用还是次要的。

在变压器励磁过程中，有意义的主要是励磁电流和铁损。变压器的励磁电压与电流的谐波也有很大意义，在一定的条件下，谐波可能引起相电压波形畸变，加重接在电力系统中的电容器的负载，对通讯线路与控制系统产生干扰。

1-2 铁 心 结 构

与变压器的两种型式相对应，铁心也有两种结构型式：心式与壳式（图1-1）。心式结构：心柱通常是竖直放置的，心柱截面为内接于圆的多边形。壳式结构：心柱通常是水平放置的，心柱截面是边长之比为1:2或1:3的矩形。

图1-2表示心式和壳式三相变压器铁心示意图。铁心上的虚线表示当A相心柱的磁通达到最大值 Φ_m 时主磁通流经的路径。