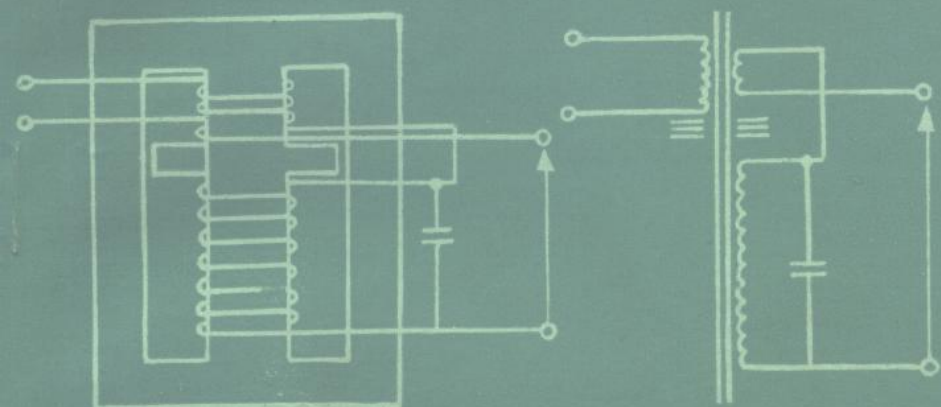




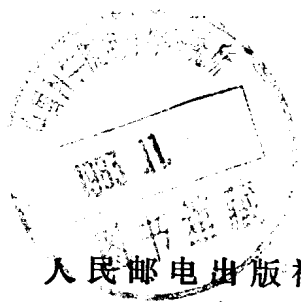
稳压变压器

张广明 张汝海 编著

75.12.68
516

稳 压 变 压 器

张广明 张汝海 编著



人民邮电出版社

1110947

内 容 提 要

稳压变压器（又称恒压变压器）是一种新型器件，它具有交流稳压、抗干扰、电压变换、过功率保护等多种功能。特别适用于电网电压波动严重的场合，已在计算机、机床控制、照明、矿山、交通、电信、电视等电子设备的电源中逐步推广使用。

本书主要介绍稳压变压器的工作原理、设计、调整和使用方法，资料比较齐全，具有一定的实用价值。

本书可供从事电子和通信工作的科学技术人员及广大无线电爱好者参考。

稳 压 变 压 器

张广明 张汝海 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1983年5月 第一版
印张：6 4/32 页数：98 1983年5月河北第一次印刷
字数：139 千字 印数：1—25,000 册

统一书号：15045·总2725—有5299

定价：0.62 元

前 言

稳压变压器是一种新型的特殊变压器，它利用带空气隙的磁分路和输出并联谐振电容，使次级铁心工作在磁饱和状态，从而起到稳定输出交流电压的作用。它电压稳定度高，稳压范围宽，抗干扰性能强，且有过功率保护作用。本书主要介绍有关稳压变压器的工作原理、设计、调整和使用方法，可供有关的科学技术工作者及广大无线电爱好者参考。

本书承中国科学院计算技术研究所李道恺同志、天津市科协刘恩玺同志审阅，提出了不少宝贵意见，在此表示感谢。

由于水平有限，错误在所难免，望广大读者批评指正。

作者 1982年7月

目 录

第一章	概述	(1)
1—1	电子设备对供电系统的要求.....	(1)
1—2	稳压变压器与普通变压器的比较.....	(4)
1—3	稳压变压器的特点和用途.....	(11)
第二章	铁磁器件的非线性特性及应用	(16)
2—1	铁心线圈的饱和磁化特性.....	(16)
2—2	饱和电抗器的阻抗性质及其等效电路形式.....	(19)
2—3	带空气隙的铁心线圈与电容器的串联及串联 铁磁谐振.....	(25)
2—4	饱和电抗器与电容并联及其工作状态.....	(30)
2—5	铁磁谐振稳压器.....	(34)
第三章	稳压变压器工作原理	(43)
3—1	稳压变压器的等效磁路和等效电路.....	(43)
3—2	稳压变压器铁心中磁通分布情况及启动过程 的分析.....	(47)
3—3	稳压变压器的特性分析.....	(53)
3—4	稳压变压器输出波形.....	(66)
3—5	稳压变压器的频率特性及其抗干扰能力.....	(69)
第四章	稳压变压器的设计	(78)
4—1	普通中小功率变压器设计方法.....	(78)
4—2	稳压变压器设计中的几个问题.....	(81)
4—3	插片式铁心稳压变压器设计.....	(88)

4—4	C型铁心稳压变压器设计·····	(102)
4—5	正弦波输出的稳压变压器·····	(107)
4—6	稳压变压器设计和组装工艺的一些其它 问题·····	(112)
第五章	稳压变压器的调整和应用 ·····	(120)
5—1	稳压变压器的调整·····	(120)
5—2	作为交流稳压器使用的稳压变压器·····	(126)
5—3	组成直流供电系统的稳压变压器·····	(132)
第六章	可控稳压变压器 ·····	(151)
6—1	可控稳压变压器的工作原理·····	(152)
6—2	可控铁磁谐振稳压器·····	(157)
6—3	可控稳压变压器·····	(164)
6—4	高频可控稳压变压器·····	(179)

第一章 概 述

稳压变压器（又称恒压变压器）不仅具有交流稳压、抗干扰、电压变换、过功率保护等多种功能，而且结构简单，经济可靠，研制和生产周期短，便于维护使用，自从它问世以来，立即受到各方面的重视，在计算机、机床控制、照明、矿山、交通、电信、电视等电子设备的电源中已逐步得到推广应用。

为了便于广大读者对稳压变压器的工作原理、结构特点、设计方法有所了解，本章将简单介绍稳压变压器与普通变压器的区别，在此基础上提出稳压变压器的特点，这对进一步深入了解稳压变压器是有好处的。

1-1 电子设备对供电系统的要求

绝大部分电子设备的电源通常都由电网供电（一般称为工频电源，在我国是50Hz，单相220伏，三相380伏）。电网电压的幅值和频率都可能发生变化，这是造成各种用电设备工作不稳定的普遍原因。

电压幅值的变化有以下三种原因：

第一种情况：由于被供电负荷随时间集中性的增加或减少，造成电网电压出现长时间的降低或升高。例如白天用电集中，电网电压偏低，而夜间负荷轻，电网电压偏高。在严重的情况下，电网电压波动的幅度往往超过额定值的20%，致使某些电子设备不能正常工作。

第二种情况：由于某些大功率用电设备的启停，造成电网电压出现瞬间的幅度较大的波动，这是因为这些设备启动或停止时，不仅负荷量变动幅度远远超过额定值，而且负荷性质又表现为容性或感性。启停负荷对电网电压影响的时间短，但是造成电压波动的幅度有时比第一种情况大得多。

第三种情况：某些用电设备的启停，或者由于它们工作状态的特殊性，例如负荷量随时间呈周期性或者非周期性的脉冲状态，从而造成电网电压上产生高频噪音干扰，即所谓“毛刺”，这种干扰幅值有高有低，但变化频率很高，对用电设备的正常运行破坏性强，而且不易查找和预防。

如果电网电压波动幅度较大时，可以在用电设备的输入端设置交流稳压器，诸如伺服型交流稳压器（又称为交流自动调压器）、磁饱和交流稳压器、电子交流稳压器、可控硅交流稳压器等设备。对于电网中存在的噪音干扰，则需要在用电设备的输入端设置抗干扰装置，例如电源低通滤波器。一般说来，要求该装置具有双向抗干扰能力，即它不仅能阻止电网中的干扰电压传到用电设备中去，同时，又能阻止用电设备产生的干扰电压传到电网中去。

总之，一个性能完善的供电系统，就其功能来看，大多包括以下几个部分：

（1）交流稳压器：当输入交流电压变化时，稳定输出交流电压。

（2）电源低通滤波器：对电网中存在的，或者负载端产生的干扰电压起抗干扰的作用。顾名思义，它应对电网频率的电压呈现低阻抗，而对非电网频率的谐波电压呈现高阻抗。

（3）功率变压器：将电网电压变换成用电设备所需要的各种数值的交流电压。

作为直流供电系统，还应包括：

(4) 整流滤波电路：把交流电压转换成平滑的直流电压。

(5) 直流稳压电路：把不稳定的直流电压变成稳定可调的直流电压。

这样的供电系统框图如图1.1所示。其中交流稳压器、低通滤波器、功率变压器均属于交流设备，在系统中实现稳压的办法各有不同，在直流稳压电路稳定范围很宽的情况下，可减轻系统对交流稳压器的要求，但这必然会加重直流稳压电路的负担，即需要扩大其稳压范围，并附设相应的抗干扰电路。这不仅增大了直流稳压电路的体积，还会降低供电效率和可靠性，从经济观点考虑也是不合算的。

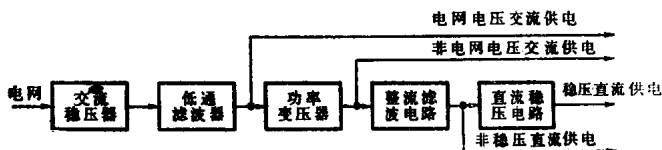


图 1.1 一般的供电系统

目前，在一般小型电子设备中，或在大、中型电子设备的某些需要脱机维护和使用的部件中，大都采用了静止电子交流稳压器和电源低通滤波器，而功率变压器则往往与整流滤波电路以及直流稳压电路一起构成直流稳压电源。

但是，由于目前所能提供的静止电子交流稳压器的稳定范围不够宽，允许的连续运行时间短，而电源低通滤波器在低频段（例如几千赫），其抗干扰能力会明显地降低。因而，这样的供电系统在电网电压波动大，电网干扰严重，需要长期连续运行而又不便维护的场合使用时，就不那么胜任了。稳压变压器的问世，经过一定时间的实践证明，它为这方面问题提

供了有效的措施。

1-2 稳压变压器与普通变压器的比较

稳压变压器的结构形式、制造工艺、使用的材料、能量转换方式等，都与普通变压器有很多相似之处，只是由于它的工作状态的变化，使得它不仅保持了普通变压器的功能，同时又具备交流稳压、抗干扰、过功率保护等新的性能。下面我们首先用与普通变压器相比较的方法，对稳压变压器作些介绍，读者可根据稳压变压器的特殊性，对它建立一个初步的定性的认识。

1-2-1 普通变压器

在电子设备的电源中，经常使用普通功率变压器，其工作原理和设计方法是人们熟知的，这里仅就其与稳压变压器有区别的几点再提示一下，对于掌握稳压变压器会有所帮助。

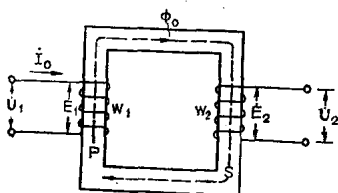


图 1.2 普通变压器工作原理示意图

图 1.2 是普通变压器工作原理示意图，铁心是由硅

钢片叠成，初级侧铁心 P 上绕有初级输入线圈 W_1 ，次级侧铁心 S 上绕有次级输出线圈 W_2 ，由于初级侧和次级侧铁心截面相同，所以，实际上 W_1 和 W_2 是绕在同一铁心上的（在实际的变压器中，两个线圈往往是叠在一起的，这样可以把变压器漏磁通减小到最低程度），它们之间只有磁的耦合。

1. 变压器的空载运行——电压平衡方程

假定普通变压器工作在空载状态下。当初级线圈外施一交流输入电压 u_1 时，励磁电流 I_0 就立即出现在线圈 W_1 中，此电流称为变压器的空载电流，或者励磁电流。它在铁心中产生的磁通 ϕ_0 绝大部分经过铁心闭合起来， ϕ_0 称为变压器空载时的主磁通。如果外施电压为一周期性的正弦波，可表示为 $\phi_0 = \phi_m \sin \omega t$ 。这里 ϕ_m 为主磁通幅值， ω 为角频率。主磁通在初级和次级线圈中的感应电势由公式 $e = -W \frac{d\phi_0}{dt}$ 表示。如果 E_1 和 E_2 分别为初级线圈和次级线圈中的感应电势的有效值，在忽略变压器漏磁通的情况下，得：

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4.44fW_1\phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏} \\ E_2 &= 4.44fW_2\phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中， f 为外施电压频率，将两式相除，得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = n \quad (1-2)$$

通常定义 $n = \frac{W_1}{W_2}$ 为变压器的匝比。也就是说，初级线圈和次级线圈中感应电势之比等于变压器匝比。

值得注意的是，感应电势 E_1 和 E_2 分别与外施电压 u_1 和输出电压 u_2 处于平衡状态，即在忽略线圈导线压降的情况下，可写成

$$\left. \begin{aligned} -\dot{E}_1 &= \dot{U}_1 \\ \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

这就是变压器空载状态下的电压平衡方程，于是(1-2)式可改写成

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = n \quad (1-4)$$

2. 变压器的负载运行——磁动势平衡方程

当变压器次级绕组存在负载电流 $\dot{I}_2$ 时, 变压器工作情况就发生了变化。 $\dot{I}_2$ 在铁心中产生副磁通 $\dot{\phi}_2$, 它使铁心中的合成磁通发生相应的变化。根据电磁感应定律, 铁心中磁通的变化, 必然导致感应电势 $\dot{E}_1$ 发生变化, 因而初级线圈的电压平衡关系被破坏, 这又导致输入电流增加。以上过程几乎是同时发生的。因为外施电压 $\dot{U}_1$ 并没有变化, 在线圈导线电阻和铁心漏磁阻抗可以忽略不计的情况下, 公式(1—3)的电压平衡方程仍然成立, 也就是说, 变压器的主磁通在空载和有载情况下几乎不变, 也就是变压器铁心中初级磁通 $\dot{\phi}_1$ 和次级磁通 $\dot{\phi}_2$ 的合成磁通仍等于空载时的主磁通 $\dot{\phi}_0$, 如图1.3所示。

磁通是由磁动势 WI 形成的, 主磁通几乎保持不变, 磁动势也几乎保持不变, 即

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1$$

或者
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2$$

考虑到变压器有负载时, 励磁电流 I_0 只占初级线圈电流 I_1 的百分之几, 当 I_0 可以忽略不计时, 上式可近似写成:

$$\dot{I}_1 = -\frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2$$

也就是说变压器输入电流和输出电流在数值上的关系是:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{n} \quad (1-5)$$

这是变压器负载工作时的一般规律, 不论负荷如何变化, 上式总是成立的。

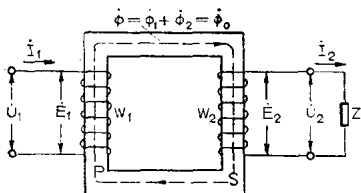


图 1.3 普通变压器负载运行

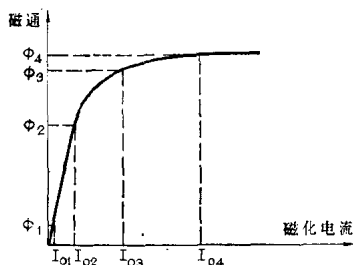


图 1.4 普通变压器铁心磁化状态

3. 普通变压器中铁心磁化状态

普通变压器规定运用在铁心平均磁化曲线弯曲处的左面部分，如图1.4所示。在这段里，输入电压由 u_1 变到 u_2 时，磁化电流由 I_{01} 变到 I_{02} ，由此电流产生的磁通由 ϕ_1 变到 ϕ_2 ，输出电压按初级和次级匝比关系随输入电压作相应的变化。

众所周知，变压器铁心是不应该用在磁化曲线饱和段的。因为通常变压器铁心的磁化曲线都是非线性的，当由于设计不合理，或者变压器输入电压过高而使铁心饱和时，铁心的导磁率 μ 值就大大降低，整个变压器呈现低阻状态，此时微小的输入电压变化都可能造成磁化电流的大幅度变化，以致将变压器烧毁。但是，如果在变压器的输入电路中串有线性阻抗器件，由它来限制磁化电流的增长，一旦变压器进入饱和状态时，过高的输入电压将主要降在串联线性阻抗上，而变压器输出电压的变化很小，从而达到稳定输出电压的目的。由图1.4可以看出，当输入电压升高到使铁心工作在磁化曲线的饱和段，即磁化工作点达到曲线弯曲处的右面的时候，输入电压由 u_3 变到 u_4 ，相应的由串联线性阻抗限制的磁化电流由 I_{03} 变到 I_{04} ，而铁心中的磁通值仅变化 $(\phi_4 - \phi_3)$ ，这就使得输出电压变化很

小。

1-2-2 稳压变压器

图1.5是稳压变压器外型、结构和电路示意图。从外观上看，稳压变压器仍然是个单铁心结构，与普通变压器的区别仅在于：稳压变压器的初级线圈和次级线圈之间被一个带空气隙的磁分路分开，另外在输出线圈上并联了一个谐振电容。谐振电容线圈也可以与次级输出线圈分开设置，以使用增高谐振电压的方法来减少所需要的电容量。特别是稳压变压器是低压多组输出的情况下，将谐振电容线圈分开的必要性就更大了。

有关稳压变压器的工作原理和设计方法，将在第二、三、四章中作专门论述，这里仅就它与普通变压器的区别定性地讨

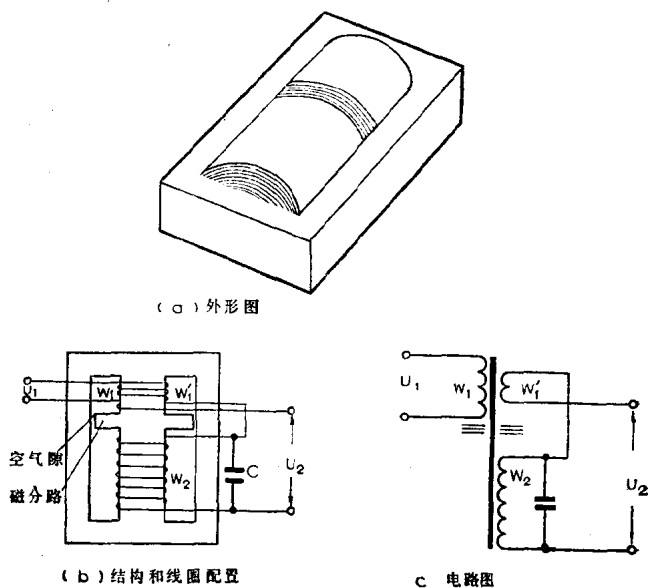


图 1.5 稳压变压器

论一下。

1. 稳压变压器次级侧铁心工作于饱和磁化状态

由于稳压变压器增加了磁分路和输出并联谐振电容，就使得它的工作状态产生了根本性的变化。带有空气隙的磁分路可以使变压器初级的部分磁通不与次级线圈耦合而直接回到初级，反之，也可以使变压器次级的部分磁通不与初级线圈耦合而直接回到次级。磁分路与并联谐振电容的联合作用，可以使变压器次级侧（也仅仅是次级侧）铁心进入饱和状态，而初级侧铁心则与普通变压器一样，应用在铁心磁化曲线的线性段。可以说，稳压变压器的初级相当于普通功率变压器，即使次级进入饱和状态时，初级侧铁心的工作点仍不能超过磁化曲线的拐点。

正是由于稳压变压器次级侧铁心工作在饱和状态，次级侧铁心在每半周中的磁通变化量几乎是恒定值，这是它所以能够稳压的根本原因。

磁分路相当于变压器的漏磁电感，它把输出并联谐振电路与输入电路分开，对稳压变压器的稳压过程起着关键性作用。同时，当稳压变压器输出过载或者短路时，它起到限流的作用。

2. 稳压变压器输入电压与输出电压的数值比不遵循匝比关系

由于稳压变压器初级与次级的工作状态不同，因而在计算感应电压时，公式（1—1）中，初级与次级所用的 ϕ_m 值也就不同，对于初级感应电压 E_1 ，公式中的 ϕ_m 值指的是初级侧铁心实际工作的磁通值，而对于次级感应电压 E_2 ，公式中的 ϕ_m 值

则指的是次级铁心中的最大磁通值 ϕ_1 ，它对应于铁心的最大磁感应强度 B_s 。因此，尽管变压器的电压平衡方程式(1—3)仍然成立，而公式(1—4)却不成立了。

如果稳压变压器初级侧铁心最大工作磁通密度为 B_{m1} ，次级侧铁心最大工作磁通密度为铁心饱和磁通密度 B_s ，且认为初级侧铁心和次级侧铁心截面相等，鉴于 $\phi = BA_m$ ， A_m 为主磁通铁心截面，则公式(1—1)可改写成：

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4.44fW_1A_mB_{m1} \times 10^{-8} \text{ 伏} \\ E_2 &= 4.44fW_2A_mB_s \times 10^{-8} \text{ 伏} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)'$$

相应地公式(1—2)和公式(1—4)可改写成：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \cdot \frac{B_{m1}}{B_s} = n \cdot \frac{B_{m1}}{B_s} \quad (1-2)'$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = n \cdot \frac{B_{m1}}{B_s} \quad (1-4)'$$

这个结论是很重要的，它说明稳压变压器输入电压与输出电压的数值比不遵循匝比关系。输出电压因次级侧铁心进入饱和工作状态而成为一个常数。在初级侧铁心中，磁通 B_{m1} 是随输入电压变化而变化的，因而输入电压与输出电压之比即公式(1—4)'也就不再是一个常数，随着输入电压的变化，此比值也作相应的变化。

3. 稳压变压器初级和次级磁动势之间的关系不平衡

由于稳压变压器中初级侧和次级侧铁心中的磁通值不相等，所以初级线圈与次级线圈的磁动势之间的关系也就不平衡了。即变压器的磁动势平衡关系受到破坏，这种现象是由于磁分路的存在和次级侧铁心的非线性工作状态造成的。新的磁动势关系是比较复杂的，难以用简单的数学公式表达出来，第三

章中将对稳压变压器输入输出电压作进一步的分析。

1-3 稳压变压器的特点和用途

稳压变压器的优点可概括为以下几点：

1. 结构简单，可靠性高

它与普通变压器一样，由一个铁心结构组成，其体积相当于同功率的普通变压器体积的 $\frac{3}{2}$ 。但是，与一个包括交流稳压器、抗干扰设备、变压器等组成的交流供电系统比较，稳压变压器不仅具备这些功能，而且可使系统简化、经济、总的体积较小、可靠性较高。由稳压变压器组成的供电系统如图 1.6 所示。与图 1.1 所示供电系统相比，显然，由稳压变压器构成的

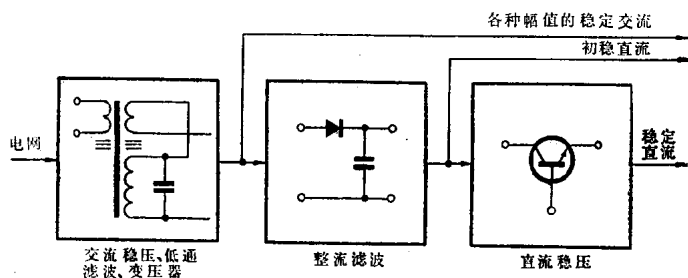


图 1.6 由稳压变压器组成的供电系统

供电系统要简单得多。

2. 电压稳定度高，稳定范围宽

在额定负载的情况下，当输入电压在额定值的 $\pm 20\%$ 范围内变化时，输出电压稳定精度可限制在 $\pm 1\%$ 范围内。特别值