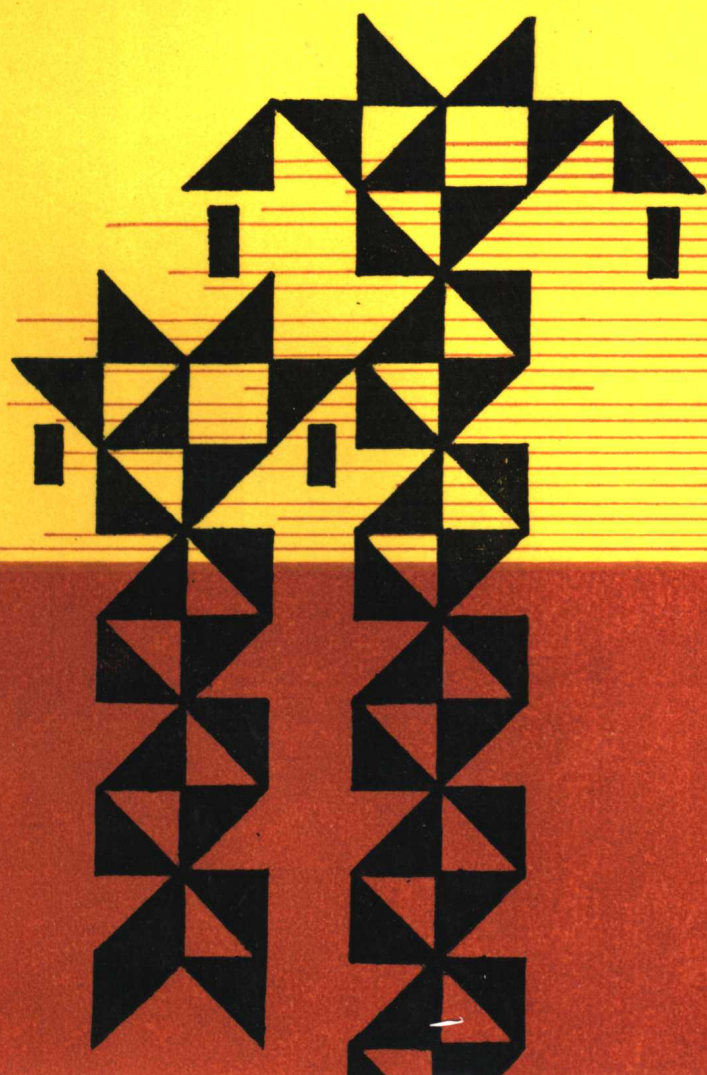


DIAN JI JI QI YUN XING YU JIAN XIU

电机及其运行与检修

(第二册)

保定电力学校 罗慰擎 主编
成都水力发电学校 谈代秀 主审



中国水利水电出版社

电机及其运行与检修

第 二 册

保定电力学校 罗慰擎 主编
成都水力发电学校 谈代秀 主审

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书包括三部分,分为三册。第一册为基础部分,讲述变压器、同步电机、异步电机、直流电机的基本结构、工作原理、工作特性和基本实验方法;第二册为运行部分,讲述变压器、同步电机、异步电机、直流电机的正常运行和非正常运行分析方法,以及运行状态的监视、调整、维护和事故处理方法;第三册为检修部分,讲述变压器、同步电机、异步电机的常见故障、检查处理方法、检修工艺和预防性试验。

本书为电力工业学校发电厂及变电站电气运行与检修专业、发电厂及电力系统运行专业、发电厂及变电站电气设备安装与检修专业以及其他电气类专业的教材。也可作电力中专、技校及各类培训班相关专业的教材,还可供电气工程技术人員参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及其运行与检修 第二册/罗慰擎主编. —北京:中国水利水电出版社, 1997

ISBN 7-80124-574-1

I. 电… II. 罗… III. ①电机-运行②电机-检修 IV. TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 22472 号

书 名	电机及其运行与检修 (第二册)
作 者	保定电力学校 罗慰擎 主编
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京金剑照排厂
印 刷	北京市地矿局印刷厂印刷
规 格	787×1092 毫米 16 开本 5.75 印张 129 千字
版 次	1998 年 1 月第一版 1998 年 4 月北京第一次印刷
印 数	0001- 7000 册
定 价	10.00 元

出 版 说 明

南方职业技术教育学会与中国水利水电出版社联合,在全国电力职业技术教育界选聘、组织了一批专家,依据最新审定的电力工业学校教学计划和教学大纲,编审了一套职业技术教材,包括:《电工工艺》、《电器检修与试验》、《发变电站一次系统》、《高压电气绝缘及测试》、《电工测量技术》、《电机及其运行与检修》(第一册,基础部分)、《电机及其运行与检修》(第二册,运行部分)、《电机及其运行与检修》(第三册,检修部分)等,并出版发行。

这套教材针对职业技术学校(含电力工业学校、中专、技校)培养操作型、应用型技术人才的要求和电气类专业特点,突破传统职教教材模式,采用模块组合结构,融讲授、实验、实习内容于一体;结合实际,深入浅出,语言简炼,通俗易懂,便于读者自学和操作训练;同时,编审者着意在教材中融入了当今国内、外有关的先进技术,以利于教育面向现代化。

这套教材可供电力工业学校、中专、技校电气类专业使用,也可供其他职业技术学校电气类专业选用,还可作为电气类专业检修、运行、试验岗位在职职工的培训用书,并供从事电气类专业的技术人员和教学人员参考。

在这套教材的编审过程中,得到电力部职业技术教育研究中心教材建设研究室,有关省、市电力局以及编审者所在单位的积极支持,在此表示衷心的感谢!

读者对这套教材有何意见和要求,请与“邮编 661000,云南开远市南方职业技术教育学会”函件联系。

中国水利水电出版社
南方职业技术教育学会

1997年6月

前 言

本书编写的依据是电力工业学校电气类专业教学计划和教学大纲。电力工业学校是在深化电力中专、技校改革过程中创建的具有电力工业特色的，融合电力中专、技校特长的新型电力职业技术学校。创建电力工业学校是涉及教育结构、教学模式、教学内容、教学方法诸方面的综合性改革。科学地建立新的教学体系尤其是课程体系，是显示电力工业学校优越性的重要举措。本书正是为适应这种需要而编写的。

为了适应多个专业、多种年制的需要，使教学内容得以合理配置和衔接，并便于调整专业方向，本书采用了模块结构。全书包括三个部分，分三册出版。第一册为基础部分，第二册为运行部分，第三册为检修部分。主要适用于发电厂及变电站电气运行与检修专业、发电厂及电力系统运行专业、发电厂及变电站电气设备安装与检修专业以及其他电气类专业。各专业或同一专业的不同年制，可根据实际需要可对模块进行叠加组合或对内容作适当取舍。此外还可供电力中专、技校以及各类培训班的相关专业选用。

根据电力工业学校课程体系改革的原则，本书贯穿了以“能力本位”为主导的构建思路，以职业岗位对能力结构的要求作为界定内容的依据。在内容配置上，注意严加精选，删繁就简，知识量以满足职业综合能力的需要为度，简化了某些论证和推导；在知识结构上，注重阐明物理概念、基本原理、基本定律和应用方法，以培养学生分析、解决实际问题的能力；在叙述方法上，不仅注意知识点之间的接口，而且更注意理论同实践的结合，便于在教学过程中贯穿能力培养这一主线，采用以实训为轴心的把讲授、实验、实习融于一体的教学方式。

全书由保定电力学校罗慰擎高级讲师主编并编写第一册全部和第二册的同步电机运行篇，哈尔滨电力学校王佳钦高级讲师编写第二册的变压器运行篇、异步电机运行篇及直流电机运行篇，保定电力学校刘景峰高级讲师编写第三册全部；全书由成都水力发电学校谈代秀教授级高级讲师主审，其中大连电力工业学校刘洪汉高级讲师审阅第一册，云南省滇南发电总厂甘志文高级工程师审阅第二册、第三册；由云南电力技术学校王川波高级讲师负责编审、出版的具体策划。

在编审过程中，得到电力部职业技术教育研究中心、全国电气类专业教学研究会、南方职业技术教育学会以及主编、参编、主审、参审所在单位和其他有关单位的大力支持和帮助，在此谨致谢意。

采取这种教材结构形式，是课程和教材改革的初次尝试，不妥之处，恳望读者提出宝贵意见。

编 者

1997年1月

目 录

出版说明

前 言

第一篇 变压器的运行

第一章 变压器的正常运行	1
第一节 变压器的并联运行条件	1
第二节 变压器不满足并联条件时的运行分析	2
第三节 变压器空载投入时的励磁涌流	6
第四节 变压器的温升和绝缘寿命	8
第五节 变压器运行中的监视与维护	9
小结	10
习题	11
第二章 变压器的异常运行	12
第一节 变压器的不对称运行	12
第二节 变压器的突然短路	16
第三节 变压器的过负荷运行	19
第四节 变压器的事故处理	20
小结	21
习题	22

第二篇 同步电机的运行

第三章 同步发电机的正常运行及其功率调节	23
第一节 同步发电机并联运行的条件和方法	23
第二节 同步发电机的功角特性	27
第三节 同步发电机有功功率的调节和静态稳定	29
第四节 同步发电机无功功率的调节和 V 形曲线	31
第五节 同步发电机的操作及运行维护	35
小结	40
习题	41
第四章 同步电机的其他运行状态及异常运行	42
第一节 同步发电机的调相运行和调相机	42
第二节 同步发电机不对称运行	44
第三节 同步发电机的突然短路	46

第四节	同步发电机的失磁运行	55
第五节	同步发电机的振荡	57
第六节	同步发电机在电压、频率变动时的运行	58
第七节	同步发电机的事故处理	60
小结		62
习题		63

第三篇 异步电动机的运行

第五章	异步电动机的起动和调速	64
第一节	笼型异步电动机的起动	64
第二节	绕线型异步电动机的起动	67
第三节	深槽型和双笼型异步电动机	68
第四节	异步电动机的调速	69
第五节	电磁调速异步电动机	70
第六节	异步电动机的反转与制动	71
小结		72
习题		72
第六章	异步电动机的异常运行	74
第一节	异步电动机在频率变动下的运行	74
第二节	异步电动机在电压变动下的运行	74
第三节	异步电动机的不对称运行	75
第四节	异步电动机的使用与维护	78
小结		79
习题		79

第四篇 直流电机的运行

第七章	直流发电机的运行	80
第一节	直流发电机的基本方程式	80
第二节	直流发电机的运行特性	81
第三节	直流发电机的运行维护及事故处理	84
小结		85
习题		85

第一篇 变压器的运行

本书基础部分已着重讨论了变压器的结构、原理、参数及特性；还建立了能反映变压器基本电磁关系的基本方程、等值电路及相量图。在此基础上，本篇将针对电力系统中变压器的正常运行及非正常运行这两方面的有关问题，进行深入的分析。

第一章 变压器的正常运行

本章主要介绍变压器的并联运行，空载投入时的励磁涌流现象，温升与绝缘寿命及正常运行中的监视与维护等问题。

第一节 变压器的并联运行条件

在现代的发电厂和变电站中，几乎都采用若干台变压器并联运行的方式，这无论从技术还是经济的合理性来看都是必要的。

所谓变压器的并联运行，是指各变压器的原绕组都接在某一电压等级的公共母线上，而各变压器的副绕组也都接在另一电压等级的公共母线上，共同向负载供电的运行方式，如图 1-1 所示。变压器并联运行有以下优点：

(1) 多台变压器并联运行时，如果其中一台变压器发生故障或需要检修，那么另几台变压器可分担它的负载继续供电，从而提高了供电的可靠性。

(2) 可以根据电力系统中负载的变化，调整投入并联的变压器台数，以减少电能损耗，提高运行效率。

(3) 可以根据用电量的增加，分期分批安装新变压器，以减少初期投资。

目前电力系统容量不断增大，相应地需要大功率的巨型变电站。从现代变压器的制造水平和单台容量来看，采用多台变压器并联运行也是必须的。当然，并联变压器的台

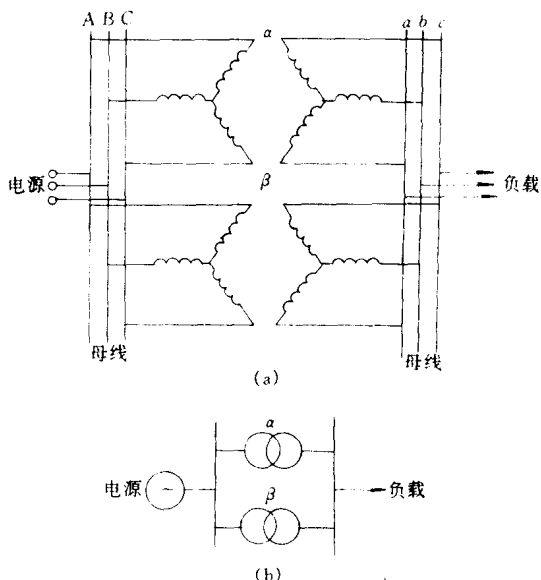


图 1-1 变压器的并联运行
(a) 三相接线图；(b) 单线图

数过多也不尽相宜，因为一台大容量的变压器的造价要比合成同一容量的几台小变压器的造价低些，占地面积也小些。

对于变压器的并联运行状态有一定的要求，最理想的并联运行情况是：

(1) 空载时各台变压器中只有原边的空载电流；由各变压器副边绕组通过母线组成的回路中以及原边回路中没有环流。

(2) 负载时各变压器所分担的负载量，应该按各自额定容量的大小成比例分配，防止其中某台过载或欠载。

(3) 负载时各变压器所分担的电流，应该与总的负载电流同相位。这样，当总的负载电流一定时各变压器所分担的电流最小；如果各变压器所分担的电流一定时，则总的负载电流最大。

要达到上述理想的并联状态，并联运行的变压器必须具备以下三个条件：

(1) 各变压器的原边额定电压要相等，各副边额定电压也要相等，即变比要相等。

(2) 各变压器副边线电势对原边线电势的相位差应相同，即连接组要相同。

(3) 各变压器的阻抗电压标么值应相等，短路阻抗角应相等。

第二节 变压器不满足并联条件时的运行分析

变压器的并联运行需要满足三个并联条件，这样才能达到并联运行的理想状态。下面分析不符合某一并联条件时的不良后果。

一、变比不相等时的并联运行

为简化起见，现以两台单相变压器并联运行来说明。设这两台变压器变比不等，且 $k_1 < k_2$ ，如图 1-2 所示。

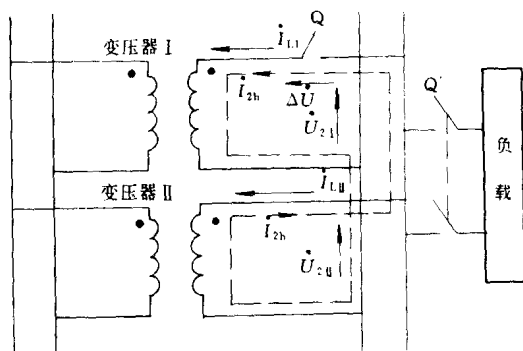


图 1-2 变比不相等时的并联运行

先分析空载时的情况。将负载开关 Q 和副边回路开关 Q 断开，两台变压器的原边施加同一电压 U_1 ，由于 $k_1 < k_2$ ，致使两台变压器的副边电压（亦即副边感应电势）不相等，且 $U_{21} > U_{22}$ ，于是副边回路中出现了差额电压 ΔU 。

合上副边回路开关 Q ，使两台变压器处于并联运行的空载状态。此时，作用在副边回路的差额电压，就在副边回路中产生环流 I_{2h} ；据磁势平衡原理，原边回路中也会产生相应的环流 I_{1h} ，如图 1-2 中的虚线所示。

副边环流的计算，可参照图 1-3，这是两台变比不等的变压器并联运行时的简化电路图，图中的各物理量均已折算到副边，可见副边环流的大小为

$$I_{2h} = \frac{\frac{U_1}{k_1} - \frac{U_1}{k_2}}{Z_{k1} + Z_{k2}} \quad (1-1)$$

式中 Z_{kI} 、 Z_{kII} ——变压器 I、II 折算到副边的短路阻抗。

再分析负载时的情况。负载时环流仍然存在，每一台变压器的实际电流 I_1 和 I_2 ，由环流 I_h 和负载分量 I_{1L} 、 I_{2L} 两部分组成。

变压器带负载并联运行时，利用图 1-3 可列出方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{k_1} &= U_2 + I_1 Z_{kI} \\ \frac{U_1}{k_1} &= U_2 + I_2 Z_{kII} \\ I &= I_1 + I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

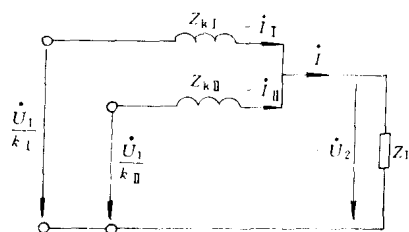


图 1-3 变比不等的两台变压器并联时的简化电路图

解这个联立方程组，可得两变压器副边实际电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I \frac{Z_{kII}}{Z_{kI} + Z_{kII}} + \frac{\frac{U_1}{k_1} - \frac{U_2}{k_2}}{Z_{kI} + Z_{kII}} = I_{1L} + I_h \\ I_2 &= I \frac{Z_{kI}}{Z_{kI} + Z_{kII}} - \frac{\frac{U_1}{k_1} - \frac{U_2}{k_2}}{Z_{kI} + Z_{kII}} = I_{2L} - I_h \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

通过上面对空载、负载两种运行情况的分析可以看出，变压器变比不相等时的并联运行，在空载时原、副边回路会出现环流，增大了附加损耗。负载时环流与负载电流合成的结果，使变比小的变压器电流大，可能过载；变比大的变压器电流小，可能欠载。

由于短路阻抗很小，即使变比之差 $k_1 - k_2$ 很小，也能产生较大的环流。因此，必须对并联变压器的变比差提出限制，一般应使变比差 $K_1 - K_2$ 与变比的几何平均值 $\sqrt{k_1 k_2}$ 之比小于 0.01，即

$$\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{\sqrt{k_1 k_2}} \leq 0.01 \quad (1-4)$$

二、连接组不相同时的并联运行

如果变压器的连接组不相同而进行并联运行，其后果是非常严重的。

以 Y, y0 (Y/Y-12) 和 Y, d11 (Y/Δ-11) 两台变压器并联为例，副边两个对应的线电压相位不相同，彼此相差 30°。如图 1-4 所示，副边的电压差为

$$\Delta U = 2U_{ab} \sin \frac{30^\circ}{2} = 0.518U_{ab} \quad (1-5)$$

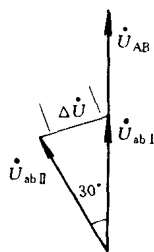


图 1-4 Y, y0, Y, d11 变压器并联运行时的电压差

可见电压差可达副边线电压的 51.8%，这样大的电压差所引起的环流，将超过额定电流许多倍。

以上仅仅是两台变压器只差一个连接组标号的并联，若组别相差愈大，则 ΔU 也愈大，环流就更大，可将变压器烧毁。因此，连接组不

相同的变压器，绝对不允许并联运行。

三、阻抗电压标值不相等时的并联运行

以下分两种情况分析。

(一) 阻抗电压标么值相等而短路阻抗角不相等时的并联运行

图 1-5 和图 1-6 分别是两台变压器并联运行时的简化等值电路图和简化相量图。

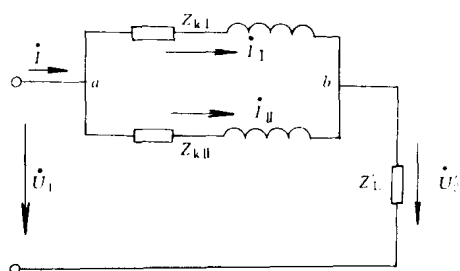


图 1-5 并联运行时的简化等值电路

设第 I 台变压器的短路阻抗角为 $\varphi_{k1} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{k1}}{r_{k1}}$ ，第 II 台为 $\varphi_{k2} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{k2}}{r_{k2}}$ ，且 $\varphi_{k1} > \varphi_{k2}$ 。则图 1-6 相量图中，两台变压器的电流 I_1 与 I_2 之间必有相位差 $\varphi_i = \varphi_{k1} - \varphi_{k2}$ 。这样一来，并联变压器组输出的总电流 I 就是 I_1 、 I_2 的几何和，即 $I = I_1 + I_2$ 。

如果 $\varphi_{k1} = \varphi_{k2}$ ，则 I_1 与 I_2 同相位，总电流就是各变压器电流的算术和，即 $I = I_1 + I_2$ 。

上述两种情况相比较可以看出，前者输出的总电流要小些，变压器的设备容量得不到充分利用。

一般情况下，变压器之间的容量相差愈大，短路阻抗角相差就愈大。所以要求并联运行的变压器，容量之比不应超过 3:1。

(二) 阻抗电压标么值不相等时的并联运行

首先要搞清楚阻抗电压标么值对负载分配的影响。由图 1-5 可知，a、b 两点间的短路阻抗压降为 $I_1 Z_{k1} = I_2 Z_{k2}$ ，将该式变换一下

$$I_1 Z_{k1} = \frac{I_1}{I_{1N}} \frac{I_{1N} Z_{k1}}{U_{1N}} U_{1N} = \beta_1 U_{k1} \cdot U_{1N}$$

$$I_2 Z_{k2} = \frac{I_2}{I_{2N}} \frac{I_{2N} Z_{k2}}{U_{2N}} U_{2N} = \beta_2 U_{k2} \cdot U_{2N}$$

考虑到两台变压器的额定电压相等，则有

$$\beta_1 U_{k1} = \beta_2 U_{k2} \quad (1-6)$$

式中 β_1 、 β_2 ——两台变压器的负载系数；

U_{k1} 、 U_{k2} ——两台变压器的阻抗电压标么值。

式 (1-6) 说明：

(1) 阻抗电压标么值不等而并联时，各台变压器的负载分配率（即负载系数）与自身的阻抗电压标么值成反比。

(2) 当阻抗电压标么值大的变压器满载 ($\beta=1$) 运行时，阻抗电压标么值小的变压器则已过载 ($\beta>1$)；反之，当阻抗电压标么值小的变压器满载运行时，阻抗电压标么值大的变压器却欠载 ($\beta<1$)。

(3) 因为变压器不允许长期过载运行，所以当阻抗电压标么值不等并联运行时，向负载提供最大输出功率的运行情况只能是：让阻抗电压标么值最小的那台变压器满载运行，而其他变压器一律欠载运行。这使变压器的容量不能充分利用，是不经济的。

四、负载分配计算

多台变压器并联运行且阻抗电压标么值不相等时，负载分配计算包括以下三个内容：

(1) 已知各台变压器的额定容量及阻抗电压标么值，且已知总的负载容量时，计算各

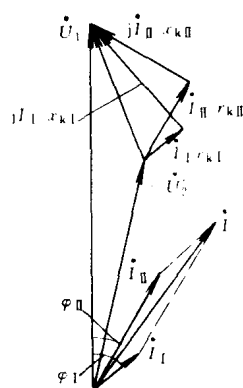


图 1-6 并联运行时的简化相量图

台变压器所分担的功率；

(2) 不使任何一台变压器过载时，计算最大的输出功率；

(3) 在上项运行状态下，计算变压器的设备利用率。

下面推导进行上述计算所使用的公式。

令式 (1-6) 等于常数 C ，即 $\beta_1 U_{k1*} = \beta_1 U_{k1*} = C$ ，则

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{C}{U_{k1*}} = \frac{S_1}{S_{N1}} \\ \beta_1 &= \frac{C}{U_{k1*}} = \frac{S_1}{S_{N1}} \\ \dots\dots \\ \beta_n &= \frac{C}{U_{kn*}} = \frac{S_n}{S_{Nn}} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 $S_1, S_1, \dots, S_n$ ——各台变压器所分担的实际功率；

$S_{N1}, S_{N1}, \dots, S_{Nn}$ ——各台变压器的额定功率。

由式 (1-7) 可得各台变压器分担的实际功率为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= C \frac{S_{N1}}{U_{k1*}} \\ S_1 &= C \frac{S_{N1}}{U_{k1*}} \\ \dots\dots \\ S_n &= C \frac{S_{Nn}}{U_{kn*}} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 中只要确定了常数 C ，就能计算出各台变压器所分担的实际功率。设变压器承担的总负载为 ΣS ，即

$$\Sigma S = S_1 + S_1 + \dots + S_n = \Sigma \frac{S_N}{U_{k*}} C$$

则

$$C = \frac{\Sigma S}{\Sigma \frac{S_N}{U_{k*}}} \quad (1-9)$$

式中 $\Sigma \frac{S_N}{U_{k*}}$ ——各台变压器的额定容量与自身的阻抗电压标么值之比的算术和。

将式 (1-9) 代入式 (1-8)，整理后可得任一台变压器所分担的实际功率的计算式为

$$\left. \begin{aligned} S_n &= \beta_n S_{Nn} = \frac{\Sigma S}{U_{kn*} \Sigma \frac{S_N}{U_{k*}}} S_{Nn} \\ \beta_n &= \frac{\Sigma S}{U_{kn*} \Sigma \frac{S_N}{U_{k*}}} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

若要求任一台变压器都不过载，需要计算最大输出功率 $\Sigma S_{\max}$ 时，可将式 (1-10) 用于阻抗电压标么值最小的那一台变压器，并令其负载系数等于 1，即得

$$\Sigma S_{\max} = U_{K\min*} \Sigma \frac{S_N}{U_{k*}} \quad (1-11)$$

式中 U_{Kmin} —— n 台并联变压器中最小的阻抗电压标么值。

在上述最大输出功率的运行状态下, 变压器的设备利用率为

$$\frac{\Sigma S_{max}}{\Sigma S_N} \quad (1-12)$$

式中 ΣS_N —— 各变压器额定功率之算术和。

【例 1-1】 某变电站有三台变压器并联运行, 各台变压器的变比相等, 组别也相同; 每台变压器额定容量均为 100 kVA, 阻抗电压标么值分别为 $U_{k1} = 0.035, U_{k2} = 0.04, U_{k3} = 0.055$, 设总负载 $\Sigma S = 300$ kVA, 试求:

- (1) 各台变压器所分担的功率;
- (2) 不使任何一台变压器过载时的最大输出功率;
- (3) 在第 (2) 种运行状态下, 变电站的设备利用率。

解 (1) 各变压器所分担的功率。

先求出

$$\Sigma \frac{S_N}{U_{k.}} = \frac{100}{0.035} + \frac{100}{0.04} + \frac{100}{0.055} = 7175.32$$

于是

$$S_I = \frac{\Sigma S}{U_{k1} \cdot \Sigma \frac{S_N}{U_{k.}}} S_{N1} = \frac{300}{0.035 \times 7175.32} \times 100 = 119.45 \text{ (kVA)}$$

同理

$$S_{II} = \frac{300}{0.04 \times 7175.32} \times 100 = 104.52 \text{ (kVA)}$$

$$S_{III} = \frac{300}{0.055 \times 7175.32} \times 100 = 76.03 \text{ (kVA)}$$

可见, 该变电站变压器设备总容量为 300 kVA, 而总负载也为 300 kVA 时, 各变压器所分担的功率并非每台都是 100 kVA, 而是按自身阻抗电压标么值成反比例分配。第 I 台过载 19.45%, 第 II 台过载 4.52%, 而第 III 台却欠载 23.97%。

- (2) 不使任一台变压器过载, 该变电站的最大输出功率为

$$\Sigma S_{max} = U_{Kmin} \cdot \Sigma \frac{S_N}{U_{k.}} = 0.035 \times 7175.32 = 251.14 \text{ (kVA)}$$

- (3) 设备利用率为

$$\frac{\Sigma S_{max}}{S_{N1} + S_{N2} + S_{N3}} = \frac{251.14}{100 + 100 + 100} = 83.71\%$$

第三节 变压器空载投入时的励磁涌流

变压器副边空载, 把原边经开关接入电源的操作称空载投入 (也称空载合闸)。

变压器空载稳态运行时, 空载电流仅占额定电流的 2%~10%, 可认为是正常空载电流。当进行变压器空载投入操作时, 却有可能出现比正常空载电流大几十倍的电流, 需经过一个短暂的过渡过程, 才能恢复到正常的空载电流值。这个在过渡过程中出现的空载投

入电流称为励磁涌流。

空载投入时的励磁涌流现象，是与铁芯中磁场的建立过程密切联系在一起的。因此，首先要分析空载投入时铁芯中磁场的建立过程。

以单相变压器为例，从图 1-7 可列出变压器空载投入时原边的电压方程式为

$$u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin (\omega t + \alpha) = i_0 r_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-13)$$

式中 U_1 ——电源电压有效值；

α ——电源电压初相位角；

Φ ——交链原绕组的总磁通；

i_0 ——空载投入电流；

r_1 ——原绕组电阻；

N_1 ——原绕组匝数。

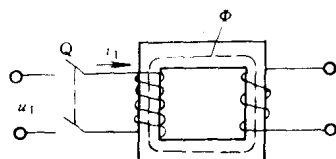


图 1-7 变压器的空载投入

由于铁芯具有磁饱和特性， i_0 与 Φ 的关系是非线性的，式 (1-13) 是一个非线性微分方程式。为了简化求解，可忽略较小的 r_1 ，并假设铁芯不饱和且无剩磁，这样式 (1-13) 可化简为

$$N_1 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} U_1 \sin (\omega t + \alpha)$$

即

$$d\Phi = \frac{1}{N_1} \sqrt{2} U_1 \sin (\omega t + \alpha) dt$$

解得

$$\begin{aligned} \Phi &= -\frac{\sqrt{2} U_1}{\omega N_1} \cos (\omega t + \alpha) + C \\ &= -\Phi_m \cos (\omega t + \alpha) + C \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中 C ——积分常数，由初始条件确定；

$$\Phi_m \text{——稳态磁通幅值，} \Phi_m = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega N_1}。$$

因分析时设铁芯中无剩磁，即初始条件为 $t=0$ 时 $\Phi=0$ ，代入式 (1-14) 得 $C=\Phi_m \cos \alpha$ ，于是

$$\Phi = -\Phi_m \cos (\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha \quad (1-15)$$

由式 (1-15) 可见，空载投入时铁芯中的磁通 Φ 可分为两个分量，一个是非周期分量 $\Phi_m \cos \alpha$ ，另一个是周期分量 $-\Phi_m \cos (\omega t + \alpha)$ 。因此，磁通在过渡过程中，其变化情况与合闸瞬间电源电压的初相角 α 有关。

下面分析两种特殊情况。

(1) $\alpha=90^\circ$ 时：

将 $\alpha=90^\circ$ 代入式 (1-15) 得

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-16)$$

此时磁通的非周期分量为零，这表明一合闸就建立稳态磁通，此种情况下不会出现励磁涌流，空载电流即为正常值。

(2) $\alpha=0^\circ$ 时：

将 $\alpha=0^\circ$ 代入式 (1-15) 得

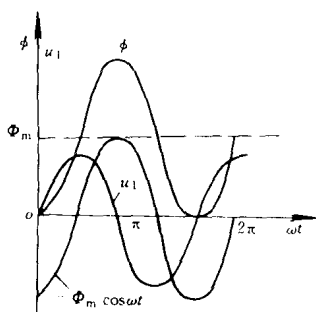


图 1-8 $\alpha = 0^\circ$ 时的磁通变化曲线

$$\Phi = -\Phi_m \sin \omega t + \Phi_m \quad (1-17)$$

式 (1-17) 对应的磁通变化曲线如图 1-8 所示。在空载合闸后的半个周期瞬间 ($\omega t = \pi$), 即 $t = \pi/\omega$ 时 (在工频电网中 $t = 0.01\text{s}$), 将 $t = \pi/\omega$ 代入式 (1-17) 得

$$\Phi_{\max} = 2\Phi_m \quad (1-18)$$

可见, 过渡过程中磁通可达到稳态分量幅值的 2 倍, 再考虑到铁芯的磁饱和特性, 此时铁芯深度饱和, 如图 1-9 所示, 由铁芯的磁化曲线, 对应 $2\Phi_m$ 的励磁电流 i_{0m} 可达正常空载电流的几十倍, 一般可达额定电流的 5~8 倍, 这个电流就是励磁涌流。

由于原绕组具有电阻, 因此励磁涌流会逐渐衰减到正常值。一般小型变压器只需几个周期就可以达到稳态空载电流值, 大型变压器的励磁涌流衰减较慢, 但一般不超过 20 s。

励磁涌流维持的时间较短, 对变压器本身一般不会有什么危害, 但可能引起变压器原边保护误动作, 因此保护装置在整定时要躲开合闸时的励磁涌流。在大型变压器中, 为加速励磁涌流的衰减, 合闸时常常在原绕组回路中加入一个附加电阻, 合闸后再将这个电阻切除。

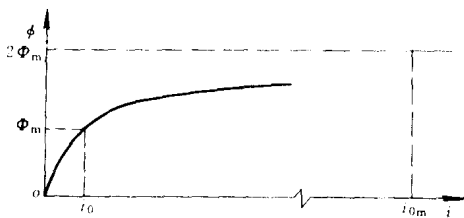


图 1-9 $2\Phi_m$ 所对应的励磁涌流

第四节 变压器的温升和绝缘寿命

变压器中使用的绝缘材料都有一定的耐温限度, 在这个限度内, 绝缘材料的物理、化学、机械、电气等方面的性能都比较稳定, 即具有良好的绝缘性能。如果超过这个温度极限, 绝缘材料就明显“老化”, 即机械强度减弱、变脆, 其他性能变差, 使用寿命缩短; 超过这个温度极限越甚, “老化”越快, 使用寿命便急剧下降, 严重时绝缘材料甚至烧毁。这个温度极限, 称为绝缘材料的允许温度。

绝缘材料有各种各样, 它们的耐热能力也不一样。按照绝缘材料的允许温度, 把绝缘材料分为 A、E、B、F、H、C 几个等级, 各等级的绝缘材料及允许温度见表 1-1。

表 1-1 绝缘材料的等级

等 级	绝 缘 材 料	允许温度 ($^\circ\text{C}$)
A	经过浸渍处理的棉、丝、纸板、木材等, 普通绝缘漆	105
E	环氧树脂、聚脂薄膜、青壳纸、三醋酸纤维薄膜, 高强度绝缘漆	120
B	用提高了耐热性能的有机漆作粘合剂的云母、石棉及玻璃纤维组合物	130
F	用耐热优良的环氧树脂粘合或浸渍的云母、石棉及玻璃纤维组合物	155
H	用硅有机树脂粘合的或浸渍的云母、石棉及玻璃纤维组合物, 硅有机胶	180
C	天然云母、玻璃、瓷料	>180

油浸变压器一般采用 A 级绝缘, 长期运行时的允许温度为 105°C , 在这个温度下运行,

可用 20 年左右。所以，在正常情况下，绝缘的寿命就是变压器的寿命。

变压器运行时，铁芯中的铁损耗、绕组中的铜损耗、铁芯夹件及油箱壁中的附加损耗等都变成了热量，使变压器温度升高。当变压器温度比周围环境温度高时，则向变压器周围散热。当发热量与散热量相等时，变压器各部分温度就达到了稳定值。这时变压器中某部分的温度与周围冷却介质温度之差称为该部分的温升。

变压器各部分的允许温升取决于绝缘材料。如上所述，我国油浸电力变压器一般采用 A 级绝缘材料，其最高允许温度为 105℃。

为保证变压器具有正常的使用年限，在设定周围冷却空气的最高温度为 40℃ 的情况下，油浸电力变压器各部分的温升限度如表 1-2 所示。

表 1-2 油浸电力变压器温升限度

变 压 器 的 部 位		温升限度 (℃)	测温方法
线 圈	自然油循环	65	电阻法
	强迫油循环		
	油导向强迫循环	70	
铁芯及与变压器油接触（非导体部分的结构件）		80	温度计法
油 顶 层		55	

第五节 变压器运行中的监视与维护

为了保证变压器能安全可靠地运行，当变压器有异常情况发生时能及时发现、及时处理，将事故消除在萌芽状态，对运行中的变压器进行严格的监视和多方面的维护是十分重要的。

一、变压器运行中需要监视的内容

(1) 监视仪表。变压器控制盘上的电流表、电压表、功率表等仪表，它们指示着变压器的运行状态，诸如负荷的大小及电压质量的好坏等，因此要严格监视与抄录。

(2) 当有电阻式遥测温度计装置时，要监测变压器上层油温，并作好记录。

(3) 监视变压器储油柜的油位是否正常，有无渗漏油的现象。

(4) 检查各电压等级的绝缘套管，表面是否清洁，有无破损裂纹及放电痕迹，有无渗漏油情况。

(5) 监视检查变压器箱壳有无渗漏油现象，净油器是否按规定投入运行，吸湿器的干燥剂有否失效，安全气道的保护膜是否完好。

(6) 监视冷却系统的运转情况是否正常。对于油浸风冷及强迫油循环风冷的变压器，有无个别风扇停转，风扇电动机是否过热，声音有无异常。

对于强迫油循环水冷却的变压器，其潜油泵的运转是否正常，油压及流量有无变化，冷却水压力是否符合规定，冷却水进口温度是否符合规定，冷却器是否渗油漏水等。

二、变压器的定期维护及维护项目

绝大多数变压器是安装在露天或半露天的场合，要遇到雨、雪、风、霜、雷、高温、严

寒、迷雾、灰尘等多种气候条件的侵袭。每台变压器在设计制造时，根据国家标准和技术条件，虽考虑到要胜任上述各种恶劣条件，但变压器经过一段时期的运行后，其抵御能力会下降，因此必须作定期维护，以恢复变压器的抵御能力。

在一般情况下，每半年作一次维护已足够，但在环境污秽、气候条件恶劣的地区，则应当缩短维护周期，可以4个月一次，甚至每季度一次。

变压器定期维护的项目如下：

- (1) 揩净瓷套管外表面。
- (2) 清扫变压器箱壳及其附件。
- (3) 对本体及充油附件，取油样并作油样试验。
- (4) 检查维护各级绝缘套管的导电接头、导电板帽盖。
- (5) 雷雨季来前，维护好避雷装置并预先投入系统。
- (6) 趁维护停电机，对一些零星小缺陷应予以消除。

三、运行中变压器油的维护

变压器油的作用如前所述，一方面是绝缘介质，另一方面又是散热媒介，所以要求变压器油在运行中应始终处于合格状态。

由于变压器油在运行中可能与空气相接触，也有可能与雨水相接触，还因为运行中的高温影响，所以变压器油的质量可能逐渐变坏，电气绝缘强度逐渐变低，产生所谓“老化”现象。

为确保变压器油的质量，就要采取各种措施，延长其使用寿命，其主要维护措施如下。

1. 定期取油样检验

对35 kV以上的变压器，每年取样化验一次；对35 kV以下的变压器，可每三年取样化验一次。

对于电气绝缘强度的试验，应在每两次取样化验之间再作一次试验。

2. 充氮保护

将惰性氮气充满储油柜上部空间，隔绝空气，可防止油的过早老化。

3. 投用净油器

净油器内有吸附剂，变压器油流经净油器时，油中的水分、游离酸等氧化物都被吸附剂吸收，使油连续地得到再生，油质能长时间保持合格。

4. 油中添加抗氧化剂

油中添加抗氧化剂后，由于抗氧化剂的作用，使氧化反应链中断以抑制油的氧化。

小 结

变压器并联运行可提高供电的可靠性和经济效益，为达到并联运行的理想要求，并联运行的变压器必须符合一定的条件。变比相等及组别相同这两个条件，是为了并联变压器的原、副绕组回路中没有环流；阻抗电压标么值相同这个条件，是为了负载分配合理。

空载投入变压器时有可能产生励磁涌流现象，其原因是由铁芯的饱和特性引起的。励磁涌流对变压器不致造成损害。

变压器的寿命在正常情况下取决于绝缘的寿命，而变压器的绝缘材料都有一定的耐温