

电力变压器的并联运行

陈叔涛 陈涑均 编

机械工业出版社

73.261
286

电力变压器的并联运行

陈叔涛 陈涑均 编



机械工业出版社

本书在普及的基础上对变压器的基本原理与有关参数作了简单扼要的叙述,提出了变压器并联运行的必要条件以及在非常规情况下并联运行的要求和负荷的分配。书中列举了计算公式和例题解答,以供参考。此外还对变压器的经济安全运行作了简单介绍。

本书可供变、配电所电气运行的电工使用,也可供系统调度人员和从事电气工作的人员参考。

电力变压器的并联运行

陈叔涛 陈涑均 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 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $4 \frac{1}{8}$ ·字数 90 千字

1984 年 1 月北京第一版·1984 年 1 月北京第一次印刷

印数 00,001—18,500·定价 0.46 元

*

统一书号: 15033·5580

毛主席语录

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。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

目 录

一、概述	1
1. 变压器在电网中的应用	1
2. 变压器运行上的要求	2
3. 变压器的并联运行	5
二、与并联运行有关的变压器基本原理与参数	7
1. 变压器的运行原理	7
2. 变压器中各量正方向的标法和额定数据	14
3. 电力变压器的调压分接	19
4. 变压器的极性和连接组号	22
5. 变压器的等值电路、等值阻抗、相量图和运行特性	43
三、并联运行的必要条件	54
1. 额定电压比要相等	54
2. 接线组号应相同	55
3. 阻抗电压百分比要接近相等	56
4. 三相的相序要相同	57
5. 并联运行的变压器之间的容量比	58
四、不按常规条件下和特殊情况下的并联运行	59
1. 不同电压比、相等阻抗百分比的并联运行	59
2. 阻抗电压不相等情况下负载电流的分配	69
3. 二台以上具有不同容量与不同短路阻抗百分比的变 压器的并联运行	80
4. 不同电压比、不同阻抗百分比的变压器的并联运行	82
5. 联接组不同的变压器能否并联运行	85

37462

IV

6. 有载调压变压器的并联运行	93
7. 三线圈变压器的并联运行	95
8. 通过网络并联的变压器	101
五、有关经济安全运行	103
1. 并联变压器的经济运行	104
2. 并联运行对系统短路电流的影响	110
3. 有关运行电压	113
4. 并联运行与电压调整率的改善	116
5. 运行与维护	117
6. 有关负载能力	120
7. 对绝缘油的要求	124

一、概 述

1. 变压器在电网中的应用

变压器是一种静止的电器，根据电磁感应原理，由绕在共同铁心上的各绕组通过交变磁场而联系着，用来把某一电压、电流、阻抗或相位变换为另一种的电压、电流、阻抗和相位，实现两个电路之间的能量转换。

现代化的生产、科研和生活等各个方面，电能都已广泛地使用。由于各方面的原因，对电量提出了各种不同的要求。变压器也因此成为电器产品中的关键设备之一。随着工农业生产飞速发展，对变压器需要量越来越多，仅就电力系统中每一千瓦的发电设备就需要5~9千伏安容量的变压器，来完成各级输、变、配和供电的任务。并且对变压器的技术要求，结构形式、安全可靠性和效率等也越来越有更高的要求。

现代的电力系统普遍采用三相供电制，应用最广的是三

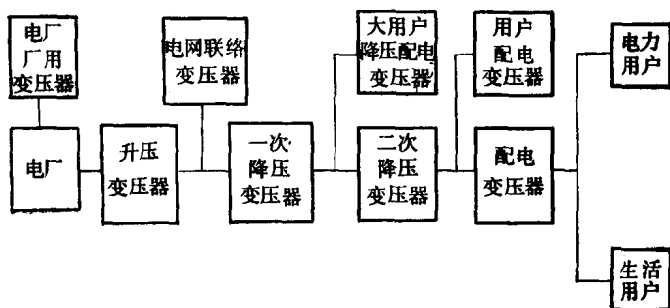


图1-1 电力系统中输配电用变压器方框示意图

相变压器。我们知道要将大功率的电能远距离输送，采用低电压、大电流传送会形成极大的线路损耗和压降。所以需用升压变压器将发电机发出的电压升高。一般讲距离越远，输电功率越大，为了要达到经济运行，必需将输电电压升得越高。我国采用的电压为0.4、6、10、35、60、110、220、330、500千伏等级的国家标准。目前世界上在运行中的最高电压为750千伏，并且已向1200千伏电压发展。

2. 变压器运行上的要求

变压器连接在电网上，人们对它有几个基本要求：

- ① 安全可靠地运行；
- ② 要低损耗、经济运行；
- ③ 做好维修与测试监视工作，延长使用寿命。

变压器是一个静止的电器设备，按理来说，应该是安全可靠的，但是它是一个高压设备，内部电场强度较高，大都运行在户外，受各种气候条件的影响，并且与电网连接在一起，受到系统上的电压与电流的冲击。加之制造过程中材质、加工工艺上的缺陷等等，所以变压器的损坏事故经常发生。据国内外的事故统计：安装在系统中的变压器和每年发生事故台数的比还是比较高的，而且电压等级越高事故率亦越高，据两个国家电力系统的统计：

138千伏以上电压等级：年事故率在 2.46~4.35%

61~138千伏电压等级：年事故率在 0.83~1.45%

60千伏及以下电压等级：年事故率为 0.21~0.886%

事故的发生，对电网的损害很大，如大型变压器的损坏，往往要长时间才能修复或调换，严重的会影响发电机电能的输出；地区大面积的停电，使工农业减产，对居民带来生活

上的不方便。即使配电变压器的损坏,亦将造成一定的损失。据估计损坏后经济上的损失除设备本身修复费用外,还需加上少送电量的损失。对工厂来说其停电损失相当于8~10倍少送电度的费用。所以运行人员应尽最大努力做到设备的安全运行。

为了使供电不受或少受损失,往往在变电站中将负荷分给两台或几台变压器并联运行,或者将变电站间相互用电网连接,可互相馈送,勿使供电中断。

500、330、220、110千伏等级是属于输电电压,110、60、35千伏是属于二级输电电压,10、6和0.4千伏是配电电压。电网电压等级越多,需要的变压器数量亦越多。多级变电会增加变压器的损耗,但是为了降低线路上的损耗,采用多级电压输送亦是必要的,所以对如何降低总的输配电损耗是要综合起来考虑的。

由于能源紧张,世界各国都在千方百计节约能源。变压器的损耗虽然仅占输出功率的0.5~3%之间(大型变压器损耗百分比小,小型变压器百分比大)。但其装置数量之多,传递电能容量之大,并且终年在运行,所以累积起来损耗的能量便很可观。变压器的损耗可分为空载损耗与负载损耗两种,也就是铁损耗与铜损耗。当变压器一投入系统便产生空载损耗,这种损耗与负载大小无关,而铜损是与负荷的平方成正比。在变电站设计时,应郑重地考虑其用电负载的大小,24小时和一年四季负荷的变化;按负载的变化可计算出变压器的损耗;再按每年损耗的价值,变压器购置费用,折旧和所需无功补偿购置的费用,常年的维修费用以及今后负载的增加综合起来,得出选择何等容量的变压器最为经济。

在研究经济问题的同时,还要考虑安全运行。所以变压

4

器的并联运行常为人们所采用。按负载大小的变化, 计算投入变压器运行的台数, 能得出最小的损耗和最佳的运行方式。并联运行对电网安全运行提供了可靠的条件。在建设变电站时, 若该地区负荷逐年上升, 为了降低基建的投资, 可以将变压器分期地逐台投入运行。这可以避免初期就投入一台大容量的变压器, 长期处在低负荷下运行, 而使空载损耗大和功率因数低的缺点。

有时为了运输上的限制, 如桥梁、车辆等的载重吨位不足, 选择几台小变压器并联运行也是一种解决办法。

要使变压器安全运行, 必需要做好运行、维修和测试工作。

有关运行方面要监视好负载, 按额定容量运行。当需要短时期过负荷运行时, 要根据电力部门颁发的变压器运行规程中规定的允许过负荷倍数和持续时间执行。当遇到事故过负荷时, 亦应遵守制造厂的规定。并联运行的变压器需监视它们的负荷分配。要保持变压器上层油温不超过制造厂的规定。过电压运行, 会使铁心磁密饱和, 空载电流大幅度增加, 空载损耗亦相应增大, 温升升高, 电压波形畸变等不利因素。当遇到系统波动、线路故障使变压器保护动作时, 要了解情况查明原因, 在变压器无问题后才能投入运行。

运行中的变压器是有温升的, 最高时上层油的温度可达 90°C , 绝缘油和内部绝缘材料受温度、湿度和油中溶解氧气等因素的影响, 使油和绝缘材料逐渐老化, 虽然这过程是缓慢的, 但运行了一定期限后如10~15年需吊出心子器身大修一次, 平时每年亦需做些维修工作。

做好定期的测试工作是监视变压器绝缘可靠运行的有效保证。对大中容量的变压器进行一年一度的测试是需要的。

除了试验有关绝缘项目外，对套管、线圈的直流电阻、绝缘油等亦应测试，做好记录与历年记录相比，观察其发展趋势，作出必要的评价。

近年来，对绝缘油的色谱分析试验和微量水分的测定，在国内各单位普遍开展，前者对鉴定变压器的潜伏性故障，即慢性的缺陷；后者对绝缘性能的测定均是有效的，所以对大型变压器应予以定期测试。

3. 变压器的并联运行

变压器的并联在电网安全运行和降低电能损耗有着重要意义。因此，这种方式被普遍地采用。

并联运行是指各台变压器的原绕组和副绕组分别接在公共的母线上，图1-2和图1-3为单相和三相变压器并联运行接线图。

但是也不能认为并联运行的变压器台数越多越好，这会使每台变压器的容量过小，因而增加了设备的经济投资，提高了变电所的造价。

变压器在并联运行时，理想的运行情况是：当变压器已经并联起来但

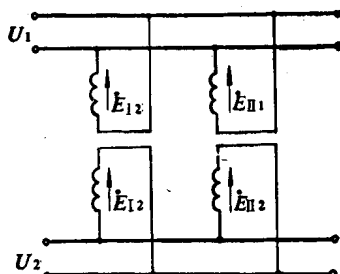


图1-2 I / I-12单相变压器并联运行接线图

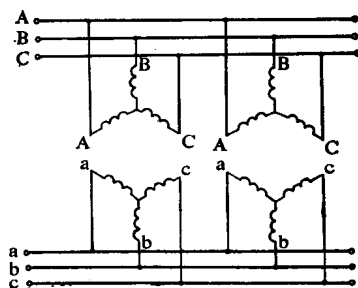


图1-3 Y/Y-12三相变压器并联运行接线图

还没有加负荷时，各变压器二次侧之间没有循环电流，各变压器仍如单独空载时一样，只有一空载电流。当加上负荷后，各变压器能按比例合理地分担负载，也就是负载能力和它各自的容量成正比，要获得这样理想运行，就要求并联运行的变压器满足以下三个条件：

① 所有并联运行的变压器的电压比（原边线电压和副边线电压之比）必须相等。

② 副边电压对原边电压的相位移相同，即并联变压器的联接组别相同。

③ 为了负载分配得合理，要求各并联变压器的阻抗电压百分比($U_k\%$)相等，也即漏阻抗标么值(Z_k^*)相等。

为了说明并联的变压器之间有哪些问题存在，以及应满足什么条件才能消除那些存在的问题，下面将分析与并联运行有关的变压器参数。

二、与并联运行有关的 变压器基本原理与参数

1. 变压器的运行原理

、变压器的主要组成部分：是由套在闭合铁心上的两个绕组组成（又称线圈，也可以有多个绕组，为了便于说明以双绕组为例）。这两个不连接的电路通过铁心的电磁感应来实现能量传递。作为磁路的铁心常由硅钢片迭成。接电源的线圈称原绕组（或原边、初级、一次绕组）用大写 AX 、 BY 、 CZ 标记着高压绕组的端点；接负载的线圈称副绕组（或副边、次级、二次绕组）用小写 ax 、 by 、 cz 标记低压绕组的端点。根据习惯对原绕组有关各量都下标为 U_1 、 E_1 、 I_1 、 P_1 、 W_1 等；对副绕组有关各量下标为 U_2 、 E_2 、 I_2 、 P_2 、 W_2 等。

铁心和绕组是变压器的基本构件，另外根据运行和结构的需要变压器还有外壳、冷却装置、引线、绝缘套管、调压装置和安全装置等等构件。

为了便于说明问题，图 2-1 是一台双绕组单相变压器的负载运行示意图，现将绕组分为二柱排列，而实际上均为同心排列。

当二次侧副绕组 ax 端开路情况下，原绕组 AX 端加上额定频率 f 和按正弦交变的电压 $\dot{U}_1$ 时，变压器即处于空载运行状态，这时在原绕组仅有一个较小的空载电流 $\dot{I}_0$ 和空载损耗 P_0 。（主要是铁损耗 P_{Fe} ）。由 $\dot{I}_0$ 通过原绕组匝数 W_1 建

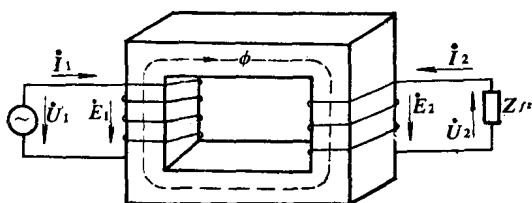


图2-1 双绕组单相变压器的负载运行示意图

立起空载磁势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 W_1$ ，在磁势 $\dot{F}_0$ 作用下，变压器内部便有磁通，其中绝大部分通过铁心回路闭合，并且与原绕组和副绕组全部匝链，这磁通称为主磁通 ϕ ，另一小部分仅与原绕组匝链，它的磁路大部分是经过非主磁物质的称为原绕组的漏磁通 ϕ_{s1} ，磁通正方向符合右手螺旋定则。主磁通在原、副绕组中分别感应出感应电势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 。感应电势的大小由电磁感应定律得知

$$e = -W \frac{d\phi}{dt}$$

式中， e 为感应电势， W 为绕组匝数， $\frac{d\phi}{dt}$ 为磁通变化率。

在副绕组开路时 $\dot{E}_2 = \dot{U}_{20}$ ，当副绕组接负载并有电流 $\dot{I}_2$ 通过时，这时副绕组电流 $\dot{I}_2$ 流过绕组 W_2 也将产生磁势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 W_2$ ，它将改变铁心中的主磁通 ϕ 。为了达到磁势平衡，这时原绕组由激磁电流 $\dot{I}_0$ 变为负载电流 $\dot{I}_1$ 以抵消副绕组的磁势。通过电磁感应作用使功率从原绕组传递给副绕组，这就是简单的“负载运行”原理。

变压器运行时内部的铁损和铜损（主要是负载损耗）使变压器发热，长期使用的变压器最后总是热平衡在一个稳定温度上，必须使这稳定温升不大于变压器允许温升等级。

变压器的输入总是大于它的输出，把输出与输入之比称为效率 $\eta = P_2/P_1$ ，它也随着负载的变化而变。由于绕组阻抗的影响，将使副边绕组电压随负载有所变化，称为变压器的外特性。负载的功率因数以及变压器本身的阻抗都影响着变压器的运行性能。

研究变压器并联运行，必须分析变压器的有关电压、电势、电流、阻抗、极性、接线组别和损耗等有关量。也牵涉到有关的电磁定律、矢量图等概念。

1) 变压器的电磁关系

与电机一样，变压器是电与磁相互转换的静止电机，当原绕组接到额定电压 U_1 的交流电网上，在变压器的铁心上便产生了主磁通，如果电网电压按正弦规律变化

$$u = U_m \sin \omega t$$

则主磁通也将按正弦规律变化：

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

式中的 U_m 、 Φ_m 是电压和主磁通的最大值。

交变磁通在铁心交链的各绕组中产生感应电势。设原、副绕组的交链匝数分别为 W_1 和 W_2 ，则在原副绕组中的感应电势为

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt}$$

当磁通增加时，绕组中感应电势 e_1 、 e_2 的实际方向是自下而上，而习惯标定的正方向是自上而下，所以表达式的右方应有一负号（符合楞次定律）。

① 感应电势

如果铁心通过的磁通是正弦变化规律 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$, 则感应电势

$$\begin{aligned} e &= -W_1 \frac{d\phi}{dt} = -W_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} \\ &= -W_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = \omega W_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

式中 ϕ ——正弦规律变化磁通的瞬时值(Wb);

Φ_m ——主磁通的最大值(Wb);

ω ——交变磁通的角频率(rad/s);

E_{1m} ——原绕组感应电势的最大值(V)。

从上式中看出, 在磁通按正弦规律变化时, 其感应电势也按正弦规律变化, 感应电势在相位上滞后于主磁通($< 90^\circ$)。即原绕组的感应电势落后于主磁通四分之一周期。

根据有效值和最大值之间的关系, 有效值 $E = E_m / \sqrt{2}$, 则原绕组感应电势的有效值 E_1 为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} W_1 \Phi_m = \frac{2\pi f_1}{\sqrt{2}} W_1 \Phi_m = 4.44 f_1 W_1 \Phi_m$$

式中, f_1 为交流电源的频率, 工业频率为 50 赫。

上式是变压器重要的基本公式之一, 表明感应电势的大小与电网频率、绕组匝数以及铁心中磁通最大值的乘积成正比。频率和匝数为常数, 这时 E_1 仅与 Φ_m 成正比。

由 E_1 同样可求出副绕组的感应电势的瞬时值、最大值和有效值

$$\begin{aligned} e_2 &= E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ E_{2m} &= \omega W_2 \Phi_m \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 W_2 \Phi_m \end{aligned}$$

对于已经接入额定频率电网的副绕组，它的感应电势与它的匝数 W_2 和磁通 Φ_m 成正比。

② 漏感电势

变压器接负载时，原、副绕组产生的漏磁通较链着不同的匝数，为了便于分析，采用等值漏磁通概念，得到的漏感电势为

$$\begin{aligned} e_{\delta 1} &= -W_1 \frac{d\phi_{\delta 1}}{dt} = \omega W_1 \Phi_{\delta 1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{\delta 1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_{\delta 2} &= -W_2 \frac{d\phi_{\delta 2}}{dt} = \omega W_2 \Phi_{\delta 2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{\delta 2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

式中， $\Phi_{\delta 1m}$ 、 $\Phi_{\delta 2m}$ 为原、副绕组等值漏磁通的最大值。

由于电势和漏磁通都以同频率按正弦规律变化，所以也可用向量表示

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44f_1 W_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44f_1 W_2 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_{\delta 1} &= -j4.44f_1 W_1 \dot{\Phi}_{\delta 1m} \\ \dot{E}_{\delta 2} &= -j4.44f_1 W_2 \dot{\Phi}_{\delta 2m} \end{aligned}$$

漏感电势的有效值也可以写成电抗压降的表达式

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\delta 1} &= -j\dot{I}_1 \omega L_{\delta 1} = -j\dot{I}_1 X_{\delta 1} \\ \dot{E}_{\delta 2} &= -j\dot{I}_2 \omega L_{\delta 2} = -j\dot{I}_2 X_{\delta 2} \end{aligned}$$

式中， $\dot{\Phi}_{\delta 1m}$ 、 $\dot{\Phi}_{\delta 2m}$ 为原、副绕组等值漏磁通的最大值； $L_{\delta 1}$ 、 $L_{\delta 2}$ 为原、副绕组漏磁通的电感系数，简称漏感，是个常数； $X_{\delta 1} = \omega L_{\delta 1}$ ， $X_{\delta 2} = \omega L_{\delta 2}$ ，是与漏磁通相对应的绕组漏电抗，它是一个常数，不随电流的大小而改变，

③ 变压器的变比