

电力变压器现场 运行与维护

张华 杨成 朱涛 张鹏 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力变压器运行与维护

张华 杨成 朱涛 张鹏 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要围绕电力变压器的基础理论、运行知识、二次系统、结构组成、部件检修、现场安装、试验及验收等内容进行阐述,较详细地讲解变压器现场工作的各个环节。

本书共分八章,分别为电力变压器基础理论、电力变压器运行、电力变压器二次系统、电力变压器结构、电力变压器检修、电力变压器现场安装、电力变压器现场试验和电力变压器现场验收。

本书内容具有实用性和实践性强的特点,可供从事电力变压器运维、检修、试验及管理等工作的一线人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器现场运行与维护 / 张华等编著. —北京:中国电力出版社, 2015.8

ISBN 978-7-5123-8203-9

I. ①电… II. ①张… III. ①电力变压器—运行②电力变压器—维修 IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 209454 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 580 千字
印数 0001—2000 册 定价 96.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

电力变压器是电力系统中最关键的设备元件，是各个电压等级联络的桥梁，承担电压变换、电能分配和传输的任务，为确保电力变压器的安全可靠运行，提高电力变压器运行和维护人员在实际现场工作中的技能和管理水平，特编写《电力变压器现场运行与维护》一书。

本书共分八章，主要围绕电力变压器的基础理论、运行知识、二次系统、结构组成、部件检修、现场安装、试验及验收等环节进行阐述，较详细的讲解变压器现场遇到的各种技术问题，具有实用性和实践性强的特点，可供从事电力变压器运行、检修、试验及管理等工作的人员学习参考。

本书主要由国网北京市电力公司张华、杨成、朱涛和张鹏编写，同时参与本书编写的人员还有：国网北京市电力公司及洪泉、蔡永挚、庞海龙、王振风、李晖、朱宏林、才忠宾、许文静、李大鹏、刘正义、解晓东、张贺、刘军、杨双锁、张雪、张晋、李鄢、刘天星、胡铁龙、蔡京革、李欣、孟玉瑾、柯亨通，国网山东省电力公司检修公司张达，北京水利规划设计研究院李大可，中国华能集团公司技术经济研究院吴卓铮，本书的编写离不开大家的群策群力，在此一并向他们表示深切的谢意。

同时，还要感谢国网北京市电力公司检修分公司领导涂明涛在百忙之中抽出时间审阅全书，并提出许多宝贵的修改意见。

由于新技术、新设备的不断发展，书中不妥之处在所难免，恳请专家和读者批评指正，并由衷地希望此书对您的工作有所帮助。

编 者

2015年8月

目 录

前言

第一章 电力变压器基础理论	1
第一节 电力变压器工作原理	1
第二节 电力变压器分类	11
第三节 电力变压器主要技术参数	13
第二章 电力变压器运行	27
第一节 电力变压器运行方式	27
第二节 电力变压器运行操作	34
第三节 电力变压器保护配置	39
第四节 电力变压器监控与巡视	46
第五节 电力变压器运行异常及故障跳闸	50
第三章 电力变压器二次回路	66
第一节 油浸变压器非电量装置二次回路	66
第二节 气体变压器非电量装置二次回路	69
第三节 油浸风冷装置二次回路	71
第四节 强油循环风冷装置二次回路	75
第五节 强油循环水冷装置二次回路	83
第六节 强气循环风冷装置二次回路	98
第七节 有载分接开关 ED 电动机构二次回路	105
第八节 有载分接开关 ED 调压机构分接显示装置	115
第九节 有载分接开关 CMA7 电动机构二次回路	119
第四章 电力变压器结构	129
第一节 电力变压器器身	129
第二节 电力变压器油储存及监测装置	143
第三节 电力变压器安全保护装置	162
第四节 电力变压器调压装置	181
第五节 电力变压器引出线装置	207
第六节 电力变压器冷却装置	219

第五章 电力变压器维护与检修	237
第一节 电力变压器内部常见异常检查与处理	237
第二节 电力变压器本体渗漏油维护与检修	243
第三节 电力变压器储油柜及监测装置维护与检修	247
第四节 电力变压器安全保护装置维护与检修	253
第五节 电力变压器有载分接开关维护与检修	260
第六节 电力变压器套管维护与检修	285
第七节 电力变压器冷却装置维护和检修	296
第六章 电力变压器现场安装工艺	306
第一节 电力变压器现场安装工艺流程	306
第二节 电力变压器现场滤油	316
第三节 电力变压器现场真空处理	319
第四节 电力变压器现场真空注油	322
第五节 电力变压器现场绝缘干燥	323
第六节 电力变压器附件安装工艺	325
第七章 电力变压器现场试验	327
第一节 电力变压器绝缘电阻试验	327
第二节 电力变压器绕组直流泄漏电流试验	334
第三节 电力变压器介质损耗角正切值试验	338
第四节 电力变压器外施工频交流耐压试验	344
第五节 电力变压器绕组连同套管的直流电阻试验	348
第六节 电力变压器绕组变形试验	353
第八章 电力变压器现场验收	357
第一节 电力变压器器身检查及验收	357
第二节 电力变压器竣工检查及验收	361
第三节 电力变压器投运检查	369
参考文献	371

第一章

电力变压器基础理论

电力变压器指具有两个或多个绕组的静止设备，为传输电能，在同一频率下，通过电磁感应将一个系统的交流电压和电流转换为另一个系统的交流电压和电流，通常这些电流和电压的值是不同的。

电力变压器的主要作用是变换电压，以利于功率的传输。电压经升压变压器升压后，可以减少线路损耗，提高送电的经济性，达到远距离送电的目的；而降压变压器则能把高压变为用户所需要的各级使用电压，满足用户需要。

第一节 电力变压器工作原理

一、双绕组变压器工作原理

电力变压器是根据电磁感应原理工作的电气设备，是“电生磁，磁生电”现象的一个具体应用，它通过铁芯内的磁通随时间的变化，在不同匝数的绕组内（也可以在一个绕组内通过引出抽头而得到不同的匝数）感应出不同的电压，从而变换不同的电压。以一台单相双绕组变压器为例分析其工作原理，如图 1-1 所示，其中 AX 是一次绕组，其匝数为 N_1 ，ax 是二次绕组，其匝数为 N_2 ，一次绕组与二次绕组只有磁耦合，没有电联系。

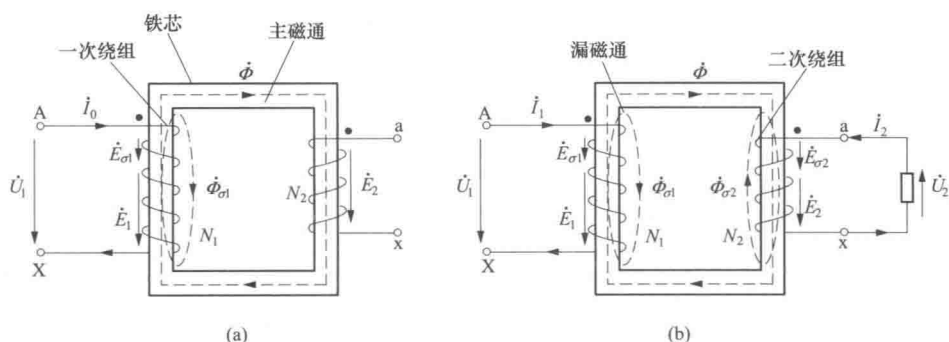


图 1-1 单相双绕组变压器工作原理

(a) 变压器空载运行；(b) 变压器负载运行

注：同时链着一、二次绕组的磁通称为主磁通，只链一次绕组或二次绕组本身的磁通称为漏磁通。

1. 变压器空载运行

当二次绕组开路空载运行时,如图 1-1 (a) 所示,一次绕组施加交流电压 $\dot{U}_1$, 则一次绕组中就会流过电流 $\dot{I}_0$, 此时的电流称为空载电流 (又称励磁电流), 励磁电流形成励磁磁动势并在铁芯中产生主磁通 $\dot{\Phi}$ 和漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$, 主磁通 $\dot{\Phi}$ 穿过二次绕组, 在铁芯中形成闭合回路, 漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 仅通过一次绕组与油等非导磁材料形成闭合回路。此时, 交变的磁通在一、二次绕组中就感应出电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 和 $\dot{E}_2$ 。

电动势的方向由楞次定律确定, 即电动势倾向于在线圈中产生电流, 电流产生的磁场总是倾向于阻止磁通的变化, 设铁芯内有正弦变化的磁通 $\dot{\Phi} = \Phi_m \sin \omega t$, 根据电磁感应原理, N 匝绕组中的感应电动势的瞬时值表达式为

$$\dot{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -2\pi f N \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

当用时间相量表达时, 又可以表示为

$$\dot{E} = -j \frac{E_m}{\sqrt{2}} \Phi_m = -j \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = -j 4.44 f N \Phi_m$$

可见, 作为相量, $\dot{E}$ 滞后于 $\dot{\Phi}$ 电角度 $\pi/2$, 在正弦交流条件下, 通常电压以有效值表示, 于是绕组中的感应电动势的有效值为 $E = 4.44 f N \Phi_m$ 。

主磁通感应电动势和漏磁通感应电动势均可用以上公式求得。

变压器一次绕组外施额定电压 $\dot{U}_1$ 空载运行时, 由于铁芯磁导较大, 因此产生主磁通 $\dot{\Phi}$ 所需的电流 $\dot{I}_0$ 较小, 通常 $\dot{I}_0$ 不超过额定电流的 10%, 加上漏阻抗模 $|Z_1|$ 通常也很小, 所以电压降 $\dot{I}_0 |Z_1|$ 相对于 $\dot{U}_1$ 而言是很小的。若忽略该漏阻抗压降, 则有

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-1)$$

$$\text{或 } \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-2)$$

由于一、二次绕组由同一主磁通 $\dot{\Phi}$ 交链, 所以有

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 = 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-3)$$

$$\text{或 } \dot{U}_2 = \dot{E}_2 = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-4)$$

从式 (1-1) 和式 (1-3) 可以求出

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \approx \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-5)$$

式中, $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 分别为一、二次绕组的额定相电压; k 为变压器的变比, 当 $k > 1$ 时为降压变压器; 当 $k < 1$ 时为升压变压器。

由式 (1-5) 可以看出, 在主磁通 $\dot{\Phi}$ 有变化的情况下, 只要改变变压器一、二次绕组的匝数, 就可以改变一、二次绕组的电压比, 从而实现改变电压的目的。

2. 变压器负载运行

当二次绕组接上负载运行时, 如图 1-1 (b) 所示, 在感应电动势 $\dot{E}_2$ 的作用下, 二次绕组将有电流 $\dot{I}_2$ 通过, $\dot{I}_2$ 产生的磁动势 $\dot{F}_2$ 作用在磁路上, 而此时的一次绕组电流就由空载时的 $\dot{I}_0$ 增加到 $\dot{I}_1$, 它们之间满足磁动势平衡方程

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \text{ 或 } \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-6)$$

式中, $\dot{F}_1$ 为一次绕组磁动势, $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$; $\dot{F}_2$ 为二次绕组磁动势; $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$; $\dot{F}_0$ 为产生主磁通 Φ 的一、二次绕组合成磁动势, $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ 。

用电流形式表示为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \right) \dot{I}_2 = \dot{I}_0 - \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_0 + \dot{I}_L \quad (1-7)$$

可以看出, 变压器的一次电流包含两个分量: 一个是励磁电流 $\dot{I}_0$, 用来产生主磁通; 另一个分量 $\dot{I}_L$, 用来平衡二次磁动势。从功率平衡角度看, 二次绕组有电流, 意味着有功率输出, 一次绕组应增大相应的电流, 增加输入功率, 以达到功率平衡。

因主磁通 Φ 的大小取决于端电压 $\dot{U}_1$ 的大小, 当外施电压 U_1 不变时, $\dot{I}_0 N_1$ 基本不变 (空载与负载运行略有不同), 所以当二次绕组电流 $\dot{I}_2$ 改变时, 一次绕组电流 $\dot{I}_1$ 就随着改变。在额定负载运行时, 由于 $I_0 \ll I_1$, 当忽略 $\dot{I}_0 N_1$ 时, 磁动势平衡方程成为 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \approx 0$, 可知

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可知, 在变压器额定负载运行时, 一、二次电流近似与匝数成反比。从以上分析可以看出, 电流比和电压比正好相反, 则有

$$S_1 = I_1 U_1 \approx S_2 = I_2 U_2$$

由此可见: 在忽略变压器内部损耗的情况下, 总的一、二次绕组的功率 (S_1 和 S_2) 不变, 变压器起到功率传输的作用。

(一) 变压器电压方程及相量图

分析变压器空载、负载运行的电磁方程式、相量图需从电磁关系入手, 首先应对各物理量的参考方向进行规定, 通常采用以下的参考方向惯例: 在分析电磁感应关系时, 规定磁动势、磁通的参考方向都与产生它们的电流的参考方向符合右手螺旋定则, 电动势和产生它的磁通参考方向也符合右手螺旋定则。这样在电路中, 电动势的参考方向和电流的参考方向就是相同的。

在列写电路方程时, 规定在作为负载的电路中, 电压的参考方向和电流的参考方向相同。

按照以上惯例规定的参考方向 (见图 1-1), 变压器空载运行及负载运行的电压方程式和相量图可分析如下。

1. 变压器空载运行

变压器空载稳态运行时, 一、二次侧的电压方程式分别为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 \end{aligned}$$

漏磁路的磁导基本上等于变压器油等非铁磁性物质部分的磁导, 通常可以认为是常数, 磁导为常数的漏磁路为线性磁路, 假设其漏电抗为 $X_{\sigma 1}$, 则漏磁通感应电动势可表示为

$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 X_{\sigma 1}$ ，则一次侧电压方程式可变为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{\sigma 1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

式中， Z_1 称为一次绕组漏阻抗， $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ 。

由于一、二次各电磁量都以频率 f 随时间按正弦规律变化，因此都可以用相量表示，其电磁关系示意图与相量图如图 1-2 和图 1-3 所示。

从图 1-3 可以看出， φ_0 为 $\dot{I}_0$ 与 $\dot{U}_1$ 之间的相位差， ψ_0 为 $\dot{I}_0$ 与 $-\dot{E}_1$ 之间的相位差。因 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ，所以 $\varphi_0 \approx \psi_0 \approx \pi/2$ 。这说明变压器空载运行时，功率因数 $\cos \varphi_0$ 很小，即从电网吸收较大的滞后性无功功率。从电网输入的有功功率为 $\dot{U}_1 \dot{I}_0 \cos \varphi_0$ ，空载时它等于变压器中的损耗，即铁损 P_{Fe} ，一次绕组铜损 P_{Cu1} 很小。

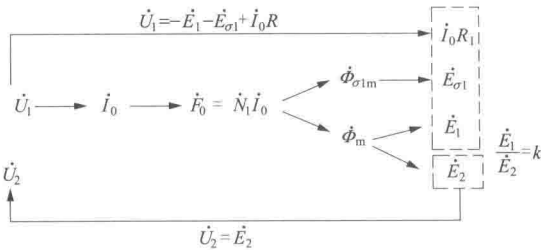


图 1-2 变压器空载运行电磁关系示意图

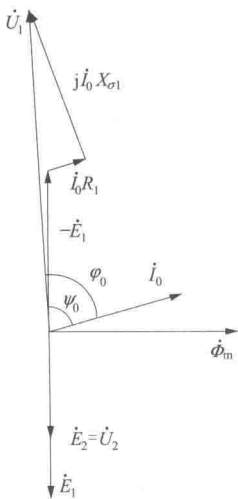


图 1-3 变压器空载运行相量图

2. 变压器负载运行

变压器负载稳态运行时，一、二次侧的电压方程式分别为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 R_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}_2 R_2$$

对负载 Z_L 有

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

式中， R_2 是二次绕组的电阻，仍将漏磁电动势表示成电流在电抗上产生电压降的形式，有 $\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_{\sigma 1}$ ； $\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_{\sigma 2}$ 。则一、二次侧电压方程式可变为

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

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

式中， Z_2 为二次绕组漏阻抗， $Z_2 = R_2 + jX_{\sigma 2}$ ； $X_{\sigma 2}$ 为二次绕组漏电抗，和一次绕组漏电抗 $X_{\sigma 1}$ 一样，可以认为是一个常数。

变压器负载运行时的电磁关系示意图与相量图如图 1-4 和图 1-5 所示。

变压器负载运行时的电压方程式对空载和负载运行都适用，空载运行时（ $\dot{I}_2 = 0$ ）可视为负载运行的特例。

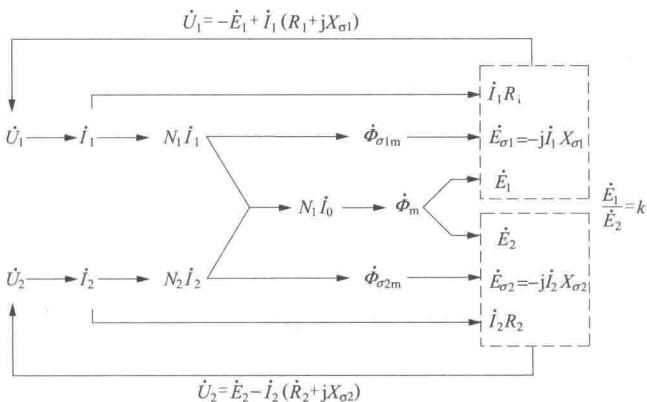


图 1-4 变压器负载运行电磁关系示意图

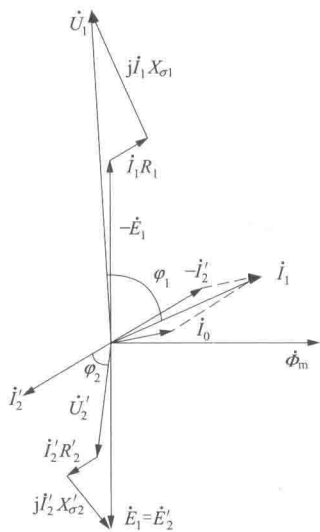


图 1-5 变压器负载运行相量图

变压器正常负载运行时， $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 都不超过其额定值。由于漏电抗 $X_{\sigma 1}$ 、 $X_{\sigma 2}$ 很小，因此漏阻抗压降 $I_1 |Z_1|$ 相对于 $\dot{U}_1$ 仍是很小的，漏阻抗压降 $I_2 |Z_2|$ 相对于 $\dot{E}_2$ 也是很小的。忽略数值很小的漏阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 、 $\dot{I}_2 Z_2$ ，有 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ， $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$ ，而 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m = k E_2$ ，因此，在电源电压 $\dot{U}_1$ 及其频率 f 为额定值不变时，从空载到额定负载，一、二次磁动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 和与之成正比的主磁通 $\dot{\Phi}$ 都基本不变，即磁路饱和程度基本不变，因此励磁电流也基本不变。这表明主磁通虽然是由励磁磁动势 $\dot{F}_0$ 或励磁电流 $\dot{I}_0$ 产生的，但在给定频率下，其大小取决于一次电压 $\dot{U}_1$ 。

(二) 变压器等效电路

因变压器一、二次绕组各电磁量是磁路联系，没有电路联系，两边电动势 $\dot{E}_1 \neq \dot{E}_2$ ，电流也不匹配，为了定量地分析问题，可以利用比较简单易于计算的等效电路代替变压器电磁回路来分析变压器的运行情况，这样就需要采用折合算法。

保持二次绕组的磁动势 $\dot{F}_2$ 不变，将其匝数变换为一次绕组相同，称为二次绕组向一次绕组折合，折合后，二次侧各物理量的值称为其折合到一次绕组的折合值，用原来各物理量的符号加上一个 “'” 来表示。

折合前后，二次绕组磁动势 $\dot{F}_2$ 应不变，因此二次电流折合值为

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$

二次电动势的折合值为

$$\dot{E}'_2 = \frac{N_1}{N_2} E_2 = k \dot{E}_2$$

二次侧阻抗的折合值为

$$Z'_2 + Z'_L = \frac{\dot{E}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k \dot{E}_2}{\frac{1}{k} \dot{I}_2} = k^2 (Z_2 + Z_L)$$

设 $Z_L = R_L + jX_L$, 则有

$$R'_2 = k^2 R_2, \quad X'_{\sigma 2} = k^2 X_{\sigma 2}; \quad R'_L = k^2 R_L, \quad X'_L = k^2 X_L$$

二次电压的折合值为

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = k \dot{E}_2 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 k^2 Z_2 = k(\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2) = k \dot{U}_2$$

可见, 等效电路的表示方法就是将二次侧各电磁量通过折算, 将本来变比 k 不为 1 的变压器看成变比为 1 的变压器, 使一、二次绕组的电动势相等。二次绕组向一次绕组的折算方法为: 电压、电动势乘以变比 k , 电流除以变比 k , 阻抗乘以变比 k^2 , 折算后的各量加上 “'” 表示。下面叙述通过折合算法得出的变压器等效电路图。

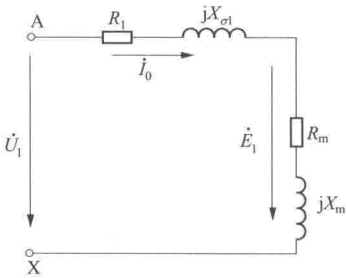


图 1-6 变压器空载运行时的等效电路

1. 变压器空载运行

为便于将电磁关系用交流电路的形式表达, 对于变压器空载运行时, 可引入阻抗 Z_m 来表示 $\dot{E}_1$ 与 $\dot{I}_0$ 之间的关系, 即

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m)$$

式中, Z_m 为励磁阻抗; R_m 为励磁电阻; X_m 为励磁电抗。

这样, 我们可以根据变压器空载运行的电压方程式及相量图得出其等效电路, 如图 1-6 所示。

2. 变压器负载运行

同理, 我们可以根据变压器负载运行的电压方程式及相量图得出其等效电路, 如图 1-7 所示。

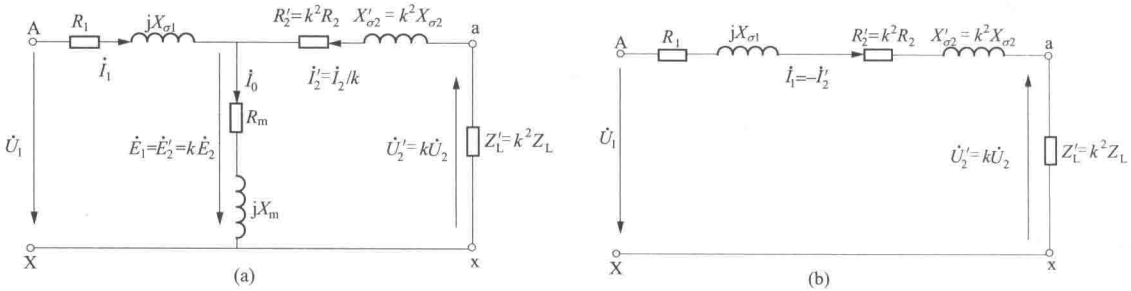


图 1-7 变压器负载运行时的等效电路

(a) T 型等效电路; (b) 简化等效电路

图中, $\dot{I}_1$ 为系统一次侧电流; $\dot{I}_0$ 为励磁电流; $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k$ 为二次侧等效电流; $Z'_L = k^2 Z_L$ 为等效负载; R_1 为一次绕组电阻; $X_{\sigma 1}$ 为一次绕组漏电抗; $R'_2 = k^2 R_2$ 为二次绕组等效电阻; $X'_{\sigma 2} = k^2 X_{\sigma 2}$ 为二次绕组等效漏电抗; $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ 为一次绕组漏阻抗; $Z'_2 = R'_2 + jX'_{\sigma 2}$ 为二次绕组等效漏阻抗; $Z_m = R_m + jX_m$ 为励磁阻抗。

由于变压器的励磁阻抗比一、二次绕组的漏阻抗大很多 ($Z_m \gg Z_1, Z_m \gg Z'_2$), 若忽略励磁电流 $\dot{I}_0$ 支路时, 可将变压器等效电路图简化为图 1-7 (b) 所示, 简化等效电路仅应用于稳态负载情况。

(三) 变压器电磁量的标幺值

一个物理量的实际值与一个同单位的固定数值的比值,称为该物理量的标幺值,该固定数值称为基准值。为使标幺值具有一定意义,通常选取各物理量的额定值作为其基准值,标幺值可在各物理量符号的下面加一条横线来表示。标幺值的概念适用于各型式变压器的运算分析,以下各章节通用。

1. 标幺值的选取

对于单相变压器,功率基准值为 S_N ,一、二次侧电压的基准值分别为 U_{1N} 、 U_{2N} ;一、二次电流的基准值分别为 I_{1N} 、 I_{2N} ;一、二次侧阻抗的基准值分别为 Z_{1N} 、 Z_{2N} ;一、二次侧电压的基准值与电流基准值的比值,即 $Z_{1N} = U_{1N} / I_{1N}$; $Z_{2N} = U_{2N} / I_{2N}$ 。

对于三相变压器,由于功率有三相和一相之分,电压和电流有线、相之分,因此在应用标幺值时应特别注意基准值的正确选取。

(1) 功率基准值:三相变压器功率的基准值仍为 S_N ,但一相功率的基准值为每相额定容量 $S_{N\phi}$, $S_{N\phi} = S_N / 3$ 。

(2) 电压、电流基准值:三相变压器一、二次侧的线电压和线电流基准值分别为一、二次额定电压 U_{1N} 、 U_{2N} 和一、二次额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} ,而一、二次侧的相电压和相电流基准值分别为一、二次额定相电压 $U_{1N\phi}$ 、 $U_{2N\phi}$ 和一、二次额定电流 $I_{1N\phi}$ 、 $I_{2N\phi}$,线值和相值的基准值之间的关系,与三相绕组的联结方式有关。

(3) 阻抗基准值:三相变压器一、二次侧的阻抗基准值 Z_{1N} 、 Z_{2N} 分别为变压器一、二次侧的相电压与相电流基准值的比值,即 $Z_{1N\phi} = U_{1N\phi} / I_{1N\phi}$; $Z_{2N\phi} = U_{2N\phi} / I_{2N\phi}$ 。

2. 标幺值的优点

标幺值是一个求相对值的概念,采用它有以下优点:

(1) 电力变压器额定容量和额定电压的范围都很大,阻抗参数若用实际值表示,也相差悬殊。但用标幺值表示时,参数和性能都在很小的范围内,便于记忆及不同变压器间的比较和分析。

(2) 标幺值便于直观地表示变压器的运行情况,例如使用电流标幺值,即可直观地看出变压器是否存在满载或过载现象。

(3) 用标幺值表示时,一个物理量的折合前后的值相等。例如:

$$R'_2 = \frac{I_{1N\phi} R'_2}{U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi} k^2 R_2}{U_{1N\phi}} = \frac{k I_{1N\phi} R_2}{U_{1N\phi} / k} = \frac{I_{2N\phi} R_2}{U_{2N\phi}} = \underline{R_2}$$

(4) 三相变压器电压、电流的线值与相值之间可能有 $\sqrt{3}$ 倍的关系。用标幺值表示时,由于线值和相值的基准值间有同样的 $\sqrt{3}$ 倍关系,因此,线值的标幺值等于相值的标幺值。同理,正弦交流量的最大值和有效值的标幺值相等,三相功率与一相功率的标幺值相等。

(5) 采用标幺值后,某些不同的物理量可具有相同的值,这也能简化计算。例如短路阻抗模的标幺值等于阻抗电压 u_k ,即

$$|Z_k| = \frac{I_{1N\phi} |Z_k|}{U_{1N\phi}} = \frac{U_{k\phi}}{U_{1N\phi}} = \underline{U_k} = u_k$$

又如,电阻 R_1 的标幺值和额定电流下该电阻上的电压降及铜耗 P_{Cu1} 的标幺值相等,即

$$\frac{R_1}{U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi} I_{1N\phi}} = \frac{I_1^2 N_1^2 R_1}{U_{1N\phi} I_{1N\phi}} = \frac{P_{Cu1}}{U_{1N\phi} I_{1N\phi}}$$

3. 标么值的缺点

标么值的缺点是物理量均无单位，因此无法用量纲关系来检查方程式或公式的正确性。

二、三绕组变压器工作原理

单相双绕组变压器的电磁关系所做的分析，在对称负载状态下分析的结论也完全适用于三相双绕组变压器，三相中每相电压、电流、电动势的大小分别相等，只是各相之间在相位上互差 $2\pi/3$ 电角度而已，分析一相就可以得到三相的情况。

而实际中常见的三相变压器为三相三绕组变压器，与双绕组变压器相比，在结构和电磁关系上各有特点，双绕组变压器中的“漏磁通”的概念已不适用于三绕组变压器，因三绕组变压器各绕组之间漏磁通存在交链的情况。因此，三绕组变压器引入了“自感、互感”的概念，即绕组之间除自感电抗外，还存在互感电抗。

(一) 变压器变比

三绕组变压器每相有高、中、低三个绕组，它们同心的套装在同一铁芯柱上，可能有三种不同电压，用于连接三个不同电压的电网，当其中一个绕组施加电压时，另外两个绕组就感应出不同的电压，如图 1-8 所示。

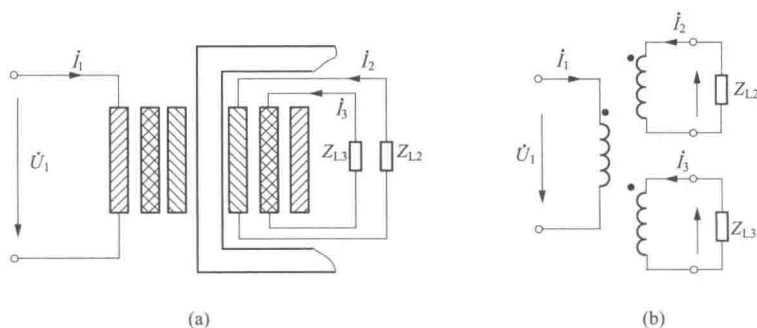


图 1-8 三绕组变压器工作原理

(a) 结构图；(b) 原理图

当三绕组变压器的一次绕组接到电压为 $\dot{U}_1$ 的电源上，二次、三次绕组开路空载运行时，若变压器一、二、三次绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 ，则三个绕组之间的变比为：一、二次绕组的变比 $k_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$ ；一、三次侧绕组的变比 $k_{13} = \frac{N_1}{N_3} = \frac{U_{1N}}{U_{3N}}$ ；二、三次侧绕组的变比 $k_{23} = \frac{N_2}{N_3} = \frac{U_{2N}}{U_{3N}}$ 。

(二) 磁动势平衡方程式

当三绕组带负载运行时，主磁通是由三个绕组的合成磁动势所产生，磁动势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_3 N_3 = \dot{I}_0 N_1$$

由于励磁电流很小，忽略 $\dot{I}_0$ 时，其磁动势方程可变为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_3 N_3 = 0$$

若把二、三次绕组折合到一次侧绕组，即 $\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_{12}}$ ， $\dot{I}'_3 = \frac{\dot{I}_3}{k_{13}}$ ，则磁动势方程式为

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = 0$$

(三) 简化等效电路

三绕组变压器简化等效电路如图 1-9 所示。

图中， $\dot{I}_1$ 为系统一次侧电流； $\dot{I}'_2$ 为系统二次侧电流； $\dot{I}'_3$ 为系统三次侧电流； $Z_1 = R_1 + jX_1$ 为一次侧等效阻抗， $Z'_2 = R'_2 + jX'_2$ 为二次侧等效阻抗， $Z'_3 = R'_3 + jX'_3$ 为三次侧等效阻抗，其中， X_1 、 X'_2 、 X'_3 分别为各自绕组的自感和绕组间的互感组合而成的等效电抗，等效电抗可视为常数。

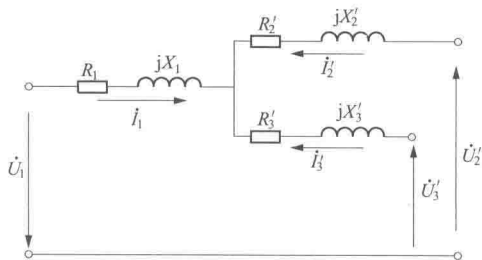


图 1-9 三绕组变压器简化等效电路

三、自耦变压器工作原理

一次侧和二次侧共用一部分绕组的变压器称为自耦变压器。与双绕组、三绕组变压器相比，自耦变压器不仅存在磁路联系，也存在电路联系。图 1-10 (a) 和图 1-10 (b) 分别为单相降压自耦变压器的结构示意图和绕组联结图，铁芯上仍套有两个同心的绕组，绕组 ax 是一、二次侧共用的，称为公共绕组，其匝数为 N_2 ，与公共绕组串联的绕组 Aa 称为串联绕组，其匝数为 N_1 ，绕组 Aa 与 ax 绕向相同。

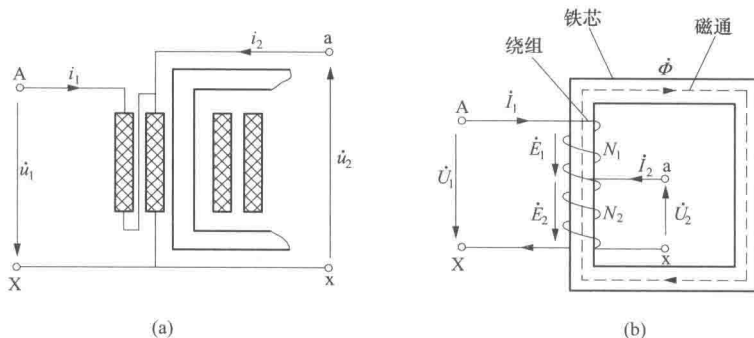


图 1-10 单相降压自耦变压器工作原理

(a) 结构示意图；(b) 绕组联结图

1. 电压关系

自耦变压器中的磁通也可分为主磁通和漏磁通，主磁通 ϕ 在串联绕组、公共绕组中感应产生的电动势为 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ ，当忽略绕组漏阻抗压降时，其一、二次侧额定相电压之比为

$$\frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} \approx \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = k_A$$

式中， k_A 为自耦变压器的变比，对于降压变压器， $k_A > 1$ 。

2. 电流关系

自耦变压器负载运行时, 具有与双绕组变压器类似的磁动势平衡关系。按照全电流定律, 自耦变压器串联绕组磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 与公共绕组磁动势 $\dot{I} N_2$ 之和为励磁磁动势 $\dot{I}_0 (N_1 + N_2)$, 即 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I} N_2 = \dot{I}_0 (N_1 + N_2)$ 。

由于 $I_0 \ll I_1$, 当忽略 $\dot{I}_0 (N_1 + N_2)$ 时, 其一、二次侧电流 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 的关系为: $\dot{I}_1 \approx -\frac{\dot{I} N_2}{N_1}$, 由于 $k_A = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = \frac{N_1}{N_2} + 1$, 故 $\dot{I}_1 \approx -\frac{1}{k_A - 1} \dot{I}$ 。

另外根据接点 a 处的电流关系 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}$ 可知

$$\dot{I}_2 = \dot{I} - \dot{I}_1 \approx \dot{I} + \frac{\dot{I}}{k_A - 1} = \frac{k_A}{k_A - 1} \dot{I}$$

由此可知, $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}$ 是反相的, $\dot{I}_2$ 与 $\dot{I}$ 是同相的 (因 $k_A > 1$), 因此电流有效值关系为 $I_1 + I = I_2$ 。即二次侧相电流有效值等于串联绕组和公共绕组的相电流有效值之和, 另外也可以得出 $\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{k_A}$ 。

3. 容量关系

从图 1-4 可以看出, 串联绕组 Aa 和公共绕组 ax 的额定容量分别为

$$S_{Aa} = U_{Aa} I_{1N} = U_{1N} \frac{N_1}{N_1 + N_2} I_{1N} = \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) S_N$$

$$S_{ax} = U_{ax} I_N = U_{2N} I_{2N} \frac{k_A - 1}{k_A} = \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) S_N$$

即自耦变压器的串联绕组和公共绕组的额定容量相等, 且都比变压器额定容量小 ($k_A > 1$)。而变压器的额定容量 S_N 为

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = (U_{Aa} + U_{ax}) I_{1N} = U_{Aa} I_{1N} + U_{ax} I_{1N} = S_{Aa} + S_{NC}$$

或
$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{ax} (I_{1N} + I_N) = U_{ax} I_{1N} + U_{ax} I_N = S_{NC} + S_{ax}$$

这表明自耦变压器的额定容量包含两部分: 一是绕组容量 $S_{Aa} = S_{ax}$, 它实质上是以串联绕组 Aa 为一次侧, 以公共绕组 ax 为二次侧的一个双绕组变压器, 通过电磁感应作用从一次侧传递到二次侧的容量; 二是传导容量 $S_{NC} = U_{ax} I_{1N}$, 它是通过电路上的联结, 从一次侧直接传递到二次侧的。传导容量不需要利用电磁感应来传递, 因此自耦变压器的绕组容量小于其额定容量。

以上是针对降压自耦变压器进行分析的, 对于升压自耦变压器, 令变比 $k_A = \frac{N_1 + N_2}{N_1} > 1$, 可得出同样的结论。

4. 自耦变压器的优缺点

(1) 优点。与相同容量的双绕组变压器相比, 自耦变压器有以下优点:

1) 消耗材料少, 成本低。对于双绕组变压器, 变压器容量等于绕组容量, 而自耦变压器的绕组容量是额定容量的 $(1 - 1/k_A)$ 倍, 因此, 在变压器容量相同的条件下, 自耦变压器的主要尺寸缩小, 有效材料硅钢片、导线和结构材料钢板等相应减少。

2) 损耗少、效益高。由于硅钢片和导线用量减少, 在同样的电流密度及磁通密度时,

自耦变压器的铜损和铁损都比双绕组变压器减少。

3) 提高了变压器的极限制造容量。变压器的极限制造容量一般受运输条件限制, 在相同运输条件下, 自耦变压器容量可比双绕组变压器制造大一些。

4) 便于运输和安装。因为自耦变压器比同容量的双绕组变压器质量轻、尺寸小、占地面积小。

(2) 缺点。

1) 可引起系统短路电流增加。由于自耦变压器一、二次绕组有磁耦合联系, 其短路阻抗值是双绕组变压器的 $(1-1/k_A)$ 倍, 因此, 系统发生短路时的短路电流比双绕组变压器大。

2) 造成调压上的困难。由于自耦变压器一、二次绕组有电的联系, 造成调压上的一些困难, 目前一般采用三台分接开关进行中部调压。

3) 继电保护配置较多, 相对复杂。

5. 自耦变压器的运行问题

(1) 由于自耦变压器高、低压侧有电的联系, 为防止高压侧单相接地故障而引起低压侧过电压, 应把三相自耦变压器的中性点可靠接地, 具体分析如下所示。

正常时, 如图 1-11 (a) 所示, U_A 、 U_B 、 U_C 为高压侧相电压; U_a 、 U_b 、 U_c 为中压侧相电压。图 1-11 (b) 为高压电网发生 A 相接地故障。如果中性点不接地, 则中性点电位升高; B、C 两相对地电压要升高到 U 。由图可见, 它比正常情况下的线电压 U_{ab} 还大。高、中压的电压比越大, 过电压倍数越大。因此, 为防止高压电网内发生单相接地故障, 在绕组上发生过电压, 自耦变压器在运行时星形接线的中性点必须接地 (或经过小电抗器接地)。

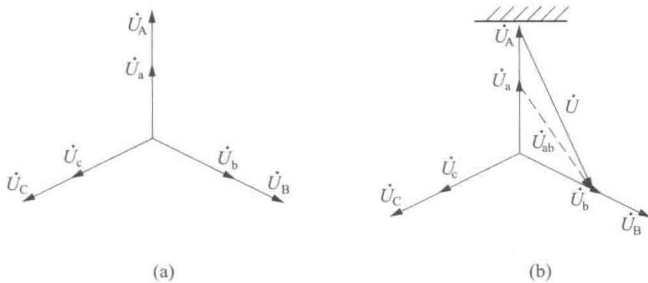


图 1-11 自耦变压器中性点不接地相量图

(a) 正常运行时; (b) A 相单相接地故障时

(2) 同三绕组变压器一样, 为改善电动势波形, 常设置一个电压较低的接成三角形的第三绕组, 主要用于消除磁通中的三次谐波分量, 该绕组可接负载或不接负载, 若不接负载只能提供三次谐波电流的通路, 以防止相电动势发生畸变。

(3) 由于高、低压侧有电路上的联系, 高压侧遭受雷电等过电压时, 也会传到低压侧, 为此, 应在两侧都装上避雷器。

第二节 电力变压器分类

电力变压器是基于电磁感应原理制造并用于电力系统中电压转变、功率传输的特殊设备, 根据生产实际需要, 可制作出不同类型和规格的电力变压器, 另外根据电磁感应原理应