

实用电工速查速算系列手册

变压器速查速算手册

方大千 等 编著

BIANYAQI
SUCHA SUSUAN SHOUCHE



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

实用电工速查速算系列手册

变压器速查速算手册

方大千 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较详细而系统地介绍了变压器的计算公式和计算方法。内容包括:变压器基本计算及试验计算,变压器运行和节能计算,变压器容量计算和负荷不对称的计算,各类变压器、调压器、互感器和电抗器设计与计算,变压器干燥处理及计算等五章。

本书公式准确、简明、实用,内容丰富。可供电气技术人员、变压器设计人员,以及变压器运行和维修电工使用,也可供大、中专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变压器速查速算手册/方大千等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2004

(实用电工速查速算系列手册)

ISBN 7-5084-1891-3

I. 变... II. 方... III. 变压器—计算—技术手册
IV. TM401-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 124726 号

书 名	实用电工速查速算系列手册 变压器速查速算手册
作 者	方大千 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京密云红光印刷厂
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 13.25 印张 356 千字
版 次	2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—5100 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

电气工作者经常涉及到电气的计算。电气计算公式和计算方法，见于各类设计手册、电工手册及电气书刊中。设计手册类的图书中，由于计算公式繁杂、参数甚多，查找使用不便，对于非技术人员则更难使用；电工手册类以数据、表格、资料为主，计算公式不多；而其他各类书刊中的计算公式很分散，不易查找；加上公式、符号等又不统一。这些都给使用者带来诸多不便。为了提高工作效率、节省时间，以适应当今时代的快节奏的工作要求，为此我们组织编写了《电工速查速算系列手册》。书中公式没有冗长的推导过程和繁多的参数，开门见山，拿来即可使用，旨在解决实际问题。参加系列手册编写工作的都是长期从事电气工作的工程技术人员，具有丰富的实践经验，因此本系列手册的实用性非常强。

《变压器速查速算手册》是一本实用的工具书。本书内容包括：变压器基本参数计算，变压器负荷率、损耗及效率计算，变压器试验计算，变压器并联运行及经济运行计算，变电所电气设备的选择，变压器负荷曲线的绘制及通风计算，变压器容量选择及安置位置的确定，变压器不对称运行铜耗计算，电力变压器、整流变压器、实验变压器工、自耦变压器、调压器、小型变压器、脉冲变压器、磁放大器、互感器和电抗器的设计与计算，变压器干燥处理及计算等。本书提供了在计算和维修中经常使用的一些技术数据，内容丰富。为便于读者应用和掌握，还列举许多计算实例。

在本书的编写过程中，力求做到准确、简明、实用，并注意

内容的先进性和新颖性。计算所涉及的标准和规定均采用最新颁布的国家标准和规定，所涉及的电器产品尽量采用新系列的产品，所用的数据也力求最新。全书采用法定计量单位和国家绘图标准。

全书由乐启昌、方大中高级工程师审校。参加编写工作的有鲍俏伟、姚志松、郑鹏、方成、方立、朱征涛、许纪秋、方亚平、姚磊和那罗丽等。全书插图由刘淳冰、方欣绘制。

限于编者的经验和水平，书中难免有错误和不妥之处，希望读者批评指正。

作 者

2004年1月

目 录

前言

第一章 变压器基本计算及试验计算	1
第一节 基本原理及计算	1
一、变压器原理及基本参数	1
二、变压器电压调整率	6
三、变压器电压变动率及效率的计算	6
四、单相自耦变压器的计算	7
五、三相自耦变压器的计算	11
六、V/V连接的变压器功率和利用率计算	20
七、变压器负荷率的计算	22
八、变压器损耗的计算	28
九、变压器负荷不平衡运行的计算	28
十、变压器技术特性优劣的判定	30
十一、变压器损耗及效率的测算	31
十二、高海拔地区对变压器的影响计算	33
十三、变压器无功经济当量的计算	33
第二节 变压器试验计算	36
一、变压器线圈直流电阻的测算	36
二、变压器空载试验的计算	39
三、变压器短路试验的计算	44
四、变压器绝缘电阻、 $\tan\delta$ 和吸收比的测算	49
五、变压器温升试验的计算	53
六、变压器变比试验的计算	56
七、变压器泄漏电流试验的计算	58
八、变压器工频耐压试验	61
第二章 变压器运行和节能计算	63
第一节 变压器并联运行计算	63

一、变压器并联运行的条件	63
二、变比相等的两台变压器并联运行的计算	63
三、变比不等的两台变压器并联运行的计算	64
四、容量不等的两台变压器并联运行的计算	67
五、不同连接组别的两台变压器并联运行的计算	69
六、同型号、同参数的变压器投入台数的确定	70
七、不同型号、不同参数的变压器投入台数的确定	70
八、并联变压器经济运行方式的判定	73
第二节 变压器经济运行计算	75
一、增设小容量变压器是否合算的计算	75
二、变压器年电能损耗的计算	76
三、判定负荷过轻的临界条件	77
四、变压器经济运行节电效益的计算	78
五、变压器是否需要更新的计算	83
六、变电所及配电网设备运行率和容载比的计算	85
第三节 变压器使用条件及计算	89
一、环境温度对变压器出力的影响及变压器过负荷的计算	89
二、根据日负荷曲线核算变压器容量是否恰当	97
三、日负荷和年负荷曲线的绘制	100
四、降低变压器温度以节约有功功率的计算	103
五、干式变压器使用条件及温升限值	104
六、油浸式和干式变压器合闸涌流的估算	106
七、封闭式变压器室通风窗有效面积查算表	107
八、室内配电装置的安全净距要求	109
九、室外配电装置的安全净距要求	112
十、10 (6) /0.4kV 变电所高、低压侧电器及母线的选择	112
十一、变电所低压屏主要电器设备的选择	118
第三章 变压器容量计算和负荷不对称的计算	120
第一节 变压器容量和安装位置的确定	120
一、变压器容量的基本估算	120
二、按综合经济效益选择变压器	124
三、采用低损耗变压器节电的计算	130
四、供照明或动力负荷变压器容量的计算	132

五、建筑施工用变压器容量的计算	133
六、农用变压器容量的计算	136
七、电力排灌站变压器容量的计算	140
八、变压器安装位置的确定	141
第二节 变压器负荷不对称附加铜耗的计算	143
一、Y, y 连接的变压器负荷不对称附加铜耗的计算	143
二、Y, yn0 连接的变压器负荷不对称附加铜耗的计算	143
三、Y, d 连接的变压器负荷不对称附加铜耗的计算	144
四、D, yn0 与 D, y 连接的变压器负荷不对称附加 铜耗的计算	144
五、变压器负荷不对称附加铜耗的通用计算公式	144
六、多台变压器负荷率不均衡附加铜耗的计算	147

第四章 各类变压器、调压器、互感器和电抗器的

设计与管理	149
第一节 电力变压器的设计与计算	149
一、常用硅钢片性能数据	149
二、常用漆包圆线和纸包扁线的规格数据	151
三、油浸式电力变压器的设计	164
四、油浸式电力变压器的设计举例	203
五、S7、SL7、S9、SH 系列变压器的技术数据	216
六、干式电力变压器的设计	224
第二节 整流变压器和试验变压器的设计与计算	231
一、整流变压器的设计	231
二、高压试验变压器的计算及选型	244
第三节 电弧炉变压器和调压器的计算	252
一、电弧炉变压器的计算	252
二、干式接触式调压器的计算	257
三、感应调压器的设计	259
第四节 小型变压器的设计与计算	268
一、单相 E 型小型变压器的设计	268
二、小型变压器的铁芯尺寸及变压器的技术数据	276
三、单相 C 型小型变压器的设计	281
四、单相控制变压器的技术数据	298

五、用于控制回路的控制变压器的选用	303
六、三相小型变压器的设计	305
七、小型自耦变压器的设计	313
八、用于小容量交直流电路的电容变压器的计算	315
九、脉冲变压器的设计	318
第五节 电焊变压器和起动用自耦变压器的设计	324
一、弧焊变压器的设计	324
二、BX1、BX2、BX3 系列交流弧焊机的性能数据及变压器 绕组数据	329
三、电动机起动用自耦变压器的设计	337
第六节 磁放大器和互感器的设计	342
一、磁放大器的设计	342
二、交流电流—电压变换器的设计	349
三、交流电流互感器的设计	353
四、直流电流互感器的设计	356
五、零序电流互感器的设计	359
第七节 电抗器的设计与计算	363
一、无气隙直流电抗器的设计	363
二、有气隙直流电抗器的设计	368
三、交流电抗器的设计	375
四、均流电抗器计算	381
五、空心电抗器计算	382
六、起动电抗器计算	388
七、平衡电抗器计算	390
第五章 变压器干燥处理及计算	392
第一节 变压器干燥处理工艺	392
一、变压器白坯线圈的热风干燥处理工艺	392
二、变压器白坯线圈的真空干燥处理工艺	393
三、油浸式变压器线圈的浸漆和干燥处理工艺	394
四、干式变压器线圈的浸漆和干燥处理工艺	395
第二节 变压器干燥处理计算	396
一、变压器不需干燥可投入运行的条件	396
二、变压器干燥的基本要求	398

三、涡流法干燥变压器的计算	399
四、利用发电机零起动升压干燥变压器的计算	403
五、零序电流干燥变压器的计算	405
六、配合干燥用电加热器的计算	407
七、电炉加热热风干燥变压器的计算	409
参考文献	411

第一章 变压器基本计算及试验计算

第一节 基本原理及计算

一、变压器原理及基本参数

1. 变压器等效电路

单相变压器（或三相变压器的一相）负载运行，如图 1-1 所示。图中箭头符号表示各有关量的正方向。

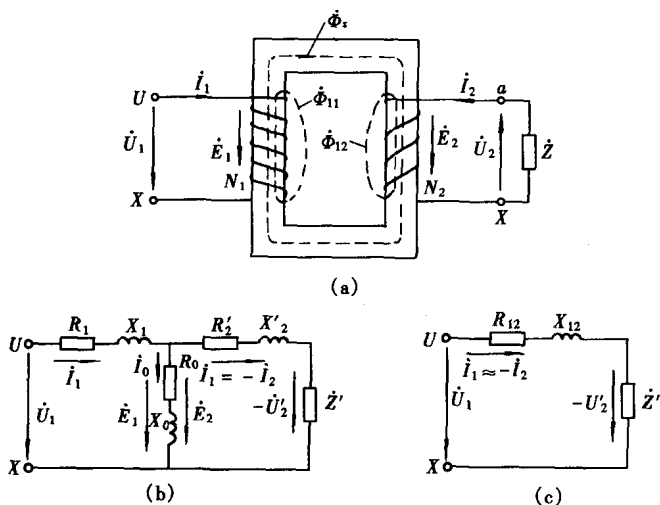


图 1-1 单相变压器负载运行图

(a) 原理图；(b) 等值电路；(c) 忽略空载电流的等值电路

(1) 变比。当变压器一次侧接到频率为 f 和电压为 U_1 的正弦电源时， U_1 、 U_2 与 f 的关系为：

$$U_1 = E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_{Zm}$$

$$U_2 = E_2 = 4.44 f W_2 \Phi_{Zm}$$

因为

$$I_1 W_1 = I_2 W_2$$

故变比 $k = k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{I_2}{I_1}$

式中 E_1 、 E_2 ——变压器一次和二次的感应电势；

f ——电源频率；

W_1 、 W_2 ——变压器一次和二次绕组的匝数；

Φ_{Zm} ——变压器铁芯磁通最大值；

I_1 、 I_2 ——变压器一次和二次电流。

(2) 容量。单相变压器的容量为：

$$P_e = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

三相变压器的容量为：

$$P_e = \sqrt{3} U_1 I_1 = \sqrt{3} U_2 I_2$$

2. 变压器基本参数及计算

(1) 变压器等效电阻。

①按变压器已知参数计算：

$$R_{12} = \frac{P_d}{3 I_{1e}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{1e}^2}{P_e^2} \times 10^3$$

$$R_{21} = \frac{P_d}{3 I_{2e}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{2e}^2}{P_e^2} \times 10^3$$

式中 R_{12} 、 R_{21} ——变压器每相等效电阻折算到一次侧值和二次侧值 (Ω)，详见表 1-1、表 1-2 和表 1-3；

P_d ——变压器额定电流时的铜耗 (kW)，可由产品目录查得；

I_{1e} 、 I_{2e} ——变压器一次和二次额定电流 (A)；

U_{1e} 、 U_{2e} ——变压器一次和二次额定线电压 (kV)；

P_e ——变压器额定容量 (kVA)。

表 1-1 S7 系列变压器的等效电阻和等效漏抗

容量 (kVA)	变压比 (kV/kV)	连接组	R_{12} (Ω)	R_{21} (Ω)	X_{D12} (Ω)	X_{D21} (Ω)
50	10/0.4	Y, yn0	35	0.056	80	0.128
100			14.5	0.0232	40	0.064
160			8.125	0.013	25	0.04
200			6.175	0.00988	20	0.032
250			4.672	0.00748	16	0.0256
315			3.497	0.00559	12.69	0.0203
400			2.6	0.00416	10	0.016
500			1.968	0.00315	8	0.0128
630			1.461	0.00234	7.94	0.0127
800			1.125	0.0018	6.25	0.01
1000			1.0	0.0016	5	0.008
1250			0.736	0.00118	4	0.0064
1600			0.547	0.00088	3.13	0.005

表 1-2 SL7 系列变压器的等效电阻和等效漏抗

容量 (kVA)	变压比 (kV/kV)	连接组	R_{12} (Ω)	R_{21} (Ω)	X_{D12} (Ω)	X_{D21} (Ω)
30	10/0.4	Y, yn0	88.889	0.14222	113.33	0.2133
50			46	0.0736	80	0.16
63			35.273	0.05637	63.49	0.1016
80			25.781	0.04125	50	0.08
100			16.5	0.0264	40	0.064
125			15.68	0.02509	32	0.0512
160			11.133	0.01781	25	0.04
200			8.5	0.0136	20	0.032
250			6.4	0.01024	16	0.0256

续表

容量 (kVA)	变压比 (kV/kV)	连接组	R_{12} (Ω)	R_{21} (Ω)	X_{D12} (Ω)	X_{D21} (Ω)
315	10/0.4	Y, yn0	4.837	0.00774	12.69	0.0203
400			3.625	0.0058	10	0.016
500			2.76	0.00442	8	0.0078
630			2.041	0.00327	7.14	0.0114
800			1.547	0.00248	5.63	0.009
1000			1.16	0.00186	4.5	0.0072
1250			0.88	0.00141	3.6	0.0058
1600			0.645	0.00103	2.81	0.0045
2000	10/6.3	Y, d11	0.495	0.19647	2.75	1.0915
2500			0.368	0.14606	2.2	0.8732
3150			0.272	0.10796	1.75	0.693
4000			0.2	0.07938	1.38	0.5457
5000			0.147	0.05834	1.1	0.4366
6300			0.103	0.04088	0.87	0.3465

表 1-3 S9 系列变压器的等效电阻和等效漏抗

容量 (kVA)	变压器 (kV/kV)	连接组	R_{12} (Ω)	R_{21} (Ω)	X_{D12} (Ω)	X_{D21} (Ω)
30	10/0.4	Y, yn0	66.667	0.10667	113.33	0.2133
50			34.8	0.05568	80	0.16
63			26.2	0.04192	63.49	0.1016
80			19.531	0.03125	50	0.08
100			12.5	0.02	40	0.064
125			11.52	0.01843	32	0.0512
160			8.594	0.01375	25	0.04
200			6.5	0.0104	20	0.032

续表

容量 (kVA)	变压器 (kV/kV)	连接组	R_{12} (Ω)	R_{21} (Ω)	X_{D12} (Ω)	X_{D21} (Ω)
250	10/0.4	Y, yn0	4.88	0.00781	16	0.0256
315			3.679	0.00589	12.69	0.0203
400			2.688	0.0043	10	0.016
500			2.04	0.00326	8	0.0078
630			1.562	0.0025	7.14	0.0114
800			1.172	0.00188	5.63	0.009
1000			1.03	0.00165	4.5	0.0072
1250			0.768	0.00123	3.6	0.0058
1600			0.566	0.00091	2.81	0.0045

②按等效电路图计算：

对于 Y, y 连接的变压器：

$$R_{12} = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2$$

$$R_{21} = R'_1 + R_2 = R_1/k^2 + R_2$$

对于 Y, d 连接的变压器：

$$R_{12} = R_1 + \frac{1}{3} k^2 R_2$$

$$R_{21} = 3R_1/k^2 + R_2$$

式中 R_1 、 R_2 ——为一次和二次的每相电阻 (Ω)； R'_1 、 R'_2 ——为一次折算到二次和二次折算到一次的每相电阻 (Ω)； k ——变压器变比。

(2) 变压器等效漏抗。变压器等效漏抗为：

$$X_D = U_d \% \frac{10Pe}{3I_e^2} = U_d \% \frac{10U_e}{\sqrt{3}I_e} = U_d \% \frac{10U_e^2}{Pe}$$

式中 X_D ——变压器每相等效漏抗 (Ω)，可以折算到一次侧 (X_{D12})，也可以折算到二次侧 (X_{D21})；

I_e 、 U_e ——同前，与 X_{D12} （或 X_{D21} ）对应，折算到一次侧（或二次侧）的电流和电压（A、kV）；

$U_d\%$ ——变压器阻抗电压百分数，可由产品目录查得；

P_e ——同前。

二、变压器电压调整率

变压器电压调整率 $\Delta u\%$ 是指一次绕组接在额定频率和额定电压的电网时，空载状况下二次电压 U_{20} 和指定功率因数下额定二次电流时二次电压 U_2 的算术差与额定二次电压 U_{2e} 的百分数，即为：

$$\Delta u\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2e}} \times 100 \approx \Delta U_a\% \cos\varphi + \Delta U_r\% \sin\varphi$$

式中 $\Delta U_a\%$ ——变压器等效电阻上的电压损失百分数，

$$\Delta U_a\% = \frac{I_{1e} R_{12}}{U_{1e}} \times 100 = \frac{I_{2e} R_{21}}{U_{2e}} \times 100\%;$$

$\Delta U_r\%$ ——变压器等效漏抗上的电压损失百分数，

$$\Delta U_r\% = \frac{I_{1e} X_{D12}}{U_{1e}} \times 100 = \frac{I_{2e} X_{D21}}{U_{2e}} \times 100\%;$$

$\cos\varphi$ ——负荷功率因数。

三、变压器电压变动率及效率的计算

1. 电压变动率

$$\varepsilon\% = \frac{U_{2e} - U_2}{U_{2e}} \times 100$$

式中 U_2 ——负载时二次电压；

U_{2e} ——同前。

电压变动率也可写为：

$$\varepsilon\% = \beta (U_a\% \cos\varphi_2 + U_r\% \sin\varphi_2) + \frac{\beta^2 (U_a\% \cos\varphi_2 - U_r\% \sin\varphi_2)^2}{200}$$

近似计算时：

$$\varepsilon\% = \beta (U_a\% \cos\varphi_2 + U_r\% \sin\varphi_2), \quad \beta = P/P_e$$

式中 β ——变压器负荷率；

P ——变压器实际输出功率 (kVA);

P_e ——同前 (kVA);

$U_a\%$ 、 $U_r\%$ ——变压器电阻电压百分数和电抗电压百分数;

$\cos\varphi_2$ ——负荷功率因数。

电压变动率是变压器的主要性能指标之一,它表示变压器的电压随负荷的变化而变化的程度。对于电力变压器, $\epsilon\%$ 值约为4~6。

2. 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

当略去变压器中阻抗电压的影响时,则效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\beta P_e \cos\varphi_2}{\beta P_e \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \times 100\% \end{aligned}$$

式中 P_2 ——变压器输出有功功率 (kW);

P_1 ——变压器输入有功功率 (kW);

P_0 ——变压器空载损耗,即铁耗 (kW);

P_d ——变压器短路损耗,即铜耗 (kW);

其他符号同前。

通常,中小型变压器的效率约95%~98%,大型变压器的效率一般在99%以上。

四、单相自耦变压器的计算

单相自耦变压器的绕组由两部分组成:一部分为一、二次侧所公用,称为并联绕组;另一部分为非公用,称为串联绕组。

1. 单相自耦变压器的电压、电流和容量关系

单相自耦变压器原理电路如图1-2所示。

忽略阻抗电压时,自耦变压器的变比:

$$k = k_{12} = U_1 / U_2 = W_1 / W_2$$

忽略空载电流时,自耦变压器变比为: