

前 言

本标准所规定的技术性能参数等与原 JB 2530—79 标准比较有如下主要变化：

- a) 浓缩本标准正文，有关型谱和技术要求详细内容均引自相应标准，不再赘述；
- b) 本标准删除了“型式容量”章节；
- c) 本标准增加额定参数一章，对额定容量、额定电压、额定电流做出规定；
- d) 本标准提出基波电压、基波电流等新的概念。由于高次谐波而增加的负载损耗，要计入总的负载损耗中并给出计算总负载损耗方法，指出此总负载损耗为产品设计的热计算和温升试验必须充分考虑；
- e) 对温升试验，提出了限值和要求，规定了试验等效电流计算公式，规定了试验方法。

本标准中的附录 A 是标准的附录，附录 B 是提示的附录。

本标准由机械工业部沈阳变压器研究所提出并归口。

本标准主要起草单位：沈阳变压器研究所、沈阳变压器有限责任公司、西安变压器厂、江西变压器厂、南通变压器厂。

本标准参加起草单位：铜川市整流变压器厂、北京变压器厂、广西柳州特种变压器厂、长江变压器厂、北京变压器二厂、无锡市电力变压器厂、上海电器股份有限公司变压器厂、沈阳市整流电炉变压器厂。

本标准主要起草人：李景华、王宁之、张洪、上官远定、徐德富、王世中、孙殿臣。

本标准 1979 年首次制定，1996 年第一次修订；

本标准实施日期起 JB 2530—79 作废；

本标准委托沈阳变压器研究所负责解释。

1 范围

本标准规定了网侧系统标称电压 220 kV 及以下的油浸式、干式电力变流变压器(以下简称变压器)的参数、试验和试验方法 标志 包装等通用技术要求

本标准适用于半导体电力变流器中的变压器,包括内附的平衡电抗器,饱和电抗器等。

本标准不适用于高压直流输变电用的变压器和单相牵引变压器。

本标准只对变压器的通用部分提出要求,各类型的变压器应根据其自身的特点,在本标准基础上编制相应标准籍以对特殊部分作出补充规定

注:对于采用其它冷却介质的变压器,可参照采用本标准。

2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成本标准条文,在本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 1094.1—1996	电力变压器 第一部分 总则(neq IEC 76—1: 1976)
GB 1094.2—1996	电力变压器 第二部分 温升(neq IEC 76—2: 1976)
GB 1094.3—85	电力变压器 第三部分 绝缘水平和绝缘试验(neq IEC 76—3: 1980)
GB 1094.5—85	电力变压器 第五部分 承受短路能力(neq IEC 76—5: 1976)
GB/T 2900.15—1997	电工名词术语 变压器 互感器 调压器 电抗器
GB/T 3859.1—93	半导体变流器 基本要求的规定(eqv IEC 146—1: 1991)
GB/T 3859.2—93	半导体变流器 应用守则(eqv IEC 146—1—2: 1991)
GB 6450—86	干式电力变压器(eqv IEC 726: 1982)
GB/T 6451—1995	三相油浸式电力变压器技术参数和要求(neq DIN 42500: 1984)
GB/T 7328—87	变压器和电抗器的声级测定 (nep IEC 551: 1976)
GB/T 13499—92	电力变压器应用导则 (eqv IEC 606: 1978)
GB/T 15164—94	油浸式电力变压器负载导则(idt IEC 354)
GB/T 10228—1997	干式电力变压器技术参数和要求
JB/T 3837—1996	变压器类产品型号编制方法

3 定义、符号

3.1 定义

本标准所采用的定义按以下标准:

GB/T 2900.15、GB 1094.1 GB/T 3859.1 和 GB/T 3859.2

3.2 符号

本标准所采用的符号规定如下:

p 脉波数;

q	换相数；
δ	与每一个初级绕组对应的同时换相的换相组数。
s	串联换相组数
g	分流 I_{dN} 的换相组数。
I'_L	网侧电流(方均根值)
I_v	阀侧电流(方均根值)；
I_d	直流电流(任意指定值)；
U_{do}	变流器约定空载直流电压；
U_{di}	理想空载直流电压；
U_{vo}	变压器阀侧空载线电压；
U_{im}	理想空载峰值电压。不计内部和外部的浪涌电压和阀的电压降，以及空载状态下，出现在臂的端子间的理想空载峰值电压，在接近于过渡电流的轻载电流处，斜率保持不变；
d_{xtN}	由变压器引起的，以 U_{di} 为基准的感性直流电压调整率；
e_{xN}	对应于 I_{PN} 的变压器短路阻抗电压感抗分量的百分数；
p. u.	标么值。

4 型号与额定参数

4.1 变压器型号

变压器型号编制按JB/T 3837 的规定。

4.2 额定直流电流

额定直流电流应在下列数值中选取：

1、2、5、10、(15)、20、(30)、(40)、50、(80)、100、(125)、(160)、200、(250)、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000、6300、8000、10000 A……。

注

- 1 当采用上列数值之外的数值时，电流大于 1000A 者可在 R20 序列内选取，小于 100A 者可在 R10 序列中选取。
- 2 带()者为非优选数值。

4.3 额定直流电压

额定直流电压应在下列数值中选取：

3、6、12、15、18、24、(30)、36、48、60、72、90、(100)、115/110、125、160、200、230/220、250、(275)、315、400、460/440、500、(600)、630、800、1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000、6300、8000、10000 V……。

注

- 1 斜线下的 110、220、440V 适用于向专一负载供电的整流器的额定直流电压，斜线上的 115、230、460 V 适用于向系统供电的整流器额定直流电压。
- 2 额定直流电压在 630V 以上，表列值不能满足使用时应在 R20 序列中选取。
- 3 带()者为非优选数值。

4.4 变压器空载直流电压

除制造厂和用户另有规定外，变压器空载直流电压应按各相应标准规定。

4.5 变压器网侧系统标称电压

变压器网侧系统标称电压根据变流器额定容量应按表1选取：

表 1 变压器网侧电压与变流器额定容量

变流器额定容量 kVA	网侧电压 kV									
	0.22	0.38	1	3	6	10	35	66	110	220
≤50	★	★	—	—	—	—	—	—	—	
>50~250	—	★	★	★	★	—	—	—	—	
>250~3150	—	—	—	★	★	★	★	—	—	
>3150~12500	—	—	—	—	★	★	★	★	—	
>12500	—	—	—	—	—	—	★	★	★	
>20000	—	—	—	—	—	—	★	★	★	

4.6 电联结

变压器常用的绕组电联结相量图与计算因数按表 2。

4.7 变压器额定参数

4.7.1 额定容量

变压器的三相额定容量以稳态基本频率正弦分量为基础，作为试验与保证值的基础，其表达式为：

$$S_R = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1$$

式中：S_R——变压器三相额定容量；

U₁——额定线电压的基波分量(方均根值)；

I₁——额定线电流的基波分量(方均根值)。

注：网侧额定非正弦负载电流 I_{PN}对应的容量，即网侧容量为电力消耗计费的依据。

温升与冷却的要求应考虑由于谐波分量所增加的负载损耗。变压器负载能力实际是温升问题,负载能力也决定了变压器的容量，以下直流负载工况可确定相应的合适容量。

- a) 负载变化迅速，峰值电流持续时间在 5 min 内，以长期负载的平均值为额定直流电流；
- b) 负载变化慢，峰值电流持续时间超过前条规定，以等效恒值直流电流为额定直流电流；
- c) GB/T 3859.1 中规定标准工作制等级见表 3，负载循环见表 4。

注

- 1 用户在询价和订货时应提出标准工作制等级或负载工况图；
- 2 上述负载工况图，当超铭牌额定值负载电流时，应按 GB/T 15164 和相关标准对电流和温度限制的规定。

4.7.2 额定电压 U₁

网侧由交流电力系统励磁，其额定电压 U₁ 按 GB 1094.1 和 GB/T 13499 的规定，阀侧额定电压为由最大连续运行直流电压决定的交流电压。

当做为逆变器运行(励磁)对变流器施以畸变波形电压时，阀侧额定电压 U₁ 为由最大连续运行电压的付里叶频谱中基波正弦分量(方均根值)确定的交流电压。

4.7.3 额定电流 I₁

额定电流 I₁ 是按 4.7.1 额定容量算出的基本频率正弦分量方均根值。

表 2 变流器电联结和计算因数

联结代号	变压器联结		阀联结 4	P	q	δ_{qs} g	网侧电 流因数 I'_L/I_d	阀侧电 流因数 I_v/I_d	U_{di}/U_{vo}	U_{im}/U_{di}	d_{xtn}/e_{xN}	变压器损耗试验时 短接的端子			变流器运行时 绕组的总损耗 16	测量 e_{xN} 时短接 的端子 17
	网侧 2	阀侧 3										A 13	B 14	C 15		
单变流器单拍联结																
1				2	2	2	0.5	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$	$0.45 \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$3.14 (\pi)$	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$	0-1	0-2	—	$0.5(P_A + P_B)$	1-2
2				3	3	3	$0.471 \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)$	$0.577 \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$	$0.675 \left(\frac{3}{\pi \sqrt{2}}\right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3}\right)$	$0.866 \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	1-2-3	—	—	$P_A + I_d^2 r_2 / 3$	1-2-3
3				6	6	6	$0.816 \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$1.35 \left(\frac{3 \sqrt{2}}{\pi}\right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3}\right)$	$1.5 \sim 0.5$	1-3-5	2-4-6	—	$0.75(P_A + P_B)$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
4				6	6	6	$0.816 \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$1.35 \left(\frac{3 \sqrt{2}}{\pi}\right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3}\right)$	$1.5 \sim 0.5$	1-2 3-4 5-6	2-3 4-5 6-1	1-3-5 和 2-4-6 的平均	$(P_A + 2P_B + 3P_C) / 6$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
5				6	3	3/2	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$0.289 \left(\frac{1}{2 \sqrt{3}}\right)$	$0.675 \left(\frac{3}{\pi \sqrt{2}}\right) \times \left(\frac{4\pi}{3 \sqrt{3}}\right)$	2.42	0.5	1-3-5	2-4-6	—	$0.5(P_A + P_B)$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
6				6	2	2/3	$0.272 \left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{3}}\right)$	$0.236 \left(\frac{1}{3 \sqrt{2}}\right)$	$0.45 \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$3.14 (\pi)$	$0.75 \sim 0.5$	1-3-5 I - II - III	2-4-6 I - II - III	—	$1.125(P_A + P_B) / 2$	1-4 2-5 3-6

表 2(续)

联结代号	变压器联结		阀联结	P	q	δ_{qs}	网侧电 流因数 $\frac{I'_L}{I_d}$	阀侧电 流因数 $\frac{I_v}{I_d}$	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{im}}{U_{di}}$	$\frac{d_{xtn}}{e_{xN}}$	变压器损耗试验时 短接的端子			变流器运行时 绕组的总损耗	测量 e_{xN} 时短接 的端子
	网侧	阀侧										A	B	C		
1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
单变流器均一双拍联结																
7				2	2	8	1	1	$0.9 \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	1-2	—	—	P_A	1-2
8				6	3	6	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.5	1-2-3	—	—	P_A	1-2-3
9				12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.26	1-3-5	2-4-6	1-3-5 2-4-6	$0.035(P_A + P_B) + 0.93P_C$	1-3-5 2-4-6 的平均
10			同 9	12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.52	—	—	1-3-5 2-4-6	$1.07P_C$	1-3-5 2-4-6
11				12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.26	1-3-5 和 2-4-6 的平均	2-3 4-5 6-1	1-2 3-4 5-6	$1.34P_A - 0.08P_B - 0.27P_C$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
12				12	3	12	$1.577 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$2.7 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0.524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0.26	1-3-5	2-4-6	1-3-5 2-4-6	$0.035(P_A + P_B) + 0.93P_C$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
13			同 12	12	3	12	$1.577 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$2.7 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0.524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0.52	—	—	1-3-5 2-4-6	$1.07P_C$	1-3-5 2-4-6

表 2(完)

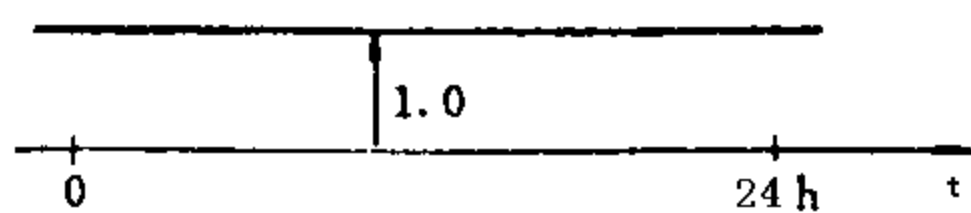
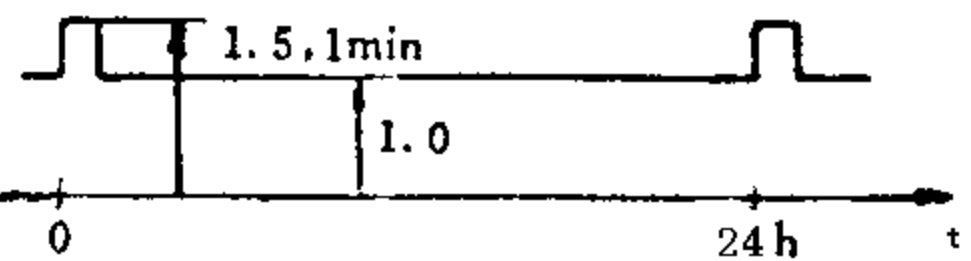
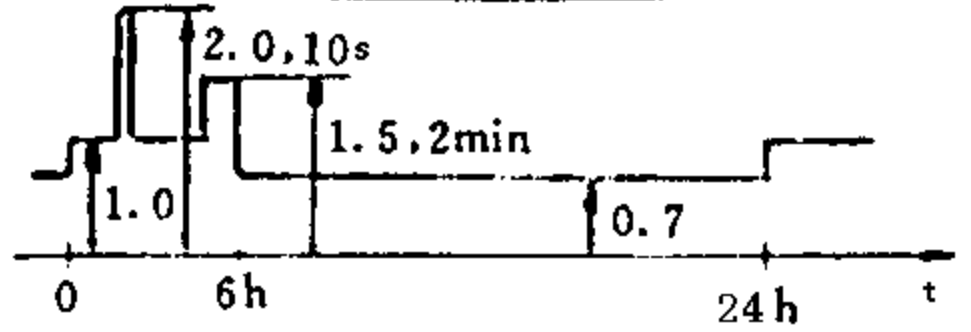
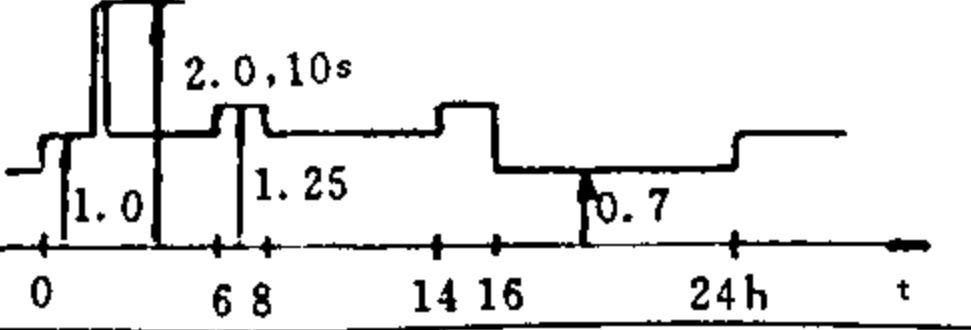
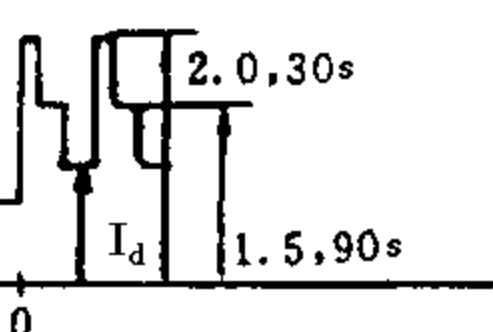
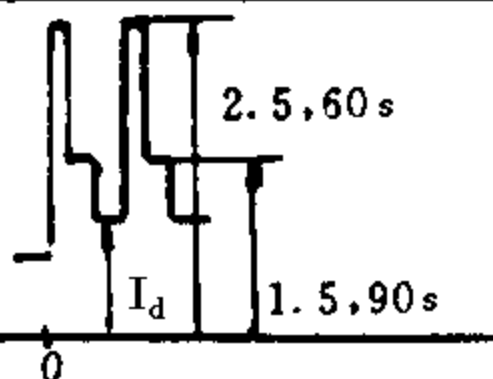
联结代号	变压器联结		阀联结 4	P 5	q 6	$\frac{\delta qs}{g}$ 7	网侧电 流因数 $\frac{I'_L}{I_d}$ 8	阀侧电 流因数 $\frac{I_v}{I_d}$ 9	$\frac{U_{di}}{U_{vo}}$ 10	$\frac{U_{IM}}{U_{di}}$ 11	$\frac{d_{xtn}}{e_{xN}}$ 12	变压器损耗试验时 短接的端子			变流器运行时 绕组的总损耗 16	测量 e_{xN} 时短接 的端子 17
	网侧 2	阀侧 3										A 13	B 14	C 15		
单变流器非均一双拍联结																
14				2	2	—	$\sqrt{\frac{\pi-a}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-a}{\pi}}$	$0.9 \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	1-2	—	—	P_A	1-2
15				6	3	—	见 GB/T 3859.2 5.3.2	见 GB/T 3859.2 5.3.2	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.5	1-2-3	—	—	P_A	1-2-3
双变流器联结																
16				见联结代号 5												
17				见联结代号 5												
18				见联结形式 8												
19				见联结形式 8												

表 3 标准工作制等级

工作制等级	变流器的额定电流和 装置的试验条件 (用 I_{dN} 的标么值表示)
I	1.0 p.u. 连续
II	1.0 p.u. 连续 1.5 p.u. 1 min
III	1.0 p.u. 连续 1.5 p.u. 2 min 2.0 p.u. 10 s
IV	1.0 p.u. 连续 1.25 p.u. 2 h 2.0 p.u. 10 s
V	1.0 p.u. 连续 1.5 p.u. 2 h 2.0 p.u. 1 min
VI	1.0 p.u. 连续 1.5 p.u. 2 h 3.0 p.u. 1 min

注：表 3 规定的各超铭牌额定电流值，均在额定电流运行达到稳定温度后再分别施加。

表 4 负载循环的例子(供选择工作制等级参考)

工作制等级	最典型的应用	按工作制等级设定的典型负载条件 负载电流以相对额定直流电流值的比表示															
I	电化学工艺等																
II	电化学工艺等																
III	轻工业和轻型牵引站应用																
IV	工业应用重型负载																
V	中型牵引站及采矿	 <table><tr><th></th><th>I_d(p.u.)</th><th>t (min)</th></tr><tr><td>0~2h</td><td>1.3</td><td>10</td></tr><tr><td>2~10h</td><td>0.8</td><td>15</td></tr><tr><td>10~12h</td><td>1.3</td><td>10</td></tr><tr><td>12~24h</td><td>0.7</td><td>30</td></tr></table>		I_d (p.u.)	t (min)	0~2h	1.3	10	2~10h	0.8	15	10~12h	1.3	10	12~24h	0.7	30
	I_d (p.u.)	t (min)															
0~2h	1.3	10															
2~10h	0.8	15															
10~12h	1.3	10															
12~24h	0.7	30															
VI	重型牵引站	 <table><tr><th></th><th>I_d(p.u.)</th><th>t(min)</th></tr><tr><td>0~2h</td><td>1.2</td><td>5</td></tr><tr><td>2~10h</td><td>0.8</td><td>6</td></tr><tr><td>10~12h</td><td>1.2</td><td>5</td></tr><tr><td>12~24h</td><td>0.7</td><td>20</td></tr></table>		I_d (p.u.)	t(min)	0~2h	1.2	5	2~10h	0.8	6	10~12h	1.2	5	12~24h	0.7	20
	I_d (p.u.)	t(min)															
0~2h	1.2	5															
2~10h	0.8	6															
10~12h	1.2	5															
12~24h	0.7	20															

5 电压分接范围和级数

- 5.1 无励磁调压变压器电压分接范围为±5%，网侧绕组宜采用有±5%的分接头。
- 5.2 有载调压或用饱和电抗器调压的变压器，调压范围及级数见相应标准。

6 变压器技术要求

- 6.1 下列技术要求应符合相应标准规定：
 - a) 正常使用条件应符合 GB 1094.1 或 GB 6450 规定；
 - b) 温升限值应符合 GB 1094.2 或 GB 6450 规定；
 - c) 承受短路能力应符合 GB 1094.5 规定；
 - d) 起铭牌负载限制应符合 GB/T 13499 或相关标准的规定；
 - e) 网侧绝缘水平应符合 GB 1094.3 或 GB 6450 规定。

- 6.2 允许偏差
技术参数允许偏差应符合表 5 规定。

表 5

项 目	允 许 偏 差	适 用 范 围
空载损耗	+15%	所有变压器
负载损耗	+20%	所有变压器
空载电流	+30%	所有变压器
阻抗电压	±15%	所有变压器(额定分接)
变压比	±1%	所有变压器(额定分接)
直流电阻不平衡率	见注2	所有变压器
注： 1 额定直流电压 250 V 及以下的变压器的变压比(额定分接)允许偏差为± $\frac{1}{2}$ %； 2 变压器产品的直流电阻不平衡率不予规定，但制造单位应在出厂试验记录中给出实测值和测试温度； 3 内附的平衡电抗器的总损耗的允许偏差为+30%； 4 内附的其他电抗器性能参数允许偏差见各相应标准。		

- 6.3 阀侧绕组和内附电抗器(如果有)对地和各支路间绝缘外施工频试验电压按表 6，持续时间 1 min。

表 6

额定直流电压 V	外施工频试验电压(方均根值) kV
≤100	2
>100~800	3
>800~1250	5
>1250~2000	7
>2000~4000	12
>4000	由制造厂与用户协商

7 试验

7.1 试验分类

本标准所规定的试验分为例行试验、型式试验和特殊试验三类。

例行试验是对每台变压器都应经受的试验。

型式试验是对每种型式变压器的一台进行的试验，用它验证按同一技术规范制造的变压器均应满足除例行试验外所规定的要求。当更改结构、原材料或工艺方法时，应重新进行部分或全部型式试验。

特殊试验是一种既不同于型式试验，也不同于例行试验的试验。它是由制造厂和用户协商确定的。

7.2 试验要求

7.2.1 对于例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求，应符合 GB 1094.1 或 GB 6450 的规定。

7.2.2 例行试验项目及要求

- a) 绕组电阻测量(按 GB 1094.1)；
- b) 电压比测量和联结组编号检定(按 GB 1094.1)；
- c) 空载电流和空载损耗测量(按 GB 1094.1)；
- d) 短路阻抗和负载损耗测量(按 8.1)；
- e) 绕组对地绝缘电阻和绝缘系统电容的介质损耗因数($\tan\delta$)的测量(按 GB/T 6451 和 GB/T 10228)；
- f) 绝缘例行试验(按 GB 1094.3 和 GB 6450、GB/T 6451、GB/T 10228)；
- g) 有载分接开关的试验(按 GB 1094.1)；
- h) 绝缘油试验(按 GB 1094.1)；
- i) 密封试验(按 GB 6451)；
- j) 冷却装置控制箱试验(按相应标准)；
- k) 电抗器试验(按相应标准)；

7.2.3 型式试验项目及要求

- a) 换相电抗的测定(按 8.3)；
- b) 绝缘型式试验(按 GB 1094.3 和 GB 6450、GB/T 6451、GB/T 10228)。

7.2.4 特殊试验项目及要求

- a) 绝缘特殊试验(按 GB 1094.3 和 GB 6450)；
- b) 温升试验(按 8.4)；
- c) 短路承受能力试验(按 GB 1094.5)；
- d) 声级测定(按 GB/T 7328)；

如果用户另有要求(如试验方法不按本标准的规定，或规定了其它试验项目)，则应按定货合同规定。

8 试验方法

8.1 短路阻抗和负载损耗的测量

短路阻抗是在 I_{PN} 电流下，按表 2 中第 17 栏短接绕组端子进行测量。负载损耗的测量是在额定电流 I_1 下进行，表 2 给出了试验用的一些合适的短路接线，负载损耗测量是在每个短路组合 A、B 和 C 下测出的损耗值 P_A 、 P_B 和 P_C 按 16 栏中公式计算出，并校正到参考温度，此值为保证值。

注：短路阻抗值 e_{xN} 是对应两侧 I_{PN} 电流下阻抗电压的感抗分量百分数。

8.2 平衡电抗器应经受下列例行试验，接线见图 1：

- a) 用 150 Hz 及 n—p 之间的额定电压进行空载试验；

注：如果用其他频率进行实验，则响应的标准内应注明在其他频率下的空载损耗

- b) 测量 n—0 p—0 之间直流电阻，由直流电阻之和与 1/2 额定直流电流的平方乘积算出其损耗；
- c) 测定 n—0 与 p—0 之间的变化(必要时进行)。

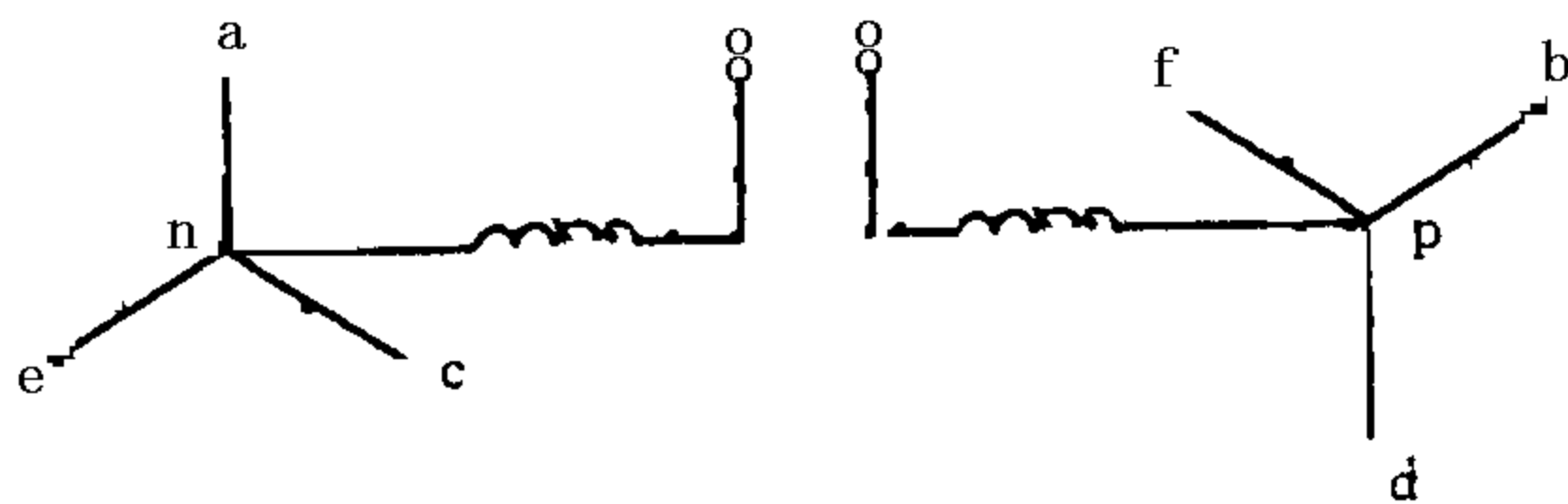


图1

8.3 换相电抗测定

将网侧端子短接，在阀侧绕组的同一换相组的两相邻绕组中通以额定频率的交流电流测量端子间电压，由测量结果算出阻抗值，取其感抗分量即得换相电抗 $2X_1$ ，以 Ω 计，对同一换相组，应在不同绕组对上，至少两次，并取这些测量结果的算术平均值作为测定的换相电抗值

8.4 温升试验

8.4.1 温升试验的程序

a) 油浸式变压器按GB 1094.2 规定进行。

b) 干式变压器按GB 6450 规定进行。

但所施加的总损耗和试验电流值应按8.4.2 和 8.4.3 的规定。

8.4.2 总损耗

总损耗是计算得出的，由已测得的空载损耗和额定畸变的非正弦电流产生的参考温度下的负载损耗之和(油浸式包括有内阻电抗器的损耗)。

注：由于电流非正弦畸变波形，高次谐波使得试验电流和总损耗增加，计算方法见附录A (标准的附录)、附录B (提示的附录)

8.4.3 试验电流

绕组中施加的等效试验电流，应按下式计算出：

$$\text{双绕组变压器: } I_{eq} = I_1 \times \left[\frac{I_{LN}(R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2(R_W + R_C) + P_{WE1}} \right]^{0.5}$$

$$\text{三绕组变压器: } I_{eq} = I_1 \times \left[\frac{I_{WN}(R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2(R_W + R_C) + P_{WE1}} \right]^{0.5}$$

式中： I_{eq} ——等效试验电流

I_1 ——额定电流基波分量 (方均根值)，

I_{LN} ——额定非正弦线电流 (方均根值)，由计算的得出 (见附录B)；

I_{WN} ——受试绕组额定电流 (方均根值)，由计算的得出 (见附录B)；

P_{WE1} ——额定电流 I_1 下的绕组涡流损耗；

F_{WE} ——绕组涡流损耗增加系数，由计算得出 (见附录B)；

R_W ——绕组电阻值；

R_C ——连接线电阻值；

8.4.4 双绕组变压器

双绕组变压器，如有两个容量、额定电压和阻抗电压相同交错排列的二次绕组，试验时两个二次侧端子同时短接，一次绕组施加正弦基波等效电流 I_{eq} 测定绕组温升。

8.4.5 多绕组变压器

三绕组变压器一般有两个额定容量相同的二次绕组,二次侧结成双反星形带有平衡电抗器或是星一角联结,试验方法有:二次绕组端子全部短接,施加一次绕组等效试验电流 I_{eq} 测定一次绕组温升,此时二次绕组温升须校正;或二次绕组等效试验电流 I_{eq} 值是依次施加的,即二个二次绕组端子依次短接,由一次绕组施加使二次绕组达到等效试验电流 I_{eq} 值,测定一次绕组温升。

8.5 变压器组件

如有载分接开关或无励磁开关、套管、冷却器、气体继电器、压力释放阀等应按相应标准进行单独试验。

9 标志、包装和运输

9.1 变压器标志

变压器应有铭牌及标志,按 GB 1094.1 规定。

注:

- 1 联接组标号如因移相不能表示时应标出绕组连接简图和相量图。
- 2 额定容量只标出网侧额定非正弦负载下的容量。

9.2 其他标志

除按 9.1 要求外,变压器还应标志下列内容:

- a) 饱和电抗器最大控制电流和直流压降范围(内附饱和电抗器时);
- b) 电流互感器技术数据(内附电流互感器时);
- c) 额定直流空载电压(需要时);
- d) 额定直流电流(需要时);
- e) 调压变压器(如内附有调压变压器)必要数据。

9.3 运输、包装

油浸式变压器,包装运输按 GB/T 6451 的规定。

干式变压器,包装运输按 GB/T 10228 的规定。

畸变电流波形下的变压器负载损耗确定

变压器的负载损耗,包括直流电阻损耗(I^2R 损耗),和附加损耗,即绕组和引线中的涡流损耗及变压器金属结构件中的杂散损耗。

对于具有低电压大电流绕组的变压器,在电流数 kA 范围下,内部的大电流引线需要单独进行附加涡流损耗的分析。

A1 负载损耗的确定原理

本标准所用的原理是按下述认识确定的:

a) 绕组连接线以及由铜或铝制成的静电屏均是线性元件,它们的损耗与电流的平方成正比:

$$P(I) = \text{常数} \times I^2$$

b) 对于用导磁钢作成的屏蔽,也有类似的上述关系,即:

$$P(B) = \text{常数} \times B^2$$

式中: B 为磁屏蔽中的磁密。

c) 对于金属结构件中的杂散损耗,应用平方关系式也有一定的准确性:

$$P(B) = \text{常数} \times B^2$$

式中: $B^2 = \text{常数} \times I^2$

在正常运行时,变压器负载电流是非正弦波形。因此,当按付里叶级数展开后,它具有可观的谐波电流。这个非正弦波的电流使涡流损耗和杂散损耗增加,从而使纯正弦电流波形下的总损耗计算值或测量值明显地加大。

要对额定正弦电流负载下的损耗值进行校正,在以下的计算中需要知道额定非正弦负载下的谐波电流频谱。在没有这方面的规定信息时,谐波频谱应根据 GB/T3859.2 的规定得出。

用下述规则,可以将试验中测得的损耗值换算到规定的变流器负载下的损耗值。

它们之间的变量和关系一览表:

I_L : 变压器非正弦线电流的方均根值;

I_{LN} : 电流 I_L 在变流器额定负载下的方均根值;

I_{PN} : 额定负载下一次侧非正弦相电流的方均根值;

I_{SN} : 额定负载下二次侧非正弦相电流的方均根值;

I_{PT} : 负载损耗试验一次侧相电源的方均根值;(作为施加总负载损耗的初步近似值)

I_{ST} : 负载损耗试验时二次侧相电源(六相)的方均根值;

I_{WN} : 受试绕组额定电流的方均根值;

I_Y : Y 次谐波电流的方均根值;

I_P : 一次侧正弦相电流,其方均根值等于 I_{PN} ;

I_S : 二次侧正弦相电流,其方均根值与 I_{SN} 相等;

I_1 : 额定负载下基波电流的方均根值;(即等于变压器额定电流);

I_{eq} : 决定绕组温升的等值正弦试验电流的方均根值;

I_{dN} : 额定直流电流;

U_{d0} : 空载直流电压;

Y : 谐波次数;

P_0 : 额定电压下的空载损耗;

P_N : 电流 I_{LN} 下的变压器负载损耗;

P_1 : 电流 I_1 下的变压器负载损耗;

P_W : 电流 I_L 下的绕组损耗;

$P_{W\gamma}$: 电流 I_γ 下的绕组损耗;

P_{W1} : 电流 I_1 下的绕组损耗;

P_{WP} : 电流 I_{LN} 下的一次绕组损耗;

P_{WS} : 电流 I_{LN} 下的二次绕组和相连母线的总损耗;

P_{WE} : 电流 I_L 下的绕组涡流损耗;

$P_{WE\gamma}$: 电流 I_γ 下的绕组涡流损耗;

P_{WE1} : 电流 I_1 下的绕组涡流损耗;

P_C : 电流 I_L 下的连接线损耗;

$P_{C\gamma}$: 电流 I_γ 下的连接线损耗;

P_{C1} : 电流 I_1 下的连接线损耗;

P_{CE} : 电流 I_L 下的连接线涡流损耗;

$P_{CE\gamma}$: 电流 I_γ 下的连接线涡流损耗;

P_{CE1} : 电流 I_1 下的连接线涡流损耗;

P_{SE} : 电流 I_L 下金属结构件杂散损耗;

R_W : 绕组直流电阻;

R_C : 连接线直流电阻;

F_{CE} : 连接线的涡流损耗增加系数;

F_{SE} : 金属结构件杂散损耗增加系数;

F_{WE} : 绕组涡流损耗增加系数;

K_{WE} : 绕基波频率下涡流损耗增加系数;

x : 计算涡流损耗、杂散损耗增加值时的用于频率谐波数的指数幂;

$$I_L^2 = \sum_1^n I_\gamma^2$$

$$P_{WE} = \sum_1^n P_{WE\gamma} = F_{WE} \times P_{WE1} = P_W - R_W \times I_1^2$$

$$P_{WE1} = P_{W1} - R_W \times I_1^2$$

$$P_{CE} = \sum_1^n P_{CE1} = F_{CE} \times P_{CE\gamma} = P_C - R_C \times I_L^2$$

$$P_{CE1} = P_{C1} - R_C \times I_1^2$$

$$F_{SE} = F_{CE}$$

$$K_{WE} = \frac{P_{WE1}}{R_W \times I_1^2} \text{ (标么值)}$$

变压器额定电流 I_1 下的负载损耗, 可分成以下几项:

1) 绕组及连接线的电阻 R_W 和 R_C 中的 $I_1^2 R$ 损耗, (测量值);

2) 绕组中的涡流损耗, P_{WE1} (计算值);

3) 大电流母线中的涡流损耗, 用 P_{CE1} 表示, (推导出);

4) 金属结构件中感应的杂散损耗, P_{SE1} (推导出);

P_{CE1} 与 P_{SE1} 总和为从测得的总损耗中减去上述 1) 和 2) 两项后的剩余值。以下关系式成立:

$$P_1 = I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1} + P_{CE1} + P_{SE1}$$

$$P_N = I_{LN}^2 (R_W + R_C) + P_{WE} + P_{CE} + P_{SE}$$

$$=I_{LN}^2(R_w+R_c)+F_{WE}\times P_{WE1}+F_{CE}\times P_{CE1}+F_{SE}\times P_{SE1}$$

注：

- 1 额定非正弦变压器负载下的连接线涡流损耗和结构线上的杂散损耗,为 P_{CE1} 与 P_{SE1} 乘以增加系数 $F_{CE}=F_{SE}$ 。
- 2 变压器不同绕组可能有不同的额定容量，因而绕组 I^2P 损耗和涡流损耗的比例也不同。上式中的各个分量应理解为每个绕组各自计算值的总和。
- 3 电阻测量值，特别是当二次侧电压低而电流大时，可能会有误差，因为：
 - a) 测量低电阻时很困难。
 - b) 短路装置起影响。

A2 绕组排列对绕组内部涡流损耗的影响

对于三绕组变压器，在计算金属构件中的涡流损耗和绕组涡流损耗时就应考虑绕组排列的影响。在计算负载损耗中谐波的影响时，应考虑两种情况，

1) 对于一次绕组径向地位于两个阀式绕组之间的双同心变压器（忽略两个阀绕组的磁耦合）；

对于一次绕组，电流的谐波分量定义为

$p\times k$ ，其中：P为脉波数， $k=1, 2, \cdots n$ 。

对于两个阀式绕组，其谐波分量定义为：

$(p/2)\times k\pm 1$ ， $(p/2)$ 为一个三相阀式绕组的脉波数， $k=1, 2, \cdots n$ 。

2) 对于具有两个实际绕组的变压器，其中外部的大电流绕组是由两个阀式绕组组成，它们是作交错式结构。它们或是被连成一个 d 和一个 y 绕组；或是两个 y 接绕组。（阀式绕组之间的磁耦合实际上为100%）。

对所有这些绕组，其谐波分量定义如下：

$p\times k\pm 1$ ，其中，P为脉波数： $k=1, 2, \cdots n$ 。

比较附录，B中例1和例2。

注：y 接和 d 接的阀侧绕组均是各自接至六脉波换相组上。

畸变电流负载下的变压器负载损耗确定与计算实例

变压器负载损耗是在额定基波频率电流 I_1 下测得的，用此测量值确定在额定畸变电流负载下变压器负载损耗。

绕组损耗关系式：

$$P_{W1}=R_W\times I_1^2(1+K_{WE}\times 1^x)$$

$$P_{W2}=R_W\times I_2^2(1+K_{WE}\times 2^x)$$

:

:

$$P_{W7}=R_W\times I_7^2(1+K_{WE}\times \gamma^x)$$

$$P_W=R_W\times I_L^2+R_W\times K_{WE}\times \sum_1^n I_i^2\times \gamma^x$$

因此有：

$$\frac{P_W-R_W\times I_L^2}{P_{W1}-R_W\times I_1^2}=\sum_1^n (I_i/I_1)^2\times \gamma^x$$

绕组指数 $x=2$ ，则涡流损耗增加系数为：

$$F_{WE}=\sum_1^n (I_i/I_1)^2\times \gamma^2$$

在大电流母线连接系统中，损耗计算同样按绕组计算方法，但指数 x 较低，取 $x=0.8$ ，则引线涡流损耗增加系数为：

$$\frac{P_C-R_C\times I_L^2}{P_{C1}-R_C\times I_1^2}=\sum_1^n (I_i/I_1)^2\times \gamma^{0.8}=F_{CE}$$

令金属构件中杂散损耗系数与连接母线涡流损耗增加系数相等，即为：

$$F_{SE}=\frac{P_{SE}}{P_{SE1}}=F_{CE}$$

损耗计算方法有：

a) 绕组损耗 P_{W1} 取其测得电阻损耗 $I_1^2\times R_W$ 与计算得到的涡流损耗 P_{WE1} 之和。

$$P_{W1}=(I_1^2\times R_W)+P_{WE1}$$

b) 连接导线中涡流损耗与金属构件中杂散损耗之和等于测得的总损耗 P_1 减去据 a) 项得到的绕组损耗 P_{W1} 再减去测得的连接线电阻损耗 $I_1^2\times R_C$ ，即 $P_{CE1}+P_{SE1}=P_1-(P_{W1}+I_1^2\times R_C)$

额定畸变电流下的总损耗：

$$P_N=I_{LN}^2(R_W\times R_C)+(F_{WE}\times P_{WE1})+F_{CE}\times (P_{CE1}+P_{SE1})$$

所有损耗均修正到参考温度下的损耗。

例 1 变压器额定参数

	一次侧	二次侧
额定容量[kVA]	18180	2×12850
系统额定电压[kV]	30	$\sqrt{3}\times 0.303$
额定相电流[A]	$I_{P1}=350$	$I_{S1}=14128$
联结	Y	yy

平衡电抗器装在同一油箱中：

变流器额定值： $U_{do}=354\text{ V}$
 $I_{dN}=50000\text{ A}$

额定负载下谐波分量：

谐波次数	γ	I_r/I_1
1		1
5		176.0×10^{-3}
7		110.0×10^{-3}
11		44.7×10^{-3}
13		26.4×10^{-3}
17		11.8×10^{-3}
19		10.6×10^{-3}
23		8.7×10^{-3}
25		8.6×10^{-3}

$$(I_{PN}/I_{P1})^2=\sum_1^{25}(I_r/I_1)^2=1.046=(I_{LN}/I_{P1})^2$$

$$I_{PN}/I_{P1}=1.023$$

$$I_{PN}=1.023\times350=358\text{ [A]}$$

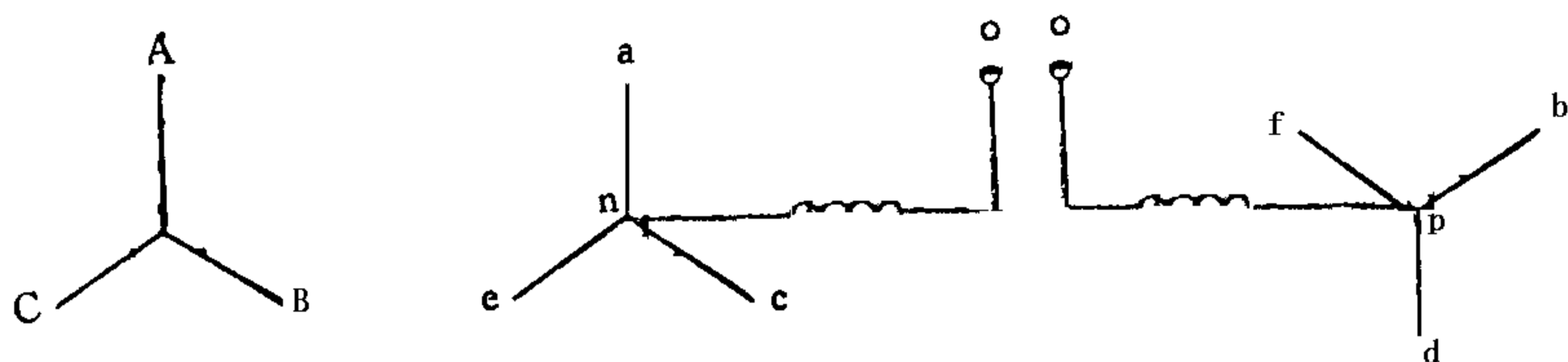
$$I_{SN}=1.023\times14128=14450\text{ [A]}$$

$$F_{WE}=\sum_1^{25}[(I_r/I_1)^2\times\gamma^2]=2.89$$

$$F_{CE}=F_{SE}=\sum_1^{25}[(I_r/I_1)^2\times\gamma^{0.8}]=1.19$$

从试验中得出绕组温度为 20℃时的电阻测量值见下表：

连接端子(见图 B.1)	测得的相电阻	校正到 75℃时的值 Ω
A—B—C	$\frac{1}{2}\times\frac{0.1468+0.1463+0.1457}{3}=73.13\times10^{-3}$	38.9×10^{-3}
a—c—e	$\frac{1}{2}\times\frac{869+905+867}{3}\times10^{-7}=44.0\times10^{-6}$	53.5×10^{-6}
b—d—f	$\frac{1}{2}\times\frac{875+907+876}{3}\times10^{-7}=44.3\times10^{-6}$	53.8×10^{-6}
0—n	14.7×10^{-6}	17.9×10^{-6}
0—p	13.6×10^{-6}	16.5×10^{-6}



图B.1 端子标志

在绕组温度为 75℃， 50 Hz 及额定电流 $I_{p1}=350\text{ A}$ $I_{s1}=14128\text{ A}$ 时测得的负载损耗：
 $P_1=124.3\text{ kW}$

变压器绕组和连结在额定电流下75℃时的

一次侧：A—B— $I^2R=3\times350^2\times88.9\times10^{-3}=32.7\text{ kW}$
 二次侧：a—c—e $I^2R=3\times14128^2\times53.5\times10^{-6}=32.0\text{ kW}$
 二次侧：b—d— $I^2R=3\times14128^2\times53.8\times10^{-6}=32.2\text{ kW}$
 $\sum 96.9\text{ kW}$

绕组和连接线：

75℃时 计算出的绕组涡流损耗：
 $\frac{3.4\text{ kW}}{\sum 100.3\text{ kW}}$

变压器连接线中涡流损耗加上金属结构件中的杂散损耗：

$P_{CE1}+P_{SE1}=P_1-(\sum I_1^2R+P_{WE1})=124.3-100.3=24\text{ kW}$

畸变电流下变流变压器中的总负载损耗：

$P_N=(1.046\times96.9)+(2.89\times3.4)+(1.19\times24)=140\text{ kW}$

平衡电抗器负载损耗：

$I^2R=25000^2\times(17.9+16.5)\times10^{-6}=21.5\text{ kW}$

例 2 变压器额定

	一次侧	二次侧	
额定容量 [kVA]	8310	4323	4280
系统额定电压 [kV]	6.3	0.588	0.582
额定相电流 [A]	$I_{p1}=762$	$I_{s1}=4246$	$I_{s1}=4246$
连接	D	d	

二次侧串联连有两个6脉波桥式整流电路

变流器额定值： $U_{do}=1580\text{ V}$

$I_{dN}=5200\text{ A}$

额定负载下谐波分量:

谐波次数 γ	(I_γ/I_1)
1	1
11	71.8×10^{-3}
13	55.2×10^{-3}
23	15.0×10^{-3}
25	11.7×10^{-3}

$$\sum_1^{25} (I_\gamma/I_1)^2 = 1.008 = (I_{PN}/I_{P1})^2;$$

$$I_{PN}/I_{P1} = 1.0$$

$$F_{WE} = \sum_1^{25} (I_\gamma/I_1)^2 \times \gamma^2$$

$$F_{CE} = F_{SE} = \sum_1^{25} (I_\gamma/I_1)^2 \times \gamma^{0.8} = 1.06$$

从试验中得出测量值见下表:

连结端子(见图2)	测得的相电阻, 校正到每相在21.5℃时的值	校正到75℃时的值
A-B-C	$1.5 \times 17.5 \times 10^{-3} = 26.3 \times 10^{-3}$	31.7×10^{-3}
a-c-e	$1.5 \times 0.374 \times 10^{-3} = 0.561 \times 10^{-3}$	0.678×10^{-3}
b-d-f	$0.5 \times 0.378 \times 10^{-3} = 0.189 \times 10^{-3}$	0.228×10^{-3}

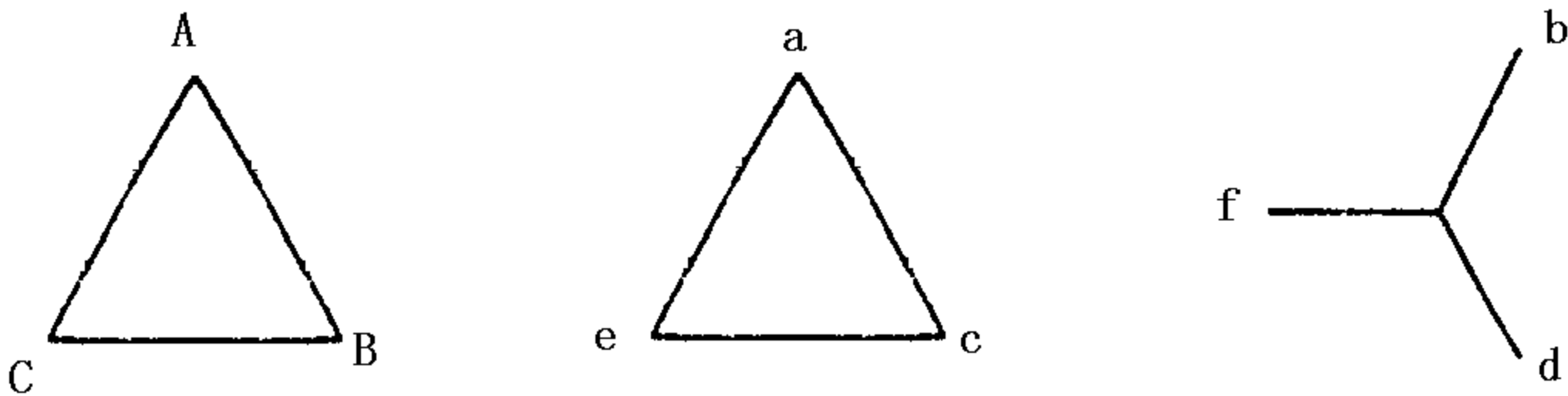


图 B 2 端子标志

温度为 75℃, 50 Hz, 额定电流 $I_{P1}=726\text{ A}$ 及 $I_{S1}=4246\text{ A}$ 时测得的负载损耗:

$$P_1 = 50.92\text{ kW}$$

一次侧 A-B-C: $I^2R = 3 \times 438.7^2 \times 31.7 \times 10^{-3} = 18.39\text{ kW}$

二次侧 a-c-e : $I^2R = 3 \times 2452^2 \times 0.678 \times 10^{-3} = 12.22\text{ kW}$

二次侧 b-d-f : $I^2R = 3 \times 4246^2 \times 0.228 \times 10^{-3} = 12.33\text{ kW}$
 $\sum 42.94\text{ kW}$

75℃时算出的绕组涡流损耗:

$$\frac{1.39\text{ kW}}{\sum 44.33\text{ kW}}$$

变压器连线中的涡流损耗加上结构件中的杂散损耗：

$$P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - (\sum I_1^2 R + P_{WE1}) = 50.92 - 44.33 = 6.59 \text{ kW}$$

畸变电流下变压器的总损耗：

$$P_N = 42.94 + (2.34 \times 1.39) + (1.06 \times 6.59) = 53.18 \text{ kW}$$

注：在例 1 和例 2 进行的计算中，每相的两个二次阀侧绕组接近于 100% 磁耦合。因此，计算 $P_{CE} + P_{SE1}$ 时，在例 1 中为 6 脉波，在例 2 中为 12 脉波。

变压器的另一种设计方法可能是使其两个二次阀侧绕组间的磁耦合为零。此时，在这种设计中需要计算 F_{WE} 和 F_{CE} 。因此，计算是以例 1 中的 3 脉波和例 2 中的 6 脉波为基础的。
