

附件 1

ICS 23.140

J 72

JB

中华人民共和国机械行业标准

JB/T XXXX—202X

高阻抗电力变压器能效分级及评定方法

Energy efficiency grades and evaluation method for high-impedance
power transformers

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前 言	I
引 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	2
5 限值与分级	2
6 试验要求	8
附录 A（资料性） 三绕组电力变压器联合运行损耗的近似计算	9
附录 B（资料性） 三绕组高阻抗电力变压器联合运行损耗要求	12
参考文献	15
表 1 35kV 级三相双绕组高阻抗电力变压器	3
表 2 66kV 级三相双绕组高阻抗电力变压器	3
表 3 110kV 级三相双绕组高阻抗电力变压器	4
表 4 220kV 级三相三绕组高阻抗电力变压器	4
表 5 220kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器	5
表 6 330kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器	5
表 7 500kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器	6
表 8 750kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器	6
表 9 不同额定容量下基于最小 PEI 值规定的能效等级	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由XX提出并归口。

本文件起草单位：XX

本文件主要起草人：XX

本文件为首次发布。

引 言

随着电网规模持续扩大，对电力系统稳定性和可靠性的要求愈发严苛。更高阻抗的电力变压器凭借自身独特的性能优势，能够有效限制短路电流，当电网发生短路故障时，它可以大幅降低短路电流的大小，减轻对电网设备的冲击，从而保障电力系统的安全稳定运行。高阻抗电力变压器近年来在国内外电网中获得日益广泛的应用，并逐步成为市场主流电力变压器类型之一。

因此根据短路阻抗大小，电力变压器可分为常规阻抗电力变压器与高阻抗电力变压器两大类。

GB 20052-2024《电力变压器能效限定值及能效等级》未完全覆盖高阻抗电力变压器，未对超出标准要求的高阻抗电力变压器能效要求予以限定，因此，高阻抗电力变压器能效评定缺乏标准依据。本文件对高阻抗电力变压器的能效要求进行补充，对部分参数进行细化，可以作为相关方进行产品设计、选型和能效评定的依据。

对于标准容量的高阻抗电力变压器，本文件给出了一定的短路阻抗范围。这些短路阻抗数值的确定，一方面考虑可能流经线路端子短路电流的大小，以匹配选择具有相应安全关合和开断能力的开关等设备；另一方面也考虑产品本身的制造成本和短路承受能力，以供相关方选择参考。而因调压方式不同所导致的损耗差异通常是极小的，因此本文件规定的损耗值同时适用于有载调压或无励磁调压方式。对于非标容量的高阻抗电力变压器，其空载损耗和负载损耗值可参照本文件按线性插值法进行折算。

同时，本文件参照IEC TS 60076-20 引入峰值效率指数（PEI）的概念以及按PEI划分能效等级的方法。相比于直接限定变压器空载损耗和负载损耗大小的方法，限定变压器最小PEI值的方法具有更大的灵活性，从而增强供应商提供给用户全生命周期成本最优变压器的可能性。具体采用何种方法（确定的空载损耗和负载损耗限值或最小PEI值）评定变压器的能效等级，由供应商和采购方协商。当采用最小PEI值评定变压器能效等级时，采购方应在招标阶段确定损耗值。

基于高阻抗电力变压器的运行特点，部分产品内部金属结构件的杂散损耗、绕组涡流损耗较大，尤其是三绕组高阻抗电力变压器，其高低损耗、中低损耗相对较大，联合运行损耗一般远高于高中负载损耗，实际运行时能耗相对较高。本文件在附录A中给出三绕组电力变压器联合运行损耗计算的公式，损耗计算结果通过损耗仿真完成验证，在附录B中提供了高中损耗、高低损耗和中低损耗的参考限值，可一定程度上约束变压器联合运行损耗的大小，进而能有效地降低产品在实际运行中的能耗，促进产品低碳节能。

高阻抗电力变压器能效等级

1 范围

本文件规定了高阻抗电力变压器能效等级的总体要求、限值与分级和试验要求。

本文件适用于额定频率为 50Hz，额定容量为 25000kVA 及以上，电压等级为 35kV~750kV 的液浸式高阻抗电力变压器能效分级。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1094.1 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 1094.2 电力变压器 第2部分：液浸式变压器的温升

GB/T 1094.3 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙

GB/T 1094.5 电力变压器 第5部分：承受短路的能力

GB/T 1094.14 电力变压器 第14部分：采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器

GB/T 6451 油浸式电力变压器技术参数和要求

GB 20052-2024 电力变压器能效限定值及能效等级

JB/T 501 电力变压器试验导则

3 术语和定义

GB/T 1094.1 界定的以及下列术语与定义适用于本文件。

3.1

高中损耗 **load loss caused by current through HV winding and MV winding**

电力变压器的高压绕组和中压绕组在额定分接流经额定电流时（此时，低压绕组开路），在额定频率及参考温度下所吸取的有功功率。

注：额定电流与高中损耗均以高压绕组与中压绕组中额定容量较小绕组为基准。对自耦电力变压器来说，高中损耗指串联绕组与公共绕组对的负载损耗。

3.2

高低损耗 **load loss caused by current through HV winding and LV winding**

电力变压器高压绕组和低压绕组在额定分接流经额定电流时（此时，中压绕组开路），在额定频率及参考温度下所吸取的有功功率。

注：额定电流与高低损耗均以高压绕组与低压绕组中额定容量较小的绕组为基准。对自耦电力变压器来说，高低损耗指串联绕组、公共绕组与低压绕组对的负载损耗。

3.3

中低损耗 **load loss caused by current through MV winding and LV winding**

电力变压器中压绕组和低压绕组在额定分接流经额定电流时（此时，高压绕组开路），在额定频率及参考温度下所吸取的有功功率。

注：额定电流与中低损耗均以中压绕组与低压绕组中额定容量较小的绕组为基准。对自耦电力变压器来说，中低损耗指公共绕组与低压绕组对的负载损耗。

3.4

联合运行损耗 **combined load loss**

对于联合运行的三绕组电力变压器，其各绕组同时流经分配大小电流时，在额定频率及参考温度下所吸取的有功功率。

注：联合运行损耗的大小与各绕组对的额定负载损耗以及各绕组中实际电流的分配均有关。

3.5

效率指数 **efficiency index; EI**

电力变压器一次侧的输入功率减去包括空载损耗、负载损耗和冷却系统消耗的有功功率后，与一次侧的输入功率的比值。

3.6

峰值效率指数 **peak efficiency index; PEI**

在负载系数为某一数值的情况下，电力变压器的效率指数所能取得的最大值。

注：PEI 的大小用百分比表示。

4 总体要求

4.1 高阻抗电力变压器应符合 GB/T 1094.1、GB/T 1094.2、GB/T 1094.3、GB/T 1094.5、GB/T 1094.14、GB/T 6451 以及 GB 20052 相关规定。

4.2 本文件涉及的高阻抗电力变压器是指任意两个绕组间短路阻抗数值大于 GB 20052-2024 或 GB/T 6451 中规定的相应绕组间短路阻抗上限值的电力变压器。本文件遵守 GB 20052-2024 的相关规定，针对 GB 20052-2024 中未涉及的高阻抗电力变压器的损耗及其能效等级予以分级。

4.3 高阻抗电力变压器的能效限定通过规定空载损耗和负载损耗限值或者 PEI 最小值来实现。高阻抗电力变压器空载损耗和负载损耗要求值不应高于本文件的规定限值，PEI 值不应低于本文件的规定限值。

5 限值与分级

5.1 基本规定

5.1.1 本文件既对采用空载损耗、负载损耗进行能效分级的高阻抗电力变压器提供了限值，也提供了基于不同使用工况下，基于峰值效率指数（PEI）进行能效考核的限值，用户可以根据需要自行选用。采用峰值效率指数（PEI）进行能效考核时，可以明确 PEI 值使用工况时的约定空载损耗、负载损耗限值，便于试验验证。

5.1.2 高阻抗电力变压器能效等级分为3级，其中1级能效等级最高且损耗值最低，2级能效次之，3级能效等级最低且损耗值最高。

5.1.3 表1~表9，表B.1~B.6中列出的容量范围内的产品，其空载损耗和负载损耗可采用线性插值法，或采用容量比的0.75次方的比值确定。

5.2 基于损耗值的能效等级

5.2.1 35kV 高阻抗电力变压器

三相双绕组35kV高阻抗电力变压器类型，额定容量在25000kVA及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表1的规定。

表1 35kV级三相双绕组高阻抗电力变压器

额定容量 kVA	1级能效		2级能效		3级能效		短路阻 抗 %
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗(75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗(75℃) kW	
25 000	10.1	88.0	11.9	88.0	14.6	92.9	11~14
31 500	12.0	104	14.2	104	17.4	110	11~14
40 000	14.4	125	17.0	125	20.8	132	14~17
50 000	17.0	148	20.1	148	24.6	156	14~17
63 000	20.2	175	23.9	175	29.2	185	14~17
80 000	24.1	210	28.5	210	34.9	222	20~24

注：适用于高压侧额定电压范围为33kV~38.5kV。

5.2.2 66kV 高阻抗电力变压器

66kV高阻抗电力变压器三相双绕组类型，且额定容量25000kVA及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表2的规定。

表2 66kV级三相双绕组高阻抗电力变压器

额定容量 kVA	1级能效		2级能效		3级能效		短路阻 抗 %
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗(75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗(75℃) kW	
25 000	12.5	90.0	14.8	90.0	18.2	95.0	12~14
31 500	14.8	108	17.5	108	21.5	114	12~14
40 000	17.7	127	20.9	127	25.8	134	14~17
50 000	20.9	150	24.7	150	30.4	159	14~17
63 000	24.7	178	29.2	178	35.9	188	14~17
80 000	29.5	213	35.0	213	43.0	225	20~24
100 000	34.9	252	41.3	252	50.8	266	20~24

注：适用于高压侧额定电压范围为63kV~69kV。

5.2.3 110kV 高阻抗电力变压器

110kV 高阻抗电力变压器三相双绕组类型，且额定容量在 31 500kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 3 的规定。

表 3 110kV 级三相双绕组高阻抗电力变压器

额定容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗 %
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗(75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗(75℃) kW	
31 500	14.9	111	17.6	111	21.6	117	18~24
40 000	17.8	140	21.0	140	25.8	148	18~24
50 000	21.0	175	24.8	175	30.6	184	18~24
63 000	25.0	209	29.5	209	36.3	220	18~24
80 000	30.0	250	35.3	250	43.6	264	18~24
100 000	35.4	296	41.7	296	51.3	311	18~24
120 000	40.5	339	47.8	339	58.8	356	18~28
180 000	54.9	460	64.8	460	80.0	484	18~28

注：适用于高压侧额定电压范围为 110kV~121kV。

5.2.4 220kV 高阻抗电力变压器

220kV 高阻抗电力变压器三相三绕组类型，且额定容量在 120 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级符合表 4 的规定。

表 4 220kV 级三相三绕组高阻抗电力变压器（额定容量比为 100%/100%/50%）

额定 容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗 %		
	空载损 耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗(75℃) kW	空载损 耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	高中	高低	中低
120 000	51.0	369	60.0	369	74.0	390	9~14	42~ 46	25~ 30
150 000	59.0	438	70.0	438	86.0	463	9~14	46~ 50	30~ 35
180 000	68.0	538	81.0	538	99.0	568	9~14	50~ 54	35~ 38
240 000	85.0	667	100	667	123	704	9~14	50~ 74	35~ 54
300 000	100	789	118	786	145	833	9~14	64~ 74	50~ 60
360 000	115	905	136	905	167	955	9~14	64~ 74	50~ 60

注：适用于高压侧额定电压范围为 220kV~242kV。

5.2.5 220kV 高阻抗自耦电力变压器

220kV 高阻抗自耦电力变压器三相三绕组类型，且额定容量在 120 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 5 的规定。

表 5 220kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/30~33%）

额定容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗 %		
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	高中	高低	中低
							14~ 20	32~ 70	18~ 50
120 000	28.0	263	33.0	263	41.0	277	14~ 20	32~ 70	18~ 50
150 000	33.0	311	39.0	311	48.0	329	14~ 20	32~ 70	18~ 50
180 000	37.0	358	44.0	358	54.0	378	14~ 20	32~ 70	18~ 50
240 000	46.0	462	54.0	462	66.0	487	14~ 20	32~ 70	18~ 50

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 220kV~242kV。

5.2.6 330kV 高阻抗自耦电力变压器

330kV 高阻抗自耦电力变压器三相三绕组类型，且额定容量在 150 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 6 的规定。

表 6 330kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器（串联绕组末端调压）

（额定容量比为 100%/100%/30~33%）

额定容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗 %		
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	高中	高低	中低
							11~ 12	28~ 31	15~ 17
150 000	38.0	345	45.0	345	55.0	364	11~ 12	28~ 31	15~ 17
180 000	43.0	396	51.0	396	63.0	418	11~ 12	31~ 35	17~ 20
240 000	54.0	492	64.0	492	79.0	520	14~ 18	36~ 45	20~ 23
360 000	74.0	668	87.0	668	107	705	14~ 18	36~ 45	20~ 23
500 000	95.0	855	111	855	137	902	16~ 23	44~ 50	21~ 24

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 330kV~363kV，中压侧额定电压为 110kV~121kV 时；如中压侧额定电压为 220kV~242kV，其空载损耗和负载损耗值可由供应商与用户协商解决。

5.2.7 500kV 单相高阻抗自耦电力变压器

500kV 高阻抗自耦电力变压器单相三绕组类型，且额定容量在 250 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 7 的规定。

表 7 500kV 级单相三绕组无励磁高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/30~33%）

额定容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗		
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗(75℃) kW	%		
							高中	高低	中低
250 000	47.0	356	55.0	356	68.0	375	14~ 22	46~ 72	22~ 48
334 000	58.0	459	68.0	459	84.0	485	14~ 22	46~ 72	22~ 48
400 000	66.0	522	78.0	522	96.0	551	14~ 22	46~ 72	22~ 48
500 000	78.0	617	92.0	617	113	651	14~ 22	46~ 72	22~ 48

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 500kV~550kV，中压为 220kV 时；如中压侧额定电压为 330kV~363kV，其空载损耗和负载损耗值可由供应商与用户协商解决。

5.2.8 750kV 单相高阻抗自耦电力变压器

750kV 高阻抗自耦电力变压器单相三绕组类型，且额定容量在 500 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 8 的规定。

表 8 750kV 级单相三绕组无励磁高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/30~33%）

额定容量 kVA	1 级能效		2 级能效		3 级能效		短路阻抗		
	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	空载损耗 kW	负载损耗 (75℃) kW	%		
							高中	高低	中低
500 000	90.0	815	100	815	125	860	12~ 16	46~ 54	30~ 36
700 000	106	1150	115	1150	130	1225	16~ 20	52~ 60	34~ 38

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 750kV~765kV。

5.3 基于 PEI 的能效等级

5.3.1 计算

5.3.1.1 效率指数的计算

电力变压器的效率指数（EI）是按以下公式计算

$$EI = \frac{k \times S_r - P_0 - k^2 P_k - P_{c0} - P_{ck}}{k \times S_r} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- P_0 —— 变压器在额定电压、额定频率和额定分接下空载损耗，千瓦（kW）；
- P_k —— 变压器在额定电流、额定频率和额定分接下的负载损耗，折算到 75℃，千瓦（kW）；
- P_{c0} —— 变压器额定空载运行时所需启动冷却装置的有功功率，千瓦（kW）；
- P_{ck} —— 变压器额定负载运行时所需额外（或增加）启动冷却装置的有功功率（不含 P_{c0} ），千瓦（kW）；
- S_r —— 变压器的额定容量，千伏安（kVA）；
- k —— 变压器实际运行时的负载系数。

5.3.1.2 峰值效率指数

电力变压器的峰值效率指数（PEI）是按以下公式计算

$$PEI = 1 - \frac{2 \times (P_0 + P_{c0} + P_{ckPEI})}{S_r \times \sqrt{(P_0 + P_{c0} + P_{ckPEI}) / P_k}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- P_0 —— 变压器在额定电压、额定频率和额定分接下空载损耗，千瓦（kW）；
- P_k —— 变压器在额定电流、额定频率和额定分接下的负载损耗，折算到 75℃，千瓦（kW）；
- P_{c0} —— 变压器额定空载运行时所需启动冷却装置的有功功率，千瓦（kW）；
- P_{ckPEI} —— 变压器在峰值运行效率下，基于 P_{c0} 额外增加的冷却装置的有功功率，千瓦（kW）；
- S_r —— 变压器的额定容量，千伏安（kVA）。

注：电力变压器的峰值效率指数 PEI 取决于空载损耗、负载损耗和额定容量，与实际的负载系数和功率因数无关。

5.3.2 能效等级

对于不同容量的变压器，本文件规定三种不同的最小 PEI 值，分别对应三种不同的能效等级。基于最小 PEI 值确定变压器等效等级时，不考虑变压器电压等级、调压方式和绕组数等方面的差异。基于最小 PEI 值规定的变压器能效等级应符合表 9 的规定。

表 9 不同额定容量下基于最小 PEI 值规定的能效等级

额定容量（kVA）	1 级能效 PEI(%)	2 级能效 PEI(%)	3 级能效 PEI(%)
25 000	99.719	99.708	99.667
31 500	99.742	99.719	99.681
40 000	99.763	99.742	99.706

50 000	99.758	99.736	99.700
63 000	99.771	99.751	99.716
80 000	99.783	99.765	99.732
100 000	99.795	99.778	99.747
120 000	99.771	99.752	99.717
150 000	99.786	99.767	99.734
180 000	99.787	99.768	99.737
240 000	99.802	99.785	99.755
250 000	99.892	99.884	99.869
334 000	99.897	99.890	99.875
400 000	99.902	99.894	99.880
500 000	99.876	99.871	99.855
700 000	99.883	99.879	99.870
注 1: 对于不包含在此表中的额定容量, 先确定与之最相邻的额定容量, 并通过线性插值法确定其允许的最小 PEI 值。			
注 2: 本表中的 250000kVA 及以上额定容量变压器, 均指单相三绕组无励磁自耦电力变压器。			

5.4 允许偏差

短路阻抗应在本文件规定的短路阻抗限值范围, 空载损耗和负载损耗应在限值范围内; 本文件规定的短路阻抗值, 允许偏差应符合 GB/T 1094.1 的规定。

6 试验要求

6.1 高阻抗电力变压器的空载损耗和负载损耗应按 GB/T 1094.1、GB/T 1094.16、GB 20052、GB/T 6451 以及 JB/T 501 中的试验方法进行试验。

6.2 按 6.1 进行空载损耗、负载损耗及相关测试后, 可参照 5.3.1.2 进行计算, 得出 PEI 值, 按照表 9 进行能效分级。

6.3 三绕组高阻抗电力变压器的温升试验考虑联合运行工况时, 所应施加的总损耗应考虑最大联合运行损耗出现的情形, 联合运行损耗大小的计算方法见附录 A。

附录 A
(资料性)

三绕组电力变压器联合运行损耗的近似计算

A.1 公式的推导及近似性

A.1.1 公式的推导

设三绕组电力变压器的额定容量为 S ，高压绕组、中压绕组和低压绕组的实际运行容量分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 （假设 $S_3 \leq S_2 \leq S_1$ ），基于较小实际运行容量的高中绕组对、高低绕组对和中低绕组对的负载损耗分别为： P_{k12} 、 P_{k13} 和 P_{k23} ，基于额定容量 S 的高中绕组对、高低绕组对和中低绕组对的负载损耗分别为 $P_{k12(100)}$ 、 $P_{k13(100)}$ 和 $P_{k23(100)}$ ，假设高压绕组、中压绕组和低压绕组按各自实际运行容量运行时，所贡献的负载损耗分别为 P_1 、 P_2 和 P_3 ，变压器的联合运行损耗记为 P_k 。

$$P_{k12(100)} = P_{k12} \times \left(\frac{S}{S_2}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

$$P_{k13(100)} = P_{k13} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

$$P_{k23(100)} = P_{k23} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.3)$$

$$\left(\frac{S}{S_1}\right)^2 P_1 + \left(\frac{S}{S_2}\right)^2 P_2 = P_{k12(100)} \quad \dots\dots\dots(A.4)$$

$$\left(\frac{S}{S_1}\right)^2 P_1 + \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 P_3 = P_{k13(100)} \quad \dots\dots\dots(A.5)$$

$$\left(\frac{S}{S_2}\right)^2 P_2 + \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 P_3 = P_{k23(100)} \quad \dots\dots\dots(A.6)$$

联立上述方程，求解得，

$$P_1 = \frac{P_{k12} \times \left(\frac{S}{S_2}\right)^2 + P_{k13} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 - P_{k23} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2}{2} \times \left(\frac{S_1}{S}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.7)$$

$$P_2 = \frac{P_{k12} \times \left(\frac{S}{S_2}\right)^2 + P_{k23} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 - P_{k13} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2}{2} \times \left(\frac{S_2}{S}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.8)$$

$$P_3 = \frac{P_{k13} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 + P_{k23} \times \left(\frac{S}{S_3}\right)^2 - P_{k12} \times \left(\frac{S}{S_2}\right)^2}{2} \times \left(\frac{S_3}{S}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(A.9)$$

根据公式(A.7)、公式(A.8) 与公式(A.9)，求解得公式 (A.10)。

$$\begin{aligned} P_k &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - \left(\frac{S_3}{S_2}\right)^2 \right] P_{k12} + \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{S_1}{S_3}\right)^2 - \left(\frac{S_2}{S_3}\right)^2 \right] P_{k13} + \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{S_2}{S_3}\right)^2 - \left(\frac{S_1}{S_3}\right)^2 \right] P_{k23} \quad \dots(A.10) \end{aligned}$$

式中：

S —— 按额定工况下，变压器额定容量，千伏安 (kVA)；

S_1 —— 按额定工况下，变压器高压绕组实际运行容量，千伏安 (kVA)；

S_2 —— 按额定工况下，变压器中压绕组实际运行容量，千伏安 (kVA)；

S_3 —— 按额定工况下，变压器低压绕组实际运行容量，千伏安 (kVA)；

- P_{k12} —— 按额定工况下，基于较小实际运行容量的高中绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- P_{k13} —— 按额定工况下，基于较小实际运行容量的高低绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- P_{k23} —— 按额定工况下，基于较小实际运行容量的中低绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- $P_{k12(100)}$ —— 按额定工况下，基于额定容量 S 的高中绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- $P_{k13(100)}$ —— 按额定工况下，基于额定容量 S 的高低绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- $P_{k23(100)}$ —— 按额定工况下，基于额定容量 S 的中低绕组对的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- P_k —— 在额定容量、额定电压和额定频率下的联合运行损耗，千瓦 (kW) ；
- P_1 —— 高压绕组按额定工况和实际运行容量运行时，所贡献的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- P_2 —— 中压绕组按额定工况和实际运行容量运行时，所贡献的负载损耗，千瓦 (kW) ；
- P_3 —— 低压绕组按额定工况和实际运行容量运行时，所贡献的负载损耗，千瓦 (kW) 。

A.1.2 公式的近似性说明

变压器的负载损耗 P_k 主要由各绕组的直流电阻损耗 P_d 、各绕组的涡流损耗 P_e 以及变压器内外部金属结构件的杂散损耗 P_{oe} 三大部分组成，按公式 (A.11) 计算：

$$P_k = P_d + P_e + P_{oe} \quad \dots\dots\dots(A.11)$$

式中：

- P_k —— 在额定工况下的联合运行损耗，千瓦 (kW) ；
- P_d —— 额定工况下各绕组的直流电阻损耗，千瓦 (kW) ；
- P_e —— 额定工况下各绕组的涡流电阻损耗，千瓦 (kW) ；
- P_{oe} —— 额定工况下内外部金属结构件的杂散损耗，千瓦 (kW) 。

A.2 三绕组普通阻抗变压器

以额定容量比为 180/180/90MVA 的 220kV 三绕组普通阻抗电力变压器为例，根据公式(A.10)确认下计算其中，低绕组在不同负荷组合时的变压器联合运行损耗符合表 A.1 的规定。

表 A.1 三绕组普通阻抗电力变压器联合运行损耗实例

实际运行容量			联合运行损耗 kW	说 明
高压绕组 S1 MVA	中压绕组 S2 MVA	低压绕组 S3 MVA		
180	180	0	538	高中损耗
90	0	90	160	高低损耗
0	90	90	130	中低损耗
180	90	90	458	联合运行损耗
180	120	60	454	联合运行损耗

180	150	30	481	联合运行损耗
-----	-----	----	-----	--------

A.3 三绕组高阻抗电力变压器

以额定容量比为 180/180/90MVA 高压内置结构的 220kV 三绕组高阻抗电力变压器为例，根据公式 (A.10) 计算其在不同负荷时的变压器的联合运行损耗符合表 A.2 的规定。

表 A.2 三绕组高阻抗电力变压器联合运行损耗实例

实际运行容量			联合运行损耗(75℃) kW	说 明
高压绕组 S1 MVA	中压绕组 S2 MVA	低压绕组 S3 MVA		
180	180	0	538	高中损耗
90	0	90	350	高低损耗
0	90	90	330	中低损耗
180	90	90	638	联合运行损耗
180	120	60	530	联合运行损耗
180	150	30	496	联合运行损耗

附录 B
(资料性)

三绕组高阻抗电力变压器联合运行损耗要求

当三绕组高阻抗电力变压器需要采取联合运行方式时,其高中损耗、高低损耗、中低损耗可参考本附录 B 中表 B.1 至表 B.6 中的限制,以确定变压器的能效等级。

B.1 220kV 高阻抗电力变压器

220kV 高阻抗电力变压器三相三绕组类型,且额定容量在 120 000kVA 及以上。当高压绕组、中压绕组和低压绕组的额定容量比为 100%/100%/50%时,相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级符合表 B.1 的规定。当高压绕组、中压绕组和低压绕组的额定容量比为 100%/100%/30%~33%时,相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 B.2 的规定。

表 B.1 220kV 级三相三绕组高阻抗电力变压器 (额定容量比为 100%/100%/50%)

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
120 000	51.0	369	240	230	60.0	369	240	230	74.0	390	250	240	12~14	42~46	25~30
150 000	59.0	438	300	290	70.0	438	300	290	86.0	463	315	305	12~14	46~50	30~35
180 000	68.0	538	360	350	81.0	538	360	350	99.0	568	380	370	12~14	50~54	35~38
240 000	85.0	667	460	450	100	667	460	450	123	704	485	475	12~14	50~74	35~54
300 000	100	789	540	530	118	786	540	530	145	833	568	558	12~14	64~74	50~60
360 000	115	905	620	610	136	905	620	610	167	955	650	640	12~14	64~74	50~60

注:适用于高压侧额定电压范围为 220kV~242kV。

表 B.2 220kV 级三相三绕组高阻抗电力变压器 (额定容量比为 100%/100%/30%~33%)

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
120 000	51.0	369	135	135	60.0	369	135	135	74.0	390	145	145	12~14	42~46	25~30
150 000	59.0	438	160	160	70.0	438	160	160	86.0	463	170	170	12~14	46~50	30~35
180 000	68.0	538	180	180	81.0	538	180	180	99.0	568	190	190	12~14	50~54	35~38
240 000	85.0	667	235	235	100	667	235	235	123	704	245	245	12~14	50~64	35~50
300 000	100	789	278	278	118	786	278	278	145	833	290	290	12~14	64~74	50~60
360 000	115	905	320	320	136	905	320	320	167	955	335	335	12~14	64~74	50~60

注:适用于高压侧额定电压范围为 220kV~242kV。

B.2 220kV 高阻抗自耦电力变压器

220kV 高阻抗自耦电力变压器三相三绕组类型，且额定容量在 120 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 B.3 的规定。

表 B.3 220kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/50%）

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 (kW)	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 (kW)	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 (kW)				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
120 000	28.0	263	245	255	33.0	263	245	255	41.0	277	260	270	14~20	32~70	18~50
150 000	33.0	311	290	305	39.0	311	290	305	48.0	329	305	320	14~20	32~70	18~50
180 000	37.0	358	340	355	44.0	358	340	355	54.0	378	360	375	14~20	32~70	18~50
240 000	46.0	462	420	440	54.0	462	420	440	66.0	487	440	460	14~20	32~70	18~50

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 220kV~242kV。

B.3 330kV 高阻抗自耦电力变压器

330kV 高阻抗自耦电力变压器三相三绕组类型，且额定容量在 150 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 B.4 的规定。

表 B.4 330kV 级三相三绕组高阻抗自耦电力变压器（串联绕组末端调压）

（额定容量比为 100%/100%/30%~33%）

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
150 000	38.0	345	95.0	95.0	45.0	345	95.0	95.0	55.0	364	100	100	11~12	28~31	15~17
180 000	43.0	396	110	110	51.0	396	110	110	63.0	418	115	115	11~12	31~35	17~20
240 000	54.0	492	135	135	64.0	492	135	135	79.0	520	142	142	11~13	30~35	17~20
360 000	74.0	668	185	185	87.0	668	185	185	107	705	195	195	14~18	36~45	20~23
500 000	95.0	855.0	235	235	111	855	235	235	137	855	245	245	16~20	44~48	21~24

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 330kV~363kV，中压侧额定电压为 110kV~121kV 时；如中压侧额定电压为 220kV~242kV，其空载损耗和负载损耗值可由供应商与用户协商解决。

B.4 500kV 单相高阻抗自耦电力变压器

500kV 高阻抗自耦电力变压器单相三绕组类型，且额定容量在 250 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 B.5 的规定。

表 B.5 500kV 级单相三绕组无励磁高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/30%~33%）

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
250 000	47.0	356	130	130	55.0	356	130	130	68.0	375	140	140	14~22	46~72	22~48
334 000	58.0	459	160	160	68.0	459	160	160	84.0	485	170	170	14~22	46~72	22~48
400 000	66.0	522	185	185	78.0	522	185	185	96.0	551	195	195	14~22	46~72	22~48
500 000	78.0	617	220	220	92.0	617	220	220	113	651	230	230	14~22	46~72	22~48

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 500kV~550kV。

B.5 750kV 单相高阻抗自耦电力变压器

750kV 高阻抗自耦电力变压器单相三绕组类型，且额定容量在 500 000kVA 及以上，相应的短路阻抗、空载损耗、负载损耗和能效等级应符合表 B.6 的规定。

表 B.6 750kV 级单相三绕组无励磁高阻抗自耦电力变压器（额定容量比为 100%/100%/30%~33%）

额定容量 kVA	1 级能效			2 级能效			3 级能效			短路阻抗 %					
	空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW	负载损耗(75℃) kW			空载 损耗 kW				负载损耗(75℃) kW		
		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗		高中 损耗	高低 损耗	中低 损耗	高中	高低	中低
500 000	90.0	815	295	315	100	815	295	315	125	860	320	340	12~16	46~54	30~36
700 000	106	1150	400	420	115	1150	400	420	130	1225	440	460	16~20	52~60	34~38

注 1：适用于高压侧额定电压范围为 750kV~765kV。

参考文献

- [1] GB/T 17468-2019 电力变压器选用导则
 - [2] T/CEC 291.6-2020 天然酯绝缘油电力变压器 第 6 部分：技术经济性评价导则
 - [3] T/SEAMTA 000006-2022 高阻抗电力变压器
 - [4] IEC TS 60076-20:2017 Power transformers-Part 20:Energy efficiency
-