

— Life Is On

Schneider  
Electric  
施耐德电气

# 中压电气设备 设计与选择指南

（法）Thierry Cormenier 编  
施耐德电气专家团队 译



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

— Life Is On

**Schneider**  
Electric  
施耐德电气

# 中压电气设备 设计与选择指南

（法）Thierry Cormenier 编  
施耐德电气专家团队 译



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

施耐德电气提供电力网络诊断、设计、安装、运营、检查与维护方面的全面支持信息。这些信息均符合最新的国际电工技术委员会标准。这次推出的《中压电气设备设计与选择指南》是为了解决中压电气装置的关键问题。主要内容包括中压网络, 电力变压器, 开关柜, 中压/低压变电站, 保护、控制和监控的一般信息, 智能电网及生态设计等内容; 并对使用条件、短路功率、绝缘强度、防护等级、母排计算等设计规则进行了详细的阐释。之后在“开关设备”一章中, 对中压断路器、真空断路器机构、负荷开关、隔离开关和接地开关、限流熔断器、电流互感器等中压开关设备的特性参数进行逐一介绍, 这对于中压电气设备的选择大有裨益。

本书适用对象为涉及商业、工业或电力行业中压装置电气的设计及使用人员, 对于参与电气装置标准化及认证或检查人员都有重要参考价值, 对于咨询工程师、设计师、承包商、成套设备生产商、电气设备运维人员、电气工程及自动化专业教师和学生也有较高的参考价值。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

中压电气设备设计与选择指南 / (法) 特瑞·科梅尼尔 (Thierry Cormenier) 编; 施耐德电气专家团队译. —北京: 中国电力出版社, 2019. 8

ISBN 978-7-5198-3206-3

I. ①中… II. ①特… ②施… III. ①中压电网-电气设备-设计-指南 IV. ①TM92-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 094854 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

策 划: 周 娟

责任编辑: 杨淑玲 (010-63412602)

责任校对: 黄 蓓 朱丽芳

装帧设计: 王红柳

责任印制: 杨晓东

---

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

版 次: 2019 年 8 月第一版

印 次: 2019 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 880 毫米×1230 毫米 16 开本

印 张: 8.5

字 数: 301 千字

定 价: 98.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

## 译者的话

《中压电气设备设计与选择指南》是由来自施耐德电气出色的配电专家分享他们在技术开发和不断发展的中压标准方面的行业领先知识，这些内容符合最新的国际电工技术委员会标准。本指南中的电气设备文字符号、电气简图用图形符号大多保留了原版图书的表示方法。

本指南在翻译审校期间，得到了行业内优秀电气设计专家的指正，提出了大量中肯的建议，他们是刘屏周、李英姿（排名不分先后）。

同时施耐德电气内部的优秀技术人员也投入了大量精力进行组织和审校工作，他们是房彩娟、陈明、宾昭平、程曦、张东煜（排名不分先后）。

对于他们所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢！

我们期望这本《中压电气设备设计与选择指南》能够给大家带来切实有效的帮助，也欢迎广大读者提出宝贵意见和建议。

---

介绍

A

---

设计规则

B

---

开关设备

C

---

计量单位

D

---

标准

E

# 总目录

译者的话

<b>A</b>	<b>介绍</b>	<b>A1</b>
	1 中压网络	A2
	2 电力变压器	A5
	3 保护、控制和监控	A14
	4 智能电网	A15
	5 环境	A16
	6 预制式金属封闭和金属铠装开关设备	A18
<b>B</b>	<b>设计规则</b>	<b>B1</b>
	1 使用条件	B2
	2 短路功率	B9
	3 短路电流	B10
	4 开关柜中的母排计算	B19
	5 绝缘强度	B34
	6 防护等级	B41
7 腐蚀	B45	
<b>C</b>	<b>开关设备</b>	<b>C1</b>
	1 中压断路器	C2
	2 真空断路器的机构	C12
	3 负荷开关	C15
	4 隔离开关和接地开关	C20
	5 限流熔断器	C22
	6 电流互感器	C27
	7 LPCT低功率电流互感器	C33
	8 电压互感器	C34
	9 LPVT电子式电压互感器	C38
10 降容	C39	
<b>D</b>	<b>计量单位</b>	<b>D1</b>
<b>E</b>	<b>标准</b>	<b>E1</b>
	1 本书所涉及的标准	E2
	2 IEC-ANSI/IEEE对比	E4

## 目录

<b>1</b>	<b>中压网络</b>	<b>A2</b>
<b>2</b>	<b>电力变压器</b>	<b>A5</b>
	2.1 概述	A5
	2.2 运行条件	A6
	2.3 温升限值	A7
	2.4 变压器效率	A10
	2.5 电压降	A11
	2.6 并联运行	A12
	2.7 三相变压器常用的联结组别	A13
<b>3</b>	<b>保护、控制和监控</b>	<b>A14</b>
<b>4</b>	<b>智能电网</b>	<b>A15</b>
<b>5</b>	<b>环境</b>	<b>A16</b>
<b>6</b>	<b>预制式金属封闭和金属铠装开关设备</b>	<b>A18</b>
	6.1 引言	A18
	6.2 电压	A19
	6.3 电流	A21
	6.4 频率	A24
	6.5 开关设备功能	A24
	6.6 可触及性和运行连续性	A25
	6.7 示例	A26

# 1 中压网络

根据IEC标准，中压和高压之间没有明确的界限。地方和历史因素在其中起到了很大的作用，其范围通常在30~100kV之间（参见IEV 601-01-28）。出版物IEC 62271-1: 2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》中包含了一个关于此范围的注释：“适用本标准的高电压（见IEV 601-01-27）为高于1000V额定电压。然而，‘中压’术语（见IEV 601-01-28）通常应用于电压高于1kV，并小于或等于52 kV的配电系统。”

## 术语“中压”，通常应用于电压高于1kV，并小于或等于52kV<sup>(1)</sup>的配电系统

由于技术和经济原因，中压配电网络的运行电压很少超过36 kV。

电气装置经专门的中压变电站（通常是设计的主变电站）连接到中压公用电网。根据其规模与负荷相关的一些具体条件（额定电压、数量、功率、位置等），装置可能设置二级变电站。这些二级变电站应精心选址，以降低中压和低压电缆的预算。主变电站通过内部的中压配电给这些二级变电站供电。

通常，大部分负载一般由降压变压器的低压侧供电。但是容量超过120kW的大容量周期异步电机则由中压侧进行供电。

本电气指南只考虑低压负载。降压变压器可以安装在主变电站或二级变电站内。小型电气装置可能只安装单台降压变压器，在大多数情况下会安装在主变电站内。

### 主变电站包含五个基本功能：

- 功能1：连接中压公共配电网。
- 功能2：装置的总进线保护。
- 功能3：变电站内降压变压器的供电及其保护。
- 功能4：内部二级中压配电的供电及其保护。
- 功能5：计量。

### 主变电站包括以下设备：

**断路器：**断路器是一种用于网络控制和保护的设备。它能够关合、承受和开断负载电流以及故障电流，直至网络的短路电流。

**负荷开关：**能够带载关合和开断额定电流的交流负荷开关和隔离负荷开关。

**接触器：**接触器用于在正常工作时对负载进行断开和接通操作，特别是在诸如公共照明和工业电机等特定操作中使用。

**限流熔断器：**中压限流熔断器主要用于保护变压器、电机和其他负载。负载超过给定值并达到一定时间，可以通过融化其自身一个或多个特别设计的和均布的组件，断开其所插入的回路。但限流熔断器可能难以断开中间电流值（譬如超过其熔体额定值的范围小于6~10倍），因此通常与开关设备组合使用。

**隔离开关和接地开关：**隔离开关用于在不影响绝缘水平的情况下分离两个带电的独立回路，通常在环网的断开点处使用。它们通常用于将电气装置与电源隔离，其性能要优于其他开关设备。隔离开关不是安全设备。接地开关是能够以可靠方式将导体接地的专用设备，这样就可以安全地接近导体。它们具有关合额定短路电流的能力，以确保它们能够耐受操作中的错误，如闭合带电导体。

**电流互感器：**旨在为二次回路提供与一次电流（中压）成比例的电流。

**电压互感器：**电压互感器旨在为其二次回路提供与一次回路电压成比例的二次电压。

对电力系统进行何种保护取决于其架构和运行模式。

对于包含单台降压变压器的装置，一般保护和变压器保护可以合并。计量可以在中压侧或低压侧上进行。对于包含单台降压变压器的装置，计量通常在低压侧进行，前提是变压器的额定功率要保持在供电部门规定限值之下。除功能要求外，主变电站和二级变电站的建设均应符合地方标准和法规。此外，在任何情况下均应考虑IEC建议。

#### 电力系统架构

电力系统的各种组件可以用不同的方式进行配置。最终架构的复杂程度决定了电能的供应能力和投资成本。

因此，为指定的应用选择电力系统架构，需要权衡技术必要性和成本之间的关系。

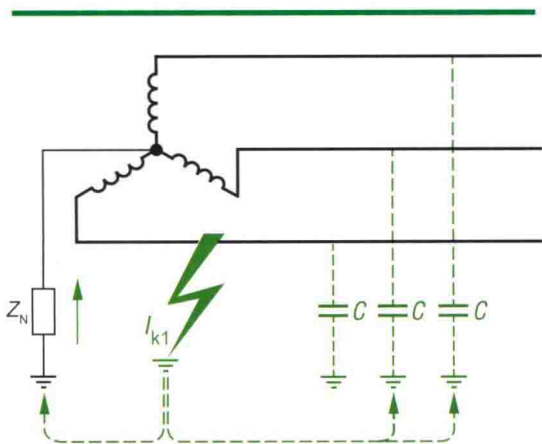
架构包括以下形式：

- 放射型配电系统：
  - 单馈路；
  - 双馈路；
  - 平行馈路。
- 环路系统：
  - 开放环路；
  - 闭合环路。
- 内部发电系统：
  - 常用电源发电；
  - 替代电源发电。

#### 接地阻抗

根据阻抗 $Z_N$ 的类型（电容、电阻、电感）和值（零到无穷大），中性点电位可以固定或通过五种不同的接地方法进行调整：

- $Z_N = \infty$ ，中性点不接地，中性点没有接地连接；
- $Z_N$ 为高电阻；
- $Z_N$ 为低电抗；
- $Z_N$ 为补偿电抗，用来补偿电网电容；
- $Z_N = 0$ ，中性点直接接地。



图表A1：有接地故障的电力系统等效电路图

### 困难和选择准则

选择准则涉及诸多方面：

- 技术（电力系统功能、过电压、故障电流等）；
- 运营（供电连续性、维护）；
- 安全（故障电流水平、接触电压和跨步电压）；
- 成本（基建费和运营费用）；
- 地方和国家的法规。

两个主要技术问题恰恰互相矛盾：

**降低过电压水平：**过大的过电压可能导致电绝缘材料发生绝缘击穿，造成短路。

装置过电压的成因有以下几种：

- 雷电过电压，由架空系统暴露部分引起的直接雷击或感应电压引起，且过电压传播到用户供电点和装置内部；
- 由操作和某些严重情况（如共振）引起的系统内过电压；
- 由接地故障本身及切除引起的过电压。

**降低接地故障电流 ( $I_{k1}$ )：**故障电流会产生与以下内容相关的一系列后果：

- 故障点处由电弧引起的危险，特别是旋转机械中的磁路熔化；
- 电缆屏蔽层受热；
- 接地电阻的大小和成本；
- 相邻通信电路中的电磁感应；
- 外露可导电部分电动势升高造成的人身危险。

减少故障电流有助于最大限度减少这些后果。

不幸的是，如果对这些效果其中之一进行优化，将自动导致另一个效果受到削弱。两种典型的中性点接地方式突出展示了这种对比：

- 不接地中性点，可大大降低通过中性点接地的故障电流，但会产生更高的过电压；
- 直接接地中性点，可最大限度降低过电压，但会导致高故障电流。

就运行考虑，依据采用的中性点接地方式：

- 在第一次接地故障发生的情况下，可能可以连续运行，也可能不可以连续运行；
- 接触电压会有差异；
- 可能易于实施或难以实施保护选择性。

因此经常选择折中解决方案，即中性点通过阻抗接地（图表A2）。

中性点接地特点摘要见图表A2

特点	中性点接地				
	不接地	补偿式	电阻式	电抗式	直接接地
瞬态过电压抑制	-	+-	+	+-	++
工频过电压限制	-	-	+	+	++
故障电流限制	++	++	+	+	--
供电连续性（无跳闸，持续故障意味着故障电流大大降低）	+	+	-	-	-
易于实施保护选择性	-	--	+	+	+
无需有资格人员	-	-	+	+	+

+ 表示优势； - 表示特别注意。

图表A2：中性点接地特点摘要

### 2.1 概述

电力变压器是一种具有两个或更多绕组的静态设备，其通过电磁感应将交流电压和电流系统转换成通常具有不同值，但具有相同频率的另一电压和电流系统，以传输电能。

电力变压器需遵守IEC 60076系列标准，其中对于中压网络的主要要求摘要如下：

- IEC 60076-1《电力变压器 第1部分：总则》；
- IEC 60076-2《电力变压器 第2部分：液浸式变压器温升》；
- IEC 60076-7《电力变压器 第7部分：油浸式变压器负载导则》；
- IEC 60076-10《电力变压器 第10部分：声级测定》；
- IEC 60076-11《电力变压器 第11部分：干式变压器》；
- IEC 60076-12《电力变压器 第12部分：干式电力变压器负载导则》；
- IEC 60076-13《电力变压器 第13部分：自我保护式充液变压器》；
- IEC 60076-16《电力变压器 第16部分：风力发电用变压器》。

根据IEC 60076-8 应用指南，该导则旨在提供变压器并联运行期间进行计算所需的信息、负载情况下电压下降或上升以及三绕组负载组合的负载损耗。关于电力变压器负载能力的信息，请参见IEC 60076-7《油浸式变压器》和IEC 60076-12《干式电力变压器》。

## 2.2 运行条件

标准定义了变压器的正常运行条件，包括：

■ **海拔：**海拔不能超过1000m。

■ **冷却介质温度：**

冷却设备进口处的冷却空气温度：

□ 不超过：40°C（任何时间）、30°C（最热月份月平均温度）、20°C（年均温度）。

□ 且不低于：-25°C（户外变压器）、-5°C（变压器和冷却器均用于户内安装）。

对于水冷变压器，入口处的冷却水温度不超过：25°C（任何时间）、20°C（年均温度）。

关于冷却，对于以下型式的变压器有进一步限制：

□ 液浸式变压器（IEC 60076-2）；

□ 干式变压器（IEC 60076-11）。

■ **电源电压波形：**总谐波含量不超过5%、偶次谐波含量不超过1%的正弦电源电压。

■ **负载电流谐波含量：**负载电流总谐波含量不超过额定电流的5%。

对于负载电流总谐波含量超过额定电流5%的变压器或专门用于供电的变压器，应根据涉及“变流变压器”的IEC 61378系列标准来规定电子类负载或整流器负载。

若电流谐波含量小于5%，那么变压器工作在额定电流时就不会有过度寿命损失。但应注意的是，任何谐波负载下的温升可能会升高，且额定功率下的温升可能会超出限值。

■ **三相电源电压的对称性**

对于三相变压器，可使用一组近似对称的三相电源电压。

“近似对称”是指最高相间电压持续不高于最低相间电压1%，或在特殊条件下短时间内（约30min）不超过2%。

■ **装置环境**

□ 对于变压器套管或变压器本身的外部绝缘，不需要特别考虑污染率（见IEC / TS 60815-1定义）的环境。

□ 不需要特别考虑地震干扰影响的环境（假设地面加速度级别低于 $2\text{m/s}^2$ 或约0.2g）。

□ 当变压器安装在不是由变压器制造商所提供的外壳中时，应注意校正变压器温升限值，以及由其自身满载温升级别定义的外壳冷却能力（见IEC 62271-202）。

以下根据IEC 60721-3-4规定的环境条件：

- 气候条件4K2，最低外部冷却介质温度为-25°C的情况除外；
- 特殊气候条件4Z2、4Z4、4Z7；
- 生物条件4B1；
- 化学活性物质4C2；
- 机械活性物质4S3；
- 机械条件4M4。

对于计划安装在室内的变压器，这些环境条件中的一部分可能不适用。

## 2.3 温升限值

采用环境温度和变压器的不同负载周期，根据变压器周围的温度定义温升限值。当变压器安装在外壳内时，温升影响外壳设计。该外壳主要由温升级别和防护等级确定，二者均需适合局部影响条件（见IEC 62271-202）。对于户外装置，为了避免太阳辐射的影响，建议在变压器上方安装遮阳棚，在单层非绝热金属外壳上也要装，并保持自然对流。

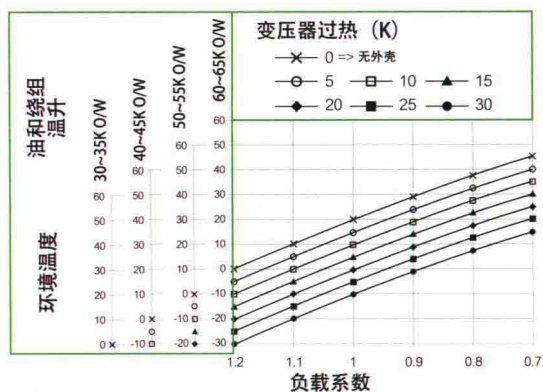
### 液浸式变压器冷却方式

- 第一个字母：内部冷却介质。
  - O：矿物油或燃点 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ 的合成绝缘液体。
  - K：燃点 $> 300^{\circ}\text{C}$ 的绝缘液体。
  - L：无可测量燃点的绝缘液体。
- 第二个字母：内部冷却介质循环机理。
  - N：流经冷却设备和绕组的液体是自然的热对流循环。
  - F：流经冷却设备的液体是强制循环，流经绕组的液体是热对流循环。
  - D：流经冷却设备的液体是强制循环，且至少在主绕组内部的液体是强迫导向循环。
- 第三个字母：外部冷却介质。
  - A：空气。
  - W：水。
- 第四个字母：外部冷却介质循环机理。
  - N：自然对流。
  - F：强制循环（风扇、泵）。

如果制造商和购买方之间没有另外约定，温升限值对牛皮纸和改性纸均有效（另见“负载导则”IEC 60076-7）。

要求	温升限值 (K)
顶部绝缘液体	60
普通绕组（按绕组电阻变化）： - ON...和OF...冷却系统	65
- OD...冷却系统	70
热点绕组	78

图表A3：电力变压器各部分温升限值



图表A5：油浸式变压器的外壳温升系数与负载系数的关系

环境温度 (°C)			温升校正 (K) <sup>(1)</sup>
年平均	月平均	最大值	
20	30	40	0
25	35	45	-5
30	40	50	-10
35	45	55	-15

(1) 图表A3中给出的值。

图表A4：空冷油浸式变压器在特殊运行条件下的温升校正推荐值

负载导则IEC 60076-7和IEC 62271-202标准说明了变压器温升、由于使用封闭式变压器外壳导致的过热与负载系数之间的关系（图表A5）。

### 干式变压器冷却方式

冷却介质的类型是空气，由以下字母定义：

- N：当采用自然冷却时，空气对流由变压器本身产生。
- G：当采用强制冷却时，气流通过风扇加速。

注：与安装在变压器室墙壁上的风扇所“拉动”的气流相比，应优先选择被“推动”而通过变压器绕组的气流。

但是，两者可以组合使用。若变压器安装在外壳中，则应根据IEC 62271-202标准的变压器及外壳的温升，评估变压器的负载限值。

按照IEC 60076-11进行测试，则设计用于在正常运行条件下运行的变压器绕组的温升，不应超过**图表A6**中规定的相应限值。

在绕组绝缘系统任意部分出现的最高温度称为热点温度。

热点温度不得超过IEC 60076-11规定的热点绕组温度的额定值。

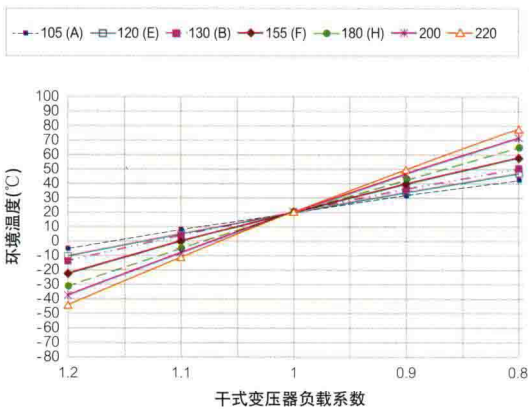
该温度可以测量，但也可以使用IEC 60076-12（负载导则）中的方程式计算出实用近似值（**图表A6**）。

绝缘系统 温度（°C） <sup>(1)</sup>	额定电流下 绕组平均温升 （K） <sup>(2)</sup>	最高热点绕组 温度（°C）
105 (A)	60	130
120 (E)	75	145
130 (B)	80	155
155 (F)	100	180
180 (H)	125	205
200	135	225
220	150	245

(1) 字母指IEC 60085中给出的温度分类。

(2) 根据IEC 60076-11的温升试验测得的温升。

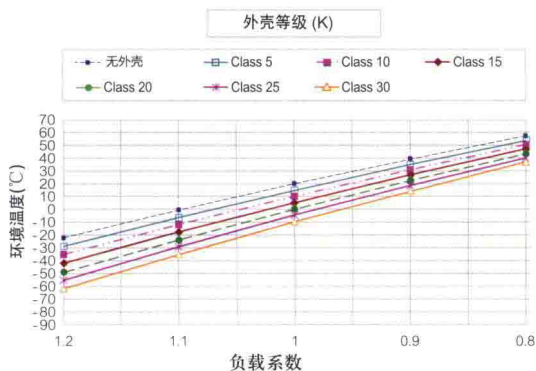
**图表A6：**正常运行条件下运行的变压器绕组的温升限值



**图表A7：**基于不同绝缘系统温度下环境温度与干式变压器的负载系数关系

IEC 62271-202标准适用于安装在预制变电站内的变压器，其中定义了变压器外壳的温升等级，并对变电站的温度特性提出要求（通过专用温升测试进行检查）。

与“露天”相比，该等级反映了变压器的过热情况。**图表A7**显示了基于变压器不同绝缘系统温度下干式变压器的负载系数（见IEC 60076-11）。



注：绝缘等级155°C (F) 的带外壳干式变压器的负载系数。

图表A8：基于不同外壳类别时环境温度与干式变压器的负载系数关系

图表A8按外壳类别显示了干式变压器的负载系数，适用于耐热等级为155°C变压器绝缘系统。其他绝缘系统的相应数据可以在IEC 62271-202中找到。

根据图表A8所示，依据以下方式使用：

- 选择外壳类别对应的线；
- 在纵轴上选择变电站场所在给定时间段内的平均环境温度；
- 外壳类别对应的线与环境温度对应的线的交叉点，即为允许的变压器负载系数。

### 过载

#### 环境温度

依据标准，变压器的额定功率是在正常使用温度下确定的：

- 最高环境温度为40°C；
- 日平均环境温度为30°C；
- 年平均环境温度为20°C。

根据需求，可以制造在不同环境温度条件下运行的变压器。

#### 影响额定过载的因素

变压器的额定过载取决于变压器先前的负载、相应过载开始时的绕组和油的温度。

图表A9和图表A10中分别列出了液浸式变压器和干式变压器的允许持续时间和可接受过载水平的示例。例如，如果变压器的连续负荷为其额定功率的50%，则变压器可能过载到150%或120%，只是时间存在差异。

- 油浸式变压器过载。

先前连续负荷 额定功率百分比(%)	油温 (°C)	规定过载水平（额定功率百分比）的过载持续时间（min）				
		10%	20%	30%	40%	50%
50	55	180	90	60	30	15
75	68	120	60	30	15	8
90	78	60	25	15	8	4

图表A9：油浸式变压器可接受过载水平及允许过载持续时间

还应注意的是，由于油的时间常数为2~4h，而绕组的时间常数为2~6min，所以油温并不是测量绕组温度的可靠措施。因此，必须非常仔细地确定允许的过载持续时间，因为即使绕组温度超过临界温度105°C，油温变化也不明显。

- 干式变压器过载。

根据IEC 60076-12确定，适用于耐热等级为155°C的变压器。

先前连续负荷 额定功率百分比(%)	绕组温度 绕组/热点 (°C)	规定过载水平（额定功率百分比）的过载持续时间（min） 热点最高温度为145°C				
		10%	20%	30%	40%	50%
50	46/54	41	27	20	15	12
75	79/95	28	17	12	9	7
90	103/124	15	8	5	4	3
100	120/145	0	0	0	0	0

图表A10：干式变压器可接受过载水平及允许过载持续时间

示例:

假设一台三相变压器(630kVA, 20/0.4kV)具有1200W的空载损耗和9300W的负载损耗。

确定功率因数为1.0和0.8时的满载(示例1)和75%负载(示例2)下的变压器效率 $\eta$ 。

示例1:

■ 满载  $\cos\varphi = 1$

$$\eta = \frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_0 + P_k \times (S/S_r)^2} \times 100\%$$

$$= \frac{630\,000 \times 1.0}{630\,000 \times 1.0 + 1200 + 9300 \times (100\%)^2} \times 100\%$$

$$= 98.36\%$$

式中  $P_0$ ——空载损耗;

$P_k$ ——负载损耗;

$S_r$ ——变压器额定容量。

■ 满载  $\cos\varphi = 0.8$

$$\eta = \frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_0 + P_k \times (S/S_r)^2} \times 100\%$$

$$= \frac{630\,000 \times 0.8}{630\,000 \times 0.8 + 1200 + 9300 \times (100\%)^2} \times 100\%$$

$$= 97.96\%$$

示例2:

■ 75%负载  $\cos\varphi = 1$

$$\eta = \frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_0 + P_k \times (S/S_r)^2} \times 100\%$$

$$= \frac{0.75 \times 630\,000 \times 1.0}{472\,500 \times 1.0 + 1200 + 9300 \times (75\%)^2} \times 100\%$$

$$= 98.66\%$$

■ 75%负载  $\cos\varphi = 0.8$

$$\eta = \frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_0 + P_k \times (S/S_r)^2} \times 100\%$$

$$= \frac{0.75 \times 630\,000 \times 0.8}{472\,500 \times 0.8 + 1200 + 9300 \times (75\%)^2} \times 100\%$$

$$= 98.33\%$$

## 2.4 变压器效率

高效率变压器旨在降低损耗,从而降低最终用户的运营成本。

损耗可分为负载损耗和空载损耗,前者与变压器负载(电流平方)成正比,后者则是由于铁心的磁化导致的,只要变压器通电就会产生,并且是恒定的,与变压器负载无关。

通过减少空载损耗,非晶铁心变压器的能效更高,因为其耗电比常规硅钢铁心变压器减少70%~80%,因此更为经济。

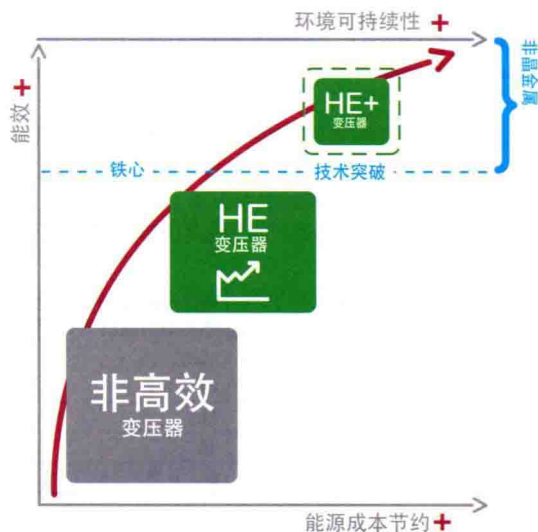
■ 什么是非晶铁心技术?

非晶金属是一种固体金属材料,具有高磁化率和相当高的电阻。金属原子成无序结构,并且以非晶态方式排列。非晶金属比常规硅钢更容易磁化和去磁。用于制作铁心的金属箔厚度为0.02mm,约为常规钢箔厚度的1/10,也有助于进一步降低损耗(较低涡流)。

■ 非晶金属铁心的优势:

- 降低磁化电流;
- 降低铁心温升;
- 与传统钢相比损耗更低,特别是空载损耗可下降三分之二;
- 降低温室气体排放。

各种变压器的能效概括见**图表A11**。



图表A11: 各种变压器的能效概括

示例:

假设一台三相变压器 (630kVA, 20/0.4kV) 具有9300W的负载损耗和6%的短路阻抗。确定功率因数为1.0和0.8时的满载 (示例1) 和75%负载 (示例2) 下电压降。电压降通过以下示例得出:

示例1:

■ 满载  $\cos\varphi = 1$

$$U_{\text{drop}} = S/S_B \times (e_r \cos\varphi + e_x \sin\varphi) + 1/2 \times 1/100 \times (S/S_B)^2 \times (e_r \sin\varphi + e_x \cos\varphi)^2$$

$$U_{\text{drop}} = 100\% \times (1.476 \times 1 + 5.816 \times 0) + 1/2 \times 1/100 \times (100\%)^2 \times (1.476 \times 0 + 5.816 \times 1)^2$$

$$= 1.645\%$$

■ 满载  $\cos\varphi = 0.8$

$$U_{\text{drop}} = S/S_B \times (e_r \cos\varphi + e_x \sin\varphi) + 1/2 \times 1/100 \times (S/S_B)^2 \times (e_r \sin\varphi + e_x \cos\varphi)^2$$

$$U_{\text{drop}} = 100\% \times (1.476 \times 0.8 + 5.816 \times 0.6) + 1/2 \times 1/100 \times (100\%)^2 \times (1.476 \times 0.6 + 5.816 \times 0.8)^2$$

$$= 4.832\%$$

示例2:

■ 75%负载  $\cos\varphi = 1$

$$U_{\text{drop}} = S/S_B \times (e_r \cos\varphi + e_x \sin\varphi) + 1/2 \times 1/100 \times (S/S_B)^2 \times (e_r \sin\varphi + e_x \cos\varphi)^2$$

$$U_{\text{drop}} = 75\% \times (1.476 \times 1 + 5.816 \times 0) + 1/2 \times 1/100 \times (75\%)^2 \times (1.476 \times 0 + 5.816 \times 1)^2$$

$$= 1.202\%$$

■ 75%负载  $\cos\varphi = 0.8$

$$U_{\text{drop}} = S/S_B \times (e_r \cos\varphi + e_x \sin\varphi) + 1/2 \times 1/100 \times (S/S_B)^2 \times (e_r \sin\varphi + e_x \cos\varphi)^2$$

$$U_{\text{drop}} = 75\% \times (1.476 \times 0.8 + 5.816 \times 0.6) + 1/2 \times 1/100 \times (75\%)^2 \times (1.476 \times 0.6 + 5.816 \times 0.8)^2$$

$$= 3.589\%$$

式中  $U_{\text{drop}}$  ——电压降 (百分数) (%) ;

$L_L$  ——负载损耗 (W);

$S_B$  ——变压器功率 (W);

$e_r$  ——电阻部分 (VA);

$U_k$  ——短路阻抗 (%);

$e_x$  ——电抗部分 (VA)。

## 2.5 电压降

电压降是指某个绕组的空载电压与其在指定负载和功率因数下的端子电压之间的算术差值, 同时另一个 (一组) 绕组的电压等于:

- 其额定值 (如果变压器连接在主分接头上, 此时绕组的空载电压等于其额定值);
- 分接电压 (如果变压器连接在另一个分接头上)。

该差值通常表示为绕组空载电压的百分比。

注: 对于多绕组变压器, 电压的下降或升高不仅取决于绕组本身的负载和功率因数, 还取决于其他绕组的负载和功率因数 (见IEC 60076-8)。

### 电压降计算需求

关于变压器的额定功率和额定电压的IEC定义, 额定功率为输入功率, 并且额定有功功率下施加在一次侧端子上的运行电压原则上不应超过额定电压。因此, 负载条件下的最大输出电压是额定电压 (或分接电压) 减去电压降。原则上, 额定电流和额定输入电压下的输出功率是额定功率减去变压器损耗 (有功损耗和无功功率)。

而北美习惯, 变压器的额定功率值MVA则是基于以下方式获得: 在一次侧绕组上施加电压并补偿电压降, 以保持二次侧的额定电压不变, 当二次侧在滞后功率因数大于0.8时得到额定电流, 此时的输入功率为额定功率。

为保障在一定负载下输出电压能够满足要求, 那么就要确定在输入端是采用相应的额定电压还是分接电压, 而电压降则可以利用已知或估算的变压器短路阻抗值来计算。

$$U_{\text{drop}} = S/S_B \times (e_r \cos\varphi + e_x \sin\varphi) + 1/2 \times 1/100 \times (S/S_B)^2 \times (e_r \sin\varphi + e_x \cos\varphi)^2$$

式中  $e_r$  ——电阻部分,  $e_r = L_L/S_B$ ;

$e_x$  ——电抗部分,  $e_x = \sqrt{(U_k^2 - e_r^2)}$ 。