

# 电力变压器的工作原理及性能分析

罗海宝

中广核新能源宁东有限公司 宁夏 银川 750000

**摘要：**本文围绕电力变压器展开，阐述了其工作原理、主要性能指标、影响性能的因素及提升策略。工作原理基于电磁感应，核心结构协同运作实现电压转换。主要性能指标包括电压调整能力、能量转换效率和绝缘安全性能。铁芯、绕组及运行环境等影响性能。提升策略涵盖优化设计与材料选择、强化运行维护管理及引入智能化监测技术。

**关键词：**电力变压器；工作原理；性能分析；效率提升

引言：电力变压器作为电力系统中的核心设备，承担着电能转换与传输的关键任务，其性能直接影响电网的安全稳定运行与能源利用效率。本文从电磁感应原理、核心结构协同及电压转换机制出发，系统阐述变压器的工作机理；结合电压调整能力、能量转换效率及绝缘安全性能等关键指标，深入分析其性能特性。同时，探讨铁芯材质、绕组结构及运行环境对性能的影响，并提出优化设计、强化运维及智能化监测等提升策略，为变压器的高效运行与可靠性保障提供理论支撑与实践指导。

## 1 电力变压器的工作原理

### 1.1 电磁感应的基础作用

电磁感应电力变压器中发挥着基础且核心的作用，是变压器实现电能转换与传递的物理基石。当交流电流接入变压器的一次绕组时，依据电流的磁效应，会在绕组周围激发出一个随时间不断变化的交变磁场。变压器的铁芯通常采用高导磁率的硅钢片制成，其独特的导磁性能犹如“磁场通道”，能够高效地将一次绕组产生的交变磁场集中并引导至二次绕组所在区域。根据法拉第电磁感应定律，闭合电路中磁通量的变化会产生感应电动势。因此，这个交变磁场穿过二次绕组时，会使二次绕组内的磁通量发生周期性变化，进而在二次绕组中产生感应电动势。若二次绕组与用电设备相连形成闭合回路，在感应电动势的驱动下，回路中就会产生感应电流。如此，电能便通过这种基于电磁感应的磁场耦合方式，从一次侧顺利传递至二次侧，完成了变压器的变压与电能传输功能。

### 1.2 核心结构的协同运作

电力变压器主要由铁芯、绕组、油箱、绝缘套管和冷却装置等部分组成。铁芯作为磁路的主体，通常由高导磁率的硅钢片叠制而成，其目的是减小磁滞损耗和涡流损耗，让磁场能够更高效地通过。绕组分为一次绕组和二次绕组，是变压器的电路部分，它们通过电磁感应

完成电能的转换与传输。油箱用于容纳变压器油，变压器油不仅能够起到绝缘的作用，还能在变压器运行过程中带走产生的热量，起到冷却的效果。绝缘套管则负责将绕组的引出线从油箱内安全引出，保证带电部分与接地部分之间有良好的绝缘。

### 1.3 电压转换的实现过程

变压器实现电压转换的核心原理在于巧妙调整一次绕组与二次绕组的匝数。在变压器运行过程中，基于电磁感应定律，绕组匝数与感应电动势之间存在着紧密关联。具体而言，当交流电流通过一次绕组时，会产生交变磁场，该磁场同时穿过一次绕组和二次绕组，并在其中分别感应出电动势。由于一次绕组和二次绕组匝数不同，导致二者所感应出的电动势存在差异。若一次绕组匝数多于二次绕组匝数，那么二次侧感应出的电动势就会低于一次侧，此时变压器输出电压低于输入电压，成为降压变压器，适用于将高压电能转换为低压电能供给用户端使用。反之，当二次绕组匝数多于一次绕组匝数时，二次侧感应电动势高于一次侧，变压器输出电压高于输入电压，即为升压变压器，常用于将发电厂发出的较低电压升高，以减少远距离输电过程中的能量损耗<sup>[1]</sup>。

## 2 电力变压器的主要性能指标

### 2.1 电压调整能力

电压调整能力是衡量电力变压器性能的关键指标之一，它直接反映了变压器在负载动态变化过程中维持输出电压稳定的能力。变压器主要通过自身的电磁特性，如磁路的饱和特性、绕组的阻抗特性等来调整电压。在实际电力系统中，接入的用电设备数量和功率并非恒定不变，而是随着生产生活需求不断波动，这必然导致变压器负载的相应变化。变压器对电压调整的要求是，在负载变化时，将输出电压波动严格控制在允许的较小范围内。一般来说，不同类型的变压器和不同的应用场景，电压调整范围有所不同。例如，对于一般的配电变

压器,在额定负载到空载的变化过程中,输出电压的波动范围通常要求不超过额定电压的 $\pm 5\%$ ;而对于一些对电压稳定性要求极高的精密设备供电变压器,电压调整范围可能要求更小,如 $\pm 2\%$ 甚至更低。若变压器电压调整能力不足,输出电压将出现显著波动,这种波动会严重干扰用电设备的正常运行,例如造成设备运行不稳定、效率降低,甚至可能引发设备过热、绝缘损坏等故障,缩短设备使用寿命。而具备良好电压调整能力的优质变压器,能够充分利用其自身的电磁特性,对输出电压进行实时、精准的调节,从而为用户提供持续、稳定、高质量的电力供应,保障电力系统的安全可靠运行。

## 2.2 能量转换效率

能量转换效率是评估变压器性能的核心参数之一,它精准地反映了变压器在电能转换过程中对能量的有效利用水平。在变压器实际运行过程中,由于电磁作用和物理特性,能量损耗不可避免,主要包括铁损耗和铜损耗。(1)铁损耗:主要由铁芯在交变磁场作用下产生的磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗源于铁磁材料磁化过程中磁畴反复翻转的能量消耗,涡流损耗则是交变磁场在铁芯中感应出涡流导致的发热。(2)铜损耗:源于绕组电阻,当电流通过绕组时,电阻会产生热量,造成能量损失。(3)优化铁芯设计:选用高导磁率、低损耗的硅钢片制作铁芯,减少磁滞损耗和涡流损耗。合理设计铁芯的叠片方式、形状和尺寸,减少硅钢片间的气隙,优化磁路结构,使磁场分布更加均匀。(4)合理选择绕组参数:根据变压器的容量和电压等级,精确计算绕组的匝数和线径。合适的线径可有效控制电阻,减少铜损耗;合理的匝数设计能满足电压变比要求,同时降低电抗,提高能量传递效率。(5)改善冷却条件:采用高效的冷却装置,如增加散热片数量、优化散热片布局、使用强制风冷或油冷等方式,及时散发变压器运行时产生的热量,降低变压器温度,减少因温度升高导致的能量损耗增加。当能量损耗已经发生时,可通过定期维护和检修来解决问题。例如,检查铁芯的紧固情况,防止因铁芯松动产生额外的磁滞损耗;清理绕组表面的灰尘和污垢,改善散热条件,降低铜损耗;对绝缘老化或损坏的部件进行及时更换,避免因绝缘问题导致漏电和能量损失。

## 2.3 绝缘安全性能

绝缘安全性能是电力变压器安全稳定运行的核心保障。变压器运行中需长期承受高电压、强电场,内部绝缘材料与结构要有卓越性能,以阻隔电流不正常流通,避免漏电、击穿等隐患。(1)绝缘等级,依据绝缘材料

所能承受的最高温度划分,常见有 A、E、B、F、H 等级,不同等级对应不同最高允许温度,如 A 级为  $105^{\circ}\text{C}$ ,H 级为  $180^{\circ}\text{C}$ 。(2)绝缘分类,分为内绝缘和外绝缘。内绝缘是油箱内部各部件间绝缘,含绕组、引线、铁芯绝缘等;外绝缘是油箱外部与周围环境间绝缘,如绝缘套管对地绝缘。(3)合格标准,通过绝缘电阻、介质损耗因数、局部放电等测试确定。绝缘电阻常温下不低于规定值;介质损耗因数在规定范围,表明介质损耗小;局部放电量极低,防止绝缘劣化。(4)影响绝缘性能的因素。材料方面,绝缘纸含水量高、绝缘漆附着力差等质量问题,会使绝缘性能下降。制造工艺上,绕组绕制不紧密、绝缘层厚度不均、铁芯绝缘处理不当等缺陷,影响绝缘效果。运行环境里,高温、高湿度、腐蚀性气体等会加速绝缘材料老化、受潮、腐蚀。此外,电网中的过电压和变压器内部过电流会损伤绝缘,雷击过电压可能致绝缘击穿,短路电流产生的电动力会破坏绝缘结构<sup>[2]</sup>。

## 3 影响电力变压器性能的因素

### 3.1 铁芯材质与构造的影响

铁芯材质与构造对变压器性能有着至关重要的影响。在材质方面,高导磁率、低损耗的硅钢片是制作变压器铁芯的理想选择。高导磁率特性使得铁芯能够更高效地引导磁通,减少磁阻,从而降低磁滞损耗;而低损耗特性则有效抑制了交变磁场在铁芯中引发的涡流,减少了涡流损耗。这两方面共同作用,显著提升了变压器的能量转换效率,并增强了其运行稳定性。在构造上,铁芯的叠片方式、形状和尺寸等细节同样不容忽视。合理的叠片方式能够减少硅钢片间的气隙,优化磁路结构,使磁场分布更加均匀;铁芯的形状和尺寸则需根据变压器的容量、电压等级等参数进行精心设计,以确保磁场的有效利用和损耗的最小化。通过优化铁芯构造,可以进一步提升变压器的整体性能,包括提高效率、降低温升、增强抗短路能力等,从而延长变压器的使用寿命,保障电力系统的安全稳定运行。

### 3.2 绕组结构与参数的作用

绕组结构与参数在变压器性能塑造中扮演着关键角色。绕组的匝数设计直接决定了变压器的电压变比,是电能转换的核心参数之一。线径的选择则关乎绕组的电阻大小,线径过细会使电阻增大,电流通过时产生更多热量,导致铜损耗显著上升,降低变压器效率;而合适的线径可有效控制电阻,减少能量损耗。绕制方式影响磁场耦合紧密程度,紧密且合理的绕制能增强初次级绕组间的磁通交互,提升能量传递效率;若绕制松散,磁场耦合效果不佳,变压器性能将大打折扣<sup>[3]</sup>。

### 3.3 负载特性、工作频率和气隙的影响

负载特性：负载的大小、性质（如感性负载、容性负载或阻性负载）以及负载的变化频率都会影响变压器的性能。例如，负载电流过大可能导致绕组过热，加速绝缘老化；感性负载会产生无功功率，影响变压器的功率因数；负载频繁变化会使变压器承受较大的机械应力和热应力，影响其使用寿命。工作频率：变压器通常设计在特定的频率下工作，如 50Hz 或 60Hz。当工作频率偏离设计值时，会影响变压器的磁通密度、铁损耗和铜损耗等。频率升高可能导致铁芯磁通密度降低，铁损耗减小，但铜损耗可能增加；频率降低则可能使铁芯磁通密度饱和，铁损耗大幅增加。气隙：在铁芯中设置气隙可以改变变压器的磁路特性，如降低磁导率、增加磁阻等。

### 3.4 运行环境与条件的制约

电力变压器的运行环境与条件是影响其性能的关键外部因素。温度方面，高温会加速绝缘材料分子链的断裂与氧化反应，使其绝缘性能急剧下降；低温则可能导致绝缘油黏度增大，影响散热与绝缘效果。湿度过高会使绝缘材料受潮，降低绝缘电阻，增加漏电风险。灰尘附着在绕组和铁芯表面，会形成导电通路，引发局部放电，加速绝缘损坏。腐蚀性气体如二氧化硫、氯化氢等，会侵蚀金属部件和绝缘材料，缩短变压器寿命。运行条件上，电网电压波动会使变压器铁芯磁通密度变化，引发磁滞和涡流损耗增加。负载频繁变化导致绕组电流大小和方向不断改变，产生机械应力和热应力，加速绕组绝缘老化。短路故障时，巨大的短路电流会产生强大的电磁力，可能使绕组变形、绝缘损坏。

## 4 提升电力变压器性能的策略

### 4.1 优化设计与材料选择

优化设计与材料选择是提升变压器性能与可靠性的关键。设计阶段，要紧密结合实际需求确定铁芯和绕组关键参数。铁芯设计需依据容量、电压等级等，合理规划形状、尺寸及叠片方式，考虑负载特性等因素综合优化，保证磁场分布均匀、磁路损耗低。绕组参数方面，精确计算匝数、线径，匹配电压变比并控制电阻、电

抗，依负载特性选线径，按工作频率和气隙要求设计匝数与绕制方式，提高磁场耦合效率。材料选择上，优先用高性能材料。铁芯选低损耗硅钢片，减少磁滞损耗；绕组用高导电率铜线，降低铜损耗。

### 4.2 强化运行维护管理

强化运行维护管理是保障电力变压器安全高效运行的关键。需构建完善运维制度，明确标准、流程与周期。日常运维中，利用先进监测设备，实时精准监测关键参数，结合负载特性等因素分析数据，及时发现并处理潜在异常。定期全面清洁变压器，检查绝缘部件有无裂纹、受潮等，紧固铁芯和绕组。依据额定容量与性能参数合理安排负载，避免长期过载，使负载平稳变化，确保变压器安全高效运行，延长寿命、降低故障率。选用有优异电气、耐热和机械性能的绝缘材料，设计合理绝缘结构。同时，针对不同运行环境，选有相应防护性能的材料，如在潮湿环境用防潮绝缘材料<sup>[4]</sup>。

### 结束语

电力变压器作为电力系统的核心设备，其性能优劣关乎整个系统的安全与稳定。从工作原理的精准把握，到性能指标的严格把控，再到各类影响因素的全面考量，每一环节都至关重要。通过优化设计与材料选择、强化运行维护管理以及引入智能化监测技术等策略，可有效提升变压器性能。未来，随着技术不断进步，我们需持续探索创新，进一步提升变压器性能，以适应电力系统日益复杂和多样化的需求，为电力行业的可持续发展提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1]徐路强.浅谈继电保护技术在电力变压器故障中的应用[J].电子世界,2019(24):170-171.
- [2]李战赠,杜兴.“双碳”战略之变压器配置研究[J].智能建筑电气技术,2022,16(04):55-58.
- [3]卢音赐.电力变压器继电保护配置及常见故障分析[J].大众用电,2021,36(11):57-58.
- [4]叶美强,彭文架.变压器的保护配置方式探讨[J].大众用电,2021,36(04):30-31.