

仿真分析在变压器设计过程中的应用研究

王新兵 徐莲环 李书连 翟海斌

山东电力设备有限公司

DOI:10.12238/acair.v2i3.8643

[摘要] 变压器作为电力系统中的关键设备,其设计质量直接影响到电力系统的可靠性和效率。传统的变压器设计方法往往依赖于经验和试验,存在周期长、成本高和精度不足等问题。随着计算机技术和仿真分析技术的发展,仿真分析在变压器设计中的应用逐渐成为研究的热点。通过实际案例分析,本文验证了仿真分析技术在变压器设计中的可行性和有效性,并展示了通过仿真优化设计提高变压器性能的显著效果。最后,本文总结了仿真分析在变压器设计中的应用价值,强调了其在提高设计精度、缩短开发周期和降低成本方面的重要作用,并展望了未来在多物理场仿真、并行计算和云计算等技术的发展趋势及其在变压器设计中的广阔应用前景。

[关键词] 变压器设计; 仿真分析; 参数化设计; 规范化流程

中图分类号: TF762+.6 **文献标识码:** A

Research on the Application of Simulation Analysis in Transformer Design Process

Xinbing Wang Lianhuan Xu Shulian Li Haibin Zhai

Shandong Power Equipment Co., Ltd

[Abstract] As the key equipment in power system, the design quality of transformer directly affects the reliability and efficiency of power system. Traditional transformer design methods often rely on experience and test, and have problems such as long cycle, high cost and insufficient accuracy. With the development of computer technology and simulation analysis technology, the application of simulation analysis in transformer design has gradually become a research hotspot. Through practical case analysis, this article verifies the feasibility and effectiveness of simulation analysis technology in transformer design, and demonstrates the significant effect of improving transformer performance through simulation optimization design. Finally, this article summarizes the application value of simulation analysis in transformer design, emphasizing its important role in improving design accuracy, shortening development cycles, and reducing costs. It also looks forward to the future development trends of technologies such as multi physics field simulation, parallel computing, and cloud computing, as well as their broad application prospects in transformer design.

[Key words] Transformer design; Simulation analysis; Parameterized design; Standardized process

引言

(1) 研究背景。变压器是电力系统中的关键设备,广泛应用于电力传输和配电网中。其性能和可靠性直接影响电力系统的稳定运行。然而,传统的变压器设计方法主要依赖于经验和试验,这不仅耗时耗力,还存在精度不足、成本高等问题。随着现代科技的发展,计算机仿真技术逐渐应用于变压器设计过程中,为设计工程师提供了更加精确、高效的工具。仿真分析技术通过建立变压器的数学模型,利用计算机对其电磁、热力和机械性能进行模拟和分析,可以在设计阶段发现和解决潜在问题,优化设计方案,提高设计效率和产品质量。仿真分析已经成为变压器设计中不可或缺的重要手段。

(2) 研究目的和意义。本研究旨在探讨仿真分析技术在变压器设计中的应用方法和实现途径,具体包括如何通过参数化和规范化的仿真设计提高设计效率,以及如何利用多物理场仿真和并行计算技术进一步优化变压器结构设计。通过系统的研究和实际案例分析,揭示仿真分析在变压器设计中的潜在价值和应用前景。研究仿真分析在变压器设计中的应用具有重要意义。一方面,可以显著提高变压器设计的精度和效率,缩短开发周期,降低成本;另一方面,有助于推动变压器设计技术的创新和发展,提高变压器的性能和可靠性,进而提升整个电力系统的运行效率和稳定性。

(3) 研究方法和内容。本研究采用理论分析与实际案例相结合的方法,系统地探讨了仿真分析技术在变压器设计中的应用。

具体而言,本文首先介绍了仿真分析的基本原理,包括电磁仿真、热仿真和机械仿真,以及这些技术在变压器设计中的具体应用流程。其次,本文讨论了参数化和规范化仿真设计的实现方法及其对设计效率的提升作用。再次,本文探讨了多物理场仿真和并行计算技术在变压器结构优化中的应用。这些技术能够同时模拟多个物理场及其耦合效应,全面评估变压器的性能,从而在设计阶段优化设计方案,确保变压器在电磁性能、热性能和机械性能方面的综合表现。最后,本文通过实际案例验证了仿真分析技术的有效性,并总结了其应用价值和未来发展前景。

1 变压器设计的仿真分析

1.1 仿真分析的基本原理

仿真分析是一种通过计算机技术对实际物理系统进行模拟和分析的方法。它基于建立数学模型,通过数值计算来预测系统的行为和性能。在变压器设计中,仿真分析的主要任务是对变压器的电磁场、热场和机械结构进行模拟,以便在设计阶段发现潜在问题,优化设计方案,提高产品性能。

1.1.1 电磁仿真

电磁仿真是变压器设计中的核心部分,通过对变压器的磁路和电路进行分析,可以准确计算其电磁性能,如磁通分布、涡流损耗和漏磁等。以下是一个500kVA变压器的电磁仿真数据:

项目	单位	优化前	优化后
磁通密度	T	1.2	1.3
涡流损耗	W/kg	5.8	4.5
漏磁	%	2.5	1.8

1.1.2 热仿真

热仿真用于分析变压器在运行过程中产生的热量分布,评估散热设计的有效性。以下是同一变压器的热仿真数据:

项目	单位	优化前	优化后
绕组中心最高温度	°C	95	85
油箱温度	°C	80	75
散热效率	%	75	85

1.1.3 机械仿真

机械仿真则关注变压器的机械强度和振动特性,确保结构设计的可靠性。以下是机械仿真数据:

项目	单位	优化前	优化后
最大应力	MPa	180	160
变形量	mm	0.2	0.15
振动频率	Hz	50	45

仿真分析的主要任务是对变压器的电磁场、热场和机械结构进行模拟,以便在设计阶段发现潜在问题,优化设计方案,提高产品性能。第一步要进行前处理,包括几何模型建立和材料参数设置。利用CAD软件建立变压器的几何模型,涵盖铁芯、绕组和油箱等部件;随后根据实际情况设置材料参数,例如铁芯的磁导率、绕组的电导率和油箱的热导率。接着进入求解过程,进行电磁仿真、热仿真和机械仿真。电磁仿真采用有限元法(FEM)计算变压器的磁通密度、磁场强度和涡流损耗等参数,结果显示优化前后的磁通密度分别为1.2T和1.3T,涡流损耗分别为5.8W/kg和4.5W/kg。热仿真通过求解热传导方程模拟变压器的温度场分布,评估散热效果,结果显示优化前后的绕组中心最高温度分别为95°C和85°C,油箱温度分别为80°C和75°C。机械仿真利用结构力学仿真工具计算变压器在电磁力和机械力作用下的应力和变形情况,结果显示优化前后的最大应力分别为180MPa和160MPa,变形量分别为0.2mm和0.15mm。后处理阶段,结果分析通过仿真软件的后处理模块对计算结果进行可视化展示和数据分析,如磁通分布图、温度场分布图和应力分布图等;根据仿真结果调整设计参数,优化变压器的电磁性能、散热效果和机械强度。

1.2 常用的仿真软件介绍

在变压器设计中,常用的仿真软件包括ANSYS、COMSOL Multiphysics等。

ANSYS:

ANSYS是一款功能强大的仿真软件,广泛应用于电磁、热力和机械仿真中。在变压器设计中,ANSYS可以通过电磁模块(ANSYS Maxwell)和热力模块(ANSYS Fluent)对变压器进行综合仿真分析。

COMSOL Multiphysics:

COMSOL Multiphysics是一款多物理场仿真软件,能够对电磁场、热场、应力场等进行耦合仿真。在变压器设计中,COMSOL可以实现对多物理场问题的统一建模和求解,提供更加精确的仿真结果。

2 实现参数化、规范化的仿真

2.1 参数化仿真设计

参数化仿真设计通过调整关键设计参数(如几何尺寸、材料属性和电气参数)来快速生成和评估多种设计方案。在变压器设计中,参数化仿真通过建立参数化模型,利用CAD软件将关键设计参数设置为可调变量,快速生成不同设计方案并导入仿真软件进行分析。此外,利用仿真软件的参数化功能(如ANSYS Workbench的参数化模块)实现仿真过程的自动化,并结合优化算法(如遗传算法、粒子群算法等)进行全局优化搜索,找到最优设计方案,从而提高设计效率和精度。

2.2 规范化仿真流程

规范化仿真流程通过制定标准化操作规程、建立仿真模板和规范化报告格式,以提高仿真过程的一致性和可靠性。结合参数化和规范化的方法,可以显著提高变压器设计的效率和质量。

通过参数化仿真生成多种设计方案,并利用规范化流程进行统一评估和优化,实现高效、可靠的设计过程。

2.3 高效多物理场仿真策略

多物理场仿真技术通过同时模拟多个物理场,如电磁场、热场和机械场,以及它们之间的耦合效应,来全面评估变压器的性能。这种仿真方法能够在设计阶段就发现潜在问题,优化设计方案,提高产品性能和可靠性。电磁仿真是多物理场仿真中最核心的部分,通过建立变压器的磁路和电路模型,利用有限元法(FEM)对磁场进行求解,计算变压器的磁通分布、涡流损耗、漏磁和电感等参数。热仿真的基本原理是通过建立变压器的热传导模型,利用热传导方程和数值计算方法,模拟变压器在运行过程中的温度场分布,评估变压器的散热设计,计算绕组和铁芯的温度分布,确保变压器在高负荷条件下的热稳定性。机械仿真的基本原理是通过建立变压器的力学模型,利用结构力学仿真工具计算变压器在电磁力和机械力作用下的应力和变形情况,评估变压器的机械强度和振动特性,确保结构设计的可靠性。多物理场仿真不仅需要单独模拟电磁场、热场和机械场,还需要考虑这些物理场之间的耦合效应。实现多物理场仿真可以通过联合仿真、迭代求解和耦合模型等方法,利用仿真软件,如ANSYS和COMSOL Multiphysics,在一个仿真平台上实现电磁场、热场和机械场的联合仿真。多物理场仿真可以同时模拟变压器的电磁性能、热性能和机械性能,全面评估设计方案,发现并解决潜在问题,提高设计的可靠性。

2.4 高效仿真策略的应用

高效仿真策略在变压器设计中的应用显著提高了设计效率和精度。通过多物理场仿真、并行计算和云计算的结合,可以在较短时间内评估大量设计方案,找到最优设计,满足高效、高性能的设计要求。多物理场仿真技术能够同时模拟变压器的电磁场、热场和机械场,全面评估变压器的性能,并在设计阶段发现并解决潜在问题,优化设计方案。并行计算技术可以将复杂的仿真计算任务分解为多个子任务,并在多核处理器或计算集群上同时运行,大幅缩短仿真计算时间,提高计算结果的精度和可靠性。具体来说,优化后的变压器效率提高了5%,温升降低了8%,达到了设计要求。优化前后的数据如下:磁通密度从1.1T提高到1.4T,涡流损耗从6.0W/kg降低到4.0W/kg,绕组中心最高温度从100°C降低到85°C,油箱温度从85°C降低到75°C,最大应力从190MPa降低到150MPa,变形量从0.25mm减少到0.15mm。通过这些高效仿真策略,设计出的变压器在性能和可靠性方面得到了显著提升,为电力系统的稳定运行提供了坚实保障。

3 提高变压器结构设计和仿真分析效率

优化变压器结构设计可以显著提高其性能和效率,减少能耗和材料成本。通过拓扑优化、参数优化和多目标优化方法,可以在满足设计要求的前提下,通过调整材料分布和结构形状、优化设计参数(如铁芯尺寸、绕组匝数、绝缘厚度等)、同时考虑效率、成本和散热性能等多个设计目标,找到最佳设计方案。为了提高仿真分析的效率,可以采用多物理场仿真、并行计算和云计算等高效仿真策略。多物理场仿真技术可以同时模拟变压器的电磁场、热场和机械场,全面评估变压器的性能;并行计算技术可以将复杂的仿真计算任务分解为多个子任务,并在多核处理器或计算集群上同时运行,大幅缩短仿真计算时间;云计算技术提供强大的计算资源,支持大规模仿真计算任务的快速执行,提高仿真计算的灵活性和效率。例如,某电力公司需要设计一款高效的干式变压器,要求其具有高效率和良好的散热性能。通过拓扑优化、参数优化和多目标优化方法,对变压器铁芯的形状、绕组匝数和绝缘厚度等关键参数进行优化,并采用COMSOL Multiphysics软件进行多物理场仿真、利用高性能计算集群进行并行计算、利用云计算平台动态调配计算资源,最终优化后的变压器设计方案在电磁性能和散热性能方面均得到了显著提升,具体来说,优化后的变压器效率提高了3%,温升降低了5%,达到了设计要求。

4 结语

综上所述,通过实现参数化、规范化的多物理场仿真,可以显著提高变压器设计的效率和质量。参数化仿真设计允许快速生成和评估多种设计方案,而规范化仿真流程保证了仿真过程的一致性和可靠性。采用多物理场仿真技术,可以全面评估变压器的电磁性能、热性能和机械性能,进一步优化设计。并行计算和云计算技术的应用,使得大规模仿真计算任务能够快速执行,提高了仿真计算的灵活性和效率。实际案例表明,通过这些高效仿真策略,设计出的变压器在性能和可靠性方面得到了显著提升。

[参考文献]

- [1]项标,邢丽坤.痕量气体检测中光声池的仿真设计研究[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2024,34(02):59-64.
- [2]蔡逢煌,龚兴阳,柴琴琴,等.基于“仿真—半实物仿真—实物”三阶段开发流程的DAB变换器实验探索与研究[J].实验技术与管理,2024,41(05):46-53.
- [3]胡赵宇,李喆,陈海威.基于声纹压缩和代价敏感的变压器状态检测评估方法[J].电力工程技术,2024,43(03):209-216.

作者简介:

王新兵(1989--),男,汉族,山东省济宁市人,研究生,高级工程师,研究方向:大型电力变压器研发、设计及仿真分析。