

电力工程输变电设备的电气与机械耦合问题及优化设计

王 辉¹, 卢文春², 刘洪涛³

- (1. 山东泰丰电力工程有限公司, 山东 潍坊 261000;
2. 中天昊建设管理集团股份有限公司, 山东 东营 257000;
3. 中言建设工程有限公司, 山东 济宁 272100)

摘 要 本文对电气与机械耦合的基本原理进行了阐述, 分析了电气负荷波动对机械结构的影响, 提出了基于建模与仿真技术的优化设计方法, 通过调节机械结构的动态响应、电气负荷的合理分配以及优化耦合阻抗等手段, 实现了电气与机械系统的协同优化。研究表明, 电气与机械耦合问题的优化设计不仅能够提升设备的长期运行性能, 还减少了故障率, 延长了使用寿命, 保障了电力系统的安全运行。

关键词 电力工程; 输变电设备; 电气与机械耦合; 优化设计

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.06.004

0 引言

电气与机械耦合问题在输变电设备的设计、运行过程中普遍存在, 尤其是在变压器、断路器、发电机组及电动机等重要设备中, 耦合效应表现得尤为突出。通过优化电气与机械系统之间的耦合关系, 不仅能够提升设备的运行效率, 还能减少设备故障率, 降低维护成本, 进而提高电力系统的整体稳定性与安全性, 提升设备的可靠性与效能。

1 电气与机械耦合问题概述

1.1 耦合原理

在生活中, 电力设备的电气与机械系统是相互依赖, 相互影响的。其中, 电气系统以电流、电压、磁场为主要参数, 而机械系统主要研究物体的运动、振动、力学变形等。电气设备在工作过程中, 由于电流、电压等因素引起的电磁力, 会对设备各部位造成冲击, 使其发生振动、变形或位移, 从而降低其工作的稳定性^[1]。反之, 设备的转动和振动等各部件的运动也会对电气系统产生反馈作用, 这在电动机、发电机、变压器等设备中表现得尤其突出。

1.2 典型设备中的耦合问题

在变压器中, 由于负载的变动而产生的磁场变化, 将对其产生一定的影响, 从而使其发生机械振动。铁心的振动不仅会产生噪声, 而且会给设备带来附加的机械应力。长期的振动累积会引起铁心结构的老化, 从而降低其长期稳定性。另外, 随着温度的改变, 变

压器的机械构造也会发生改变, 从而对其电气性能产生一定的影响。

断路器的机械部分包括开关机构和传动系统。电气负载波动导致开关操作频繁, 从而增加机械部件的磨损, 降低断路器的开关寿命。此外, 断路器的机械传动部分的工作状态也会影响电气系统的响应速度和断开能力, 导致电气系统在过载或故障情况下的响应不及时。

电动机和发电机是电力系统中的重要设备, 它们的机械部分与电气系统之间的耦合效应尤为显著。电气负载的变化直接影响到电动机的转速和扭矩, 而机械振动和转动又会对电气性能产生反馈影响。

电缆是输电系统的主体, 其电气性能和机械性能也是影响电力传输的重要因素。在这种情况下, 电流的改变不但会引起线缆的温度升高, 而且会引起其机械结构的改变, 从而对电力输送的稳定与安全产生不利影响^[2]。另外, 在敷设电缆时, 由于外界机械应力, 导致电气性能的降低。

2 电气与机械耦合对输变电设备的影响

2.1 影响设备的运行稳定性

电气负荷波动引起的电磁力变化, 能够直接作用于机械系统, 进而影响设备的动态响应, 这种影响在变压器、断路器和电机等设备中尤为明显。电气负荷波动和电磁力的不稳定会导致设备内部的机械部分产生振动。特别是在变压器和断路器中, 长期存在的机

机械振动会对设备的结构造成疲劳损害,增加机械部件的磨损,从而降低设备的稳定性和可靠性^[3]。振动的积累会导致机械部件的失效,进而影响设备的正常运行。电气与机械耦合效应的长期作用,特别是在高负荷和长时间运行条件下,会导致设备产生疲劳效应。

2.2 影响系统效率与性能

电气负荷波动产生的电磁力会影响机械部件的运动,从而导致能量损耗。例如,变压器中的磁力变化会引起铁心的振动,振动过程中会产生一定的能量损失,导致系统的功率效率下降。同样,电动机和发电机在运行过程中,由于电气与机械之间的耦合作用,也会出现一定的能量损失,表现为转动效率降低或电能转换效率下降^[4]。

电气负载的波动引起的温度变化,尤其是当负载过高时,会加剧设备的热负荷。电气与机械耦合会导致设备机械部分的变形或摩擦增加,从而加速温升。变压器、断路器等设备的高温可能会影响机械结构的稳定性,甚至导致绝缘材料的老化,从而引起设备故障或性能衰退。长期的温升还会使设备的工作环境恶化,进一步影响设备的正常运行。

由于电气系统的负荷波动,电力设备的某些部分会承受局部过载。例如,在断路器中,过载的电流波动会导致开关机构承受超负荷的机械力,从而加剧机械部件的磨损。此外,电动机或变压器等设备在运行中,电气系统的不稳定性会导致局部过载,影响设备的负载分配,最终导致部分机械部件的过度工作和过热现象^[5]。

2.3 影响设备寿命与维护

电气与机械耦合效应在设备长期运行中的作用,会加速机械部件的老化和磨损。例如,变压器中的铁心振动和电动机中的转子运动,长期的应力作用会导致金属疲劳、绝缘材料破损、连接部件松动等问题,从而导致设备的早期失效。

针对电气与机械耦合问题,设备的维护策略应更加注重系统的全面性和精准性。传统的单一电气或机械维护方法无法有效解决耦合问题。综合性的维护策略应包括定期检查电气负荷的波动情况,确保负载的均衡分配,并结合机械结构的健康状况进行综合检测^[6]。此外,使用智能化技术对设备进行动态监测与故障预测,能更好地优化设备的维护周期,减少非计划性停机时间,提升设备的长期可靠性和运行效率。

3 电气与机械耦合问题的优化设计方法

3.1 耦合问题的建模

电气系统通常使用电路理论和电磁场理论来进行建模。电路模型采用基于电流、电压和阻抗关系的基

本电路理论,建模变压器、电动机、断路器等设备的电气部分。例如,在电动机建模中,使用电流源和电压源与机械负载连接的电路模型来描述电机的电气特性。电磁场模型通过电磁场方程来描述电气元件的电磁力和磁场分布,这些方程通常基于麦克斯韦方程组,描述了电磁波传播和电场、磁场之间的相互作用^[7]。

机械系统的建模主要基于力学原理,包括刚体动力学、弹性力学和振动理论。刚体动力学模型通过建立机械部件的刚体动力学方程,描述各部件的运动、力矩和转动惯量。弹性力学与振动模型采用弹性力学方程描述机械部件的变形与振动,对于高频振动问题,可以使用简化的振动方程来模拟振动对电气系统的影响。

电气与机械的耦合需要将电气系统和机械系统的模型结合起来,考虑它们之间的相互作用。在力-电耦合模型中,电气系统产生的电磁力作用于机械部分,机械部件的运动反馈影响电气系统,通过将电气电路的电流、电压与机械系统的运动方程耦合,可以形成力-电耦合的联合模型。电气系统与机械系统之间的能量转换通过功率和能量平衡来描述,电气系统输出的电能转化为机械系统的机械能,反之亦然。

3.2 耦合问题的仿真

多物理场仿真方法,能够更真实地模拟各物理场之间的耦合效应。电磁-力学耦合仿真通过模拟电磁场与机械力学之间的相互作用,可以研究电机、变压器等设备的动态响应。比如,变压器的电磁力如何引起铁心的振动,进而影响变压器的稳定性。电气负荷波动导致的温升效应会影响机械系统的运动,进而影响设备的运行^[8]。通过热-力学耦合仿真,可以分析温度变化对机械部件的影响,以及温度对设备寿命的潜在影响。

电气与机械耦合问题涉及不同尺度的物理现象,例如,从微观尺度的电磁场变化到宏观尺度的机械振动。多尺度仿真方法能够跨越这些尺度进行有效分析,提供从微观电磁效应到宏观机械响应的全面解决方案。在微观尺度上,使用有限元分析方法模拟电气元件的电磁场分布,计算电磁力的大小和方向。在宏观尺度上,结合多体动力学方法,模拟机械部件的运动和相互作用,并计算机械振动、变形等因素对电气性能的影响。

为了研究电气与机械耦合在不同工作条件下的影响,仿真技术可以模拟设备在不同负荷、速度、温度等工况下的行为。通过工况仿真,可以揭示电气负荷波动、机械振动以及温度变化等因素对设备性能的具体影响,进而为优化设计提供数据支持^[9]。在不同负

载情况下,电机、变压器等设备的电气性能和机械响应会有所不同,仿真可以帮助分析负载波动对耦合系统的影响,并优化电气与机械系统的匹配。通过模拟系统在故障工况下的电气与机械响应,评估耦合效应对设备稳定性的影响。

3.3 优化设计方法

3.3.1 机械结构的动态优化

减振设计通过对机械部件的振动特性进行分析,可以识别出影响设备稳定性的振动模式。通过使用具有较高阻尼特性的材料,可以减少机械振动的传播,例如,采用复合材料或智能材料来制造设备的核心部分。通过有限元分析方法优化机械部件的几何形状,降低振动频率,避免与电气系统的耦合产生共振。在设备的关键部位增加减震器或阻尼器,进一步降低振动幅度,减少对电气系统的干扰。

动态阻尼设计通过分析设备在不同运行条件下的动态响应,采用动态阻尼控制技术来降低系统的机械振动。例如,使用自适应控制算法调节机械部件的阻尼特性,使其在不同负荷和速度下自动调整,以最小化电气与机械耦合带来的不稳定性^[10]。

对于需要高精度运动的机械部件,如电动机转子、变压器的开关机构等,可以通过优化其柔性设计来减少机械变形对电气系统的影响。采用高精度的机械结构设计和强度分析,确保机械系统在高负荷工况下保持稳定的运动轨迹,从而减少对电气元件的干扰。

3.3.2 电气负荷调节

在多机系统中,负荷的平衡至关重要,通过优化电力设备的负荷分配,可以避免单个设备承受过大的负载波动,从而减少电气负荷波动对机械部件的冲击。使用智能控制系统实时监测各设备的负荷状态,自动调节负载分配,避免某些设备过载或频繁启停。在输变电系统中,通过合理调度多个设备之间的负荷分配,避免电气负荷波动对单一设备造成过度冲击,降低电气与机械耦合效应。

电流波形的畸变会增加电磁力的波动,从而加剧电气与机械的耦合问题,通过优化电流波形,可以减小电气负荷波动对机械结构的影响。无谐波控制技术通过无谐波变频器或滤波器调节电流波形,使其趋于平稳,减少对设备的振动影响。控制电流频率和幅度通过合理控制电流的频率和幅度,可以降低负荷波动对设备运行的冲击,减少电气与机械耦合的负面效应。

3.3.3 耦合阻抗的调节

通过调节电磁系统和机械系统的阻抗匹配,可以降低两者之间的能量传递损失,并减少振动和温升。通过优化电磁绕组和铁心结构,减少磁场的分布不均和电磁损耗,从而降低机械振动。通过调整机械系统

的刚度和阻尼,优化其与电磁系统的配合,减少振动和功率损耗。设备中的电气与机械部分会通过接地系统相互耦合,尤其是在高电压设备中,接地与绝缘设计的优化能够有效减少电气与机械耦合问题^[11]。合理的接地设计可以防止电气干扰传递到机械系统,优化绝缘系统可以避免电磁场与机械振动的交互作用对设备的影响。

采用电气系统和机械系统间的滤波、隔离等措施,降低了高频噪声及非必要的电磁干扰,可使电气与机械耦合达到最优。为了防止对机械部件产生的电磁干扰,在电动机和电机驱动器之间增加电磁隔离装置。为了降低电气中的高频成分的波动,降低了电网中的机械部分的冲击。

4 结束语

通过分析电气与机械耦合问题对输变电设备的影响,揭示了其对设备稳定性、效率、寿命及电力系统可靠性的重要性。通过多种优化设计方法,如机械结构的动态优化、电气负荷调节以及耦合阻抗调节等,可以有效缓解电气负荷波动与机械振动之间的耦合效应,提升设备的运行效率和稳定性。此外,优化设计不仅能够提高设备的性能,还能减少故障发生、延长设备使用寿命,为电力系统的可持续发展提供有力支持。

参考文献:

- [1] 韩帅. 输变电工程建设中的人工智能技术应用 [J]. 张江科技评论, 2023(06):73-75.
- [2] 莫复雪. 计及输变电设备热稳定性约束的城市电网转供优化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [3] 张乐, 王芳, 张慧翔, 等. 输变电工程 EIM 全生命周期信息化框架研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44(03):224-230.
- [4] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型 [J]. 高电压技术, 2022, 48(01):1-10.
- [5] 汪鹏. 输变电工程品质管理问题及优化方法探析 [J]. 电力设备管理, 2021(03):128-129, 141.
- [6] 易英炜. 输变电工程质量风险分析技术与管控系统建设 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- [7] 陈本毅. 输变电设备智能化关键技术及发展趋势分析 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2018(24):6.
- [8] 杨乐, 王治国, 李诏宇. 新装置实现输变电设备无线无源测温 [N]. 科技日报, 2024-07-25(03).
- [9] 毛迅. 输变电工程建设项目人力资源错配及应对策略研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2023.
- [10] 张馨. 常州 HJ110kV 输变电工程项目进度计划及控制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [11] 董泽. F 电力工程公司输变电工程项目成本控制问题研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.