

[变压器]

新能源变压器抗短路能力的结构优化

文/唐永烁 张瑶涵 黄伟峰 黄俊生
广州市一变电气设备有限公司

随着全球能源需求增长和环境保护的压力，新能源变压器的抗短路能力结构优化问题值得关注。通过优化新能源变压器的结构，提升在短路条件下的性能。分析绕组、铁心和绝缘结构在短路情况下的问题，提出应对策略并评估其影响。旨在提高变压器的机械强度、电气性能和热管理能力，延长设备使用寿命和降低运行成本，为新能源变压器的设计和应用提供参考。

工业和信息化部、市场监管总局和国家能源局联合发布的《变压器能效提升计划（2021-2023年）》通知旨在提升变压器能效，促进绿色低碳和高质量发展，而新能源变压器的抗短路能力成为研究重点。本文在提高新能源变压器的抗短路能力，延长设备寿命和增强电网的稳定性，实现高效节能和绿色发展的战略目标具有重要意义。

新能源变压器抗短路能力存在的问题

1. 绕组不稳定

新能源变压器在短路电流作用下，绕组结构容易产生轴向不稳定性，绕组的轴向不稳定性表现在短路电流引发的强大电动力对绕组的冲击作用。短路电流达到10~30倍，短时间内产生的电动力强烈，这无疑导致绕组承受着轴向压力。短路电流作用下的绕组变形幅度达到绕组高度的0.3%~0.5%，对于绕组的机械性能和电气性能有影响。绕组的轴向变形导致线圈的几何形状发生改变，影响磁路的分布和增加电气损耗。这使得绕组内部的应力分布不均匀，局部应力集中区域出现塑性变形或永久性损伤。

绕组的材料选择和制造工艺对轴向稳定性产生

影响，如铜线绕组在短路电流作用下的屈服强度大概是250~300 MPa，当电动力超过限值时会发生变形。绕组的预紧力不足和制造过程中的偏心问题加剧轴向不稳定性，绕组的轴向变形超过设计容限导致变压器整体性能下降，引发绕组与铁心之间的机械摩擦来加剧绝缘材料的损耗^[1]。

2. 铁心材料变形

在短路电流引发电动力作用下，铁心结构受力不均。铁心材料在短路电流作用下产生了电磁应力，导致铁心局部区域出现高应力集中。短路电流在数百毫秒内上升，电磁力的突增导致铁心内应力分布不均匀，最大应力达到正常工作条件下的2~3倍。铁心的磁饱和现象在短路电流作用下较明显，局部区域的磁导率下降导致电磁力分布更为不均。铁心的受力不均会加速材料的疲劳，引发局部塑性变形或结构损坏。

短路电流导致铁心局部区域的温度升高，根据热力学原理分析得知温度升高1℃引起铁心材料的热膨胀率增加0.012%。铁心温度上升至正常工作温度的两倍以上，温度变化导致铁心材料的热应力增加，加剧结构的不稳定性。铁心受力不均与热应力作用来引发材料内部微裂纹的扩展和新的裂纹的产

生，降低铁心的整体机械强度。铁心夹紧结构和组装工艺的不足导致受力不均，夹紧力不均匀使铁心片之间的接触面应力分布不均，而影响电磁性能和机械强度。

3. 绝缘设计欠缺

绝缘结构问题分析见表1，新能源短路电流的瞬时高温加速绝缘材料的劣化。当温度上升到120℃，绝缘材料的强度降低约20%。绝缘层设计厚度不足，常规设计的2 mm厚度在实际短路情况下需3 mm厚度才能提供保护。局部绝缘过热，短路电流使局部温度达到150℃，超出绝缘材料的耐温极限，增加局部放电和绝缘击穿的概率和缩短绝缘寿命。这些问题表明新能源绝缘结构在短路条件下的性能和可靠性改进^[2]。

表1 绝缘结构问题分析

问题	描述	影响
绝缘材料劣化	温度升至120℃时，绝缘强度降低20%	绝缘强度降低，增加失效风险
绝缘设计缺陷	绝缘设计厚度2 mm，但需3 mm抵御短路电力	容易引发匝间短路，影响运行
局部绝缘过热	局部温度达150℃，超出材料极限（120℃）	增加局部放电和击穿概率
绝缘层间气隙	气隙达0.5 mm，局部电场强度增加30%	电场增强，增加击穿风险
耐环境性下降	高温>100℃、高湿>70%，绝缘电阻降低10%	影响寿命和可靠性
绝缘系统老化	温度波动60℃~90℃会导致绝缘电阻降低15%	电气和机械性能降低，增加故障率

新能源变压器抗短路能力的结构优化策略

1. 优化绕组结构

优化新能源绕组结构，需增强绕组的轴向支撑。增加绕组内部的承条数量和宽度提高绕组的轴向稳定性。如绕组轴向长度为 L ，设置等间距撑条，每条撑条宽度为 b ，确定撑条数量确保每段绕组受到均匀支撑，增强整体结构的稳定性。公式为

$$N = \frac{L}{b} \quad (1)$$

优化新能源绕组的紧密度，采用高精度绕组工艺来减少导线之间的间隙，提升绕组的机械强度。采用层间压紧技术，在每层绕组之间施加预定的压紧力 F ，使每层导线紧密地排列。压紧力的大小通

过公式计算， σ 为材料的屈服强度，为导线的截面积。通过计算减少导线间隙，提升绕组的抗拉伸和抗压缩能力和增强在短路电流作用下的稳定性。公式为

$$F = \sigma A \quad (2)$$

采用高强度铜线或铜箔作为绕组材料，提高绕组的机械性能和导电性能。高强度铜线的屈服强度在250~300 MPa之间，比普通铜线高20%~30%。选用强度更高的材料，如含银铜合金强度高，导电性能优异，在高电流密度下能保持稳定。增加轴向支撑和优化紧密度减小绕组在短路电流作用下的变形，高强度材料的应用增强绕组的耐久性^[3]。

2. 优化铁心结构

优化应力分布提高新能源变压器抗短路能力，改进铁心的几何结构和材料分布实现应力的均匀分布。采用分层设计将铁心分为多个薄层，每层厚度为 t ，总厚度为 T ，铁心层数 $N = \frac{T}{t}$ 。这能减少应力集中，降低局部应力。分层设计增强铁心的机械强度，在短路电流作用下不易发生变形。材料强化处理提高新能源变压器抗短路能力，采用高磁导率、低损耗的冷轧硅钢片并对表面强化处理提高铁心的抗疲劳性能。冷轧硅钢片的磁导率在 $1.2 \times 10^{-3} \sim 25 \times 10^{-3}$ 之间，经过表面处理后的抗拉强度可提高15%~20%。

通过渗碳、渗氮处理手段增强铁心材料的硬度和耐磨性，减少短路电流引发的材料疲劳。改进散热系统提高新能源变压器抗短路能力，设计高效的散热系统控制铁心的温度，增加散热片和改进冷却通道设计。优化散热片的排列方式和增加数量提高散热效率，使热量散出来保持铁心温度稳定。冷却通道设计需确保冷却液或空气流通顺畅，通过流量和流速的优化配置，使冷却效果达到最佳状态。

3. 优化绝缘结构

优化绝缘结构提升新能源变压器抗短路能力，采用高性能绝缘材料提升绝缘系统的可靠性。如选择耐高温、耐高压的聚酰亚胺薄膜作为绝缘材料，击穿电压为200 kV/mm，耐温性能优于传统材料。在短路电流作用下，电力对绝缘层施加巨大的压力导致变形。

优化绝缘系统的散热设计提升绝缘结构性能，短路电流导致局部温度急剧上升影响绝缘材料的性

能。设计高效的散热路径确保热量迅速散出，避免局部过热。在绝缘层之间添加导热层，如铝箔或铜箔的导热系数分别为237和401，能提升热传导效率。采用强制空气冷却或液体冷却技术，可以降低绝缘系统的温度，从而确保在高温环境下的稳定性^[4]。

新能源变压器抗短路能力的结构优化作用

1. 对绕组结构的作用

绕组结构的优化可以对新能源变压器的整体性能产生积极的影响，特别是在提高抗短路能力方面表现更加突出。增加绕组的轴向支撑和改进紧密度，绕组在短路电动力作用下的变形幅度减少。增加撑条和夹板将绕组的轴向变形降低至原来的50%左右，提高机械稳定性。机械强度提升使绕组在面对高强度短路电流时保持结构完整，避免导致的内部损伤和短路故障。优化绕组结构对电气性能有积极作用，紧密绕组工艺减少导线间的间隙，降低电气损耗，提高能量传输效率。通过优化工艺使导线间隙减少至原来的70%，降低电气损耗约10%~15%。提升变压器的工作效率，延长使用寿命，较低的电气损耗意味着绕组在长期运行中受热更少，减少热老化的风险。

优化后的绕组结构提升新能源变压器的热管理能力，紧密的绕组结构和改进的材料选择提高绕组的散热性能，有效传导和散发工作过程中产生的热量。原绕组的热传导系数为 k_1 ，通过优化设计，新的热传导系数提高至 $k_2 = 1.3k_1$ ，使热量快速散发出去，避免局部过热现象的发生，保证绕组在高负荷和短路条件下的稳定运行。绕组结构优化对新能源变压器的抗短路能力提升，通过机械强度的增强、电气性能的改善和热管理能力的提升使变压器在复杂电网环境中可靠运行。改进增强变压器的短期抗冲击能力，延长长期使用寿命，降低维护和更换的频率和成本。

2. 对铁心结构的作用

铁心结构的优化对新能源变压器的性能有重要作用，优化铁心结构改善应力分布，使铁心在短路电动力作用下的应力集中问题得到缓解。分层设计和均匀材料分布，铁心内部的应力分布更加均匀，最大应力降低约20%，减少局部区域因应力集中而

导致的损伤风险。应力分布的优化有利于提高铁心的机械强度，降低因局部应力过大引起的变形和疲劳破坏的可能性。铁心结构优化增强材料的耐久性和抗疲劳性能，采用高磁导率、低损耗的冷轧硅钢片并表面强化处理，铁心材料的抗拉强度和硬度提升。经过强化处理的冷轧硅钢片的抗拉强度提高15%~20%，硬度增加约10%。改进使铁心在短路电流的反复冲击下保持更高的结构稳定性，减少长期运行过程中因疲劳而导致的性能下降^[5]。

3. 对绝缘结构的作用

优化绝缘结构对新能源变压器的抗短路能力和整体性能有重要作用，在处理新能源设备中特有的电气和热环境时更为突出。新能源变压器在应用中面对高频率的负载变化和较大幅度的电压波动，对绝缘结构提出更高的要求。采用高性能绝缘材料，如聚酰亚胺薄膜提高耐高温性能，增强对频繁负载波动的适应性。材料在耐温性上相比传统材料提升40%，承受温度波动在-40~180℃范围内的极端条件。调整绝缘层厚度对提高抗短路能力很重要，针对新能源变压器的高频脉动特性，设计绝缘层的厚度有利于抵御电动势冲击。如将绝缘层厚度从2 mm增加到3 mm，绝缘层的击穿电压提高20%，减少短路情况下的绝缘破坏风险。调整提升变压器在高频电流作用下的稳定性，延长设备的使用寿命。如图1所示。

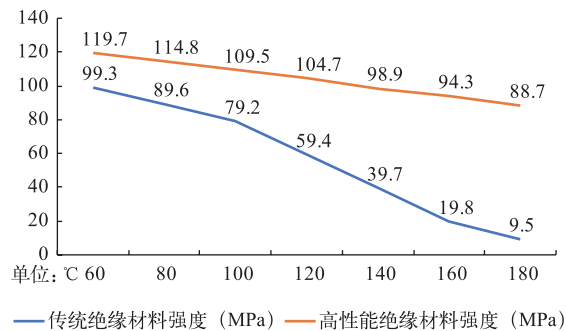


图1 高温下绝缘材料表现差异

高效的散热系统迅速导出由高频电流引起的热量，防止局部过热现象。通过在绝缘层间添加导热层，如石墨烯薄膜的导热系数高达2 000 W/m·K，比传统材料高出数倍，使得热量更快分散，局部温度降低约15%。优化确保绝缘材料在高负荷条件下

(下转第88页)

等异常情况，系统会立即触发紧急停机机制，并向运维人员推送告警信息与处置建议。一键顺控功能支持操作记录的自动归档与分析，能够为后续优化操作流程、提升顺控成功率提供数据依据，从而真正实现变电站操作的“零失误、高效率、全可控”。

结束语

综上所述，变电站智能巡视系统通过多源数据感知、智能分析决策与自动化控制能够提升设备运维的效率，有效降低人工操作风险和电网运行隐患，在接地线管理、事故处理和一键顺控等场景中具有重要应用，不仅实现对传统运维模式的革新，更通过RPA技术推动业务流程从自动化向智能化方向转型。EA

(收稿日期：2025-07-04)

参考文献

[1] 林立雄. 智能巡视系统在变电站绝缘子隐患排查中的应用[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2025, 30(1): 28-34.

[2] 于明旺. 智能巡视系统在220 kV智慧变电站中的应用[J]. 电子技术, 2025, 54(2): 190-191.

[3] 李路. 基于迁移学习的变电站智能巡视系统应用研究[J]. 电工技术, 2023(S1): 27-29, 32.

[4] 姚志鹏. 新型数字智能变电站监控及巡视系统应用研究[J]. 电气技术与经济, 2023(9): 228-230.

[5] 许梦阳. 变电站智能巡视系统应用研究[J]. 科技创新与应用, 2025(6): 24-27.

(上接第70页)

保持稳定的性能，避免因热应力导致的材料老化和性能下降。绝缘结构的优化提升新能源变压器的抗短路能力和整体性能，高性能绝缘材料的应用提高对极端环境的适应性，厚度调整增强抗电压击穿能力和优化的散热设计确保在高频负载条件下的热稳定性。改进措施综合作用使新能源变压器在面对复杂的电网环境时高效运行，延长设备的使用寿命和降低维护成本。

结束语

本文围绕新能源变压器抗短路能力的提升展开，分析绕组、铁心和绝缘结构在短路条件下的关键问题并提出优化策略。通过增强绕组的轴向支撑和紧密度、改进铁心的应力分布和热管理以及采用高性能绝缘材料和优化散热设计提升变压器在极端电气和热环境下的稳定性。研究表明结构优化措施可提高新能源变压器的机械强度和电气性能，延长设备的使用寿命和降低故障率和维护成本，为新能源电网的稳定运行提供保障。EA

(收稿日期：2024-12-16)

参考文献

[1] 王轩, 龙飞, 张江超, 等. 限流装置对变压器抗短路能力提升作用分析 [J]. 设备管理与维修, 2024, (03): 17-19.

[2] 邓高峰, 李锐. 变压器抗短路能力安全系数动态计算方法研究 [J]. 广西电力, 2023, 46(6): 74-80.

[3] 都兴双, 李洪春, 苏晓龙, 等. 高阻抗变压器内置电抗器的抗短路能力计算及绕组热点分析 [J]. 变压器, 2023, 60(3): 7-11.

[4] 罗竣匀, 刘君, 胡晓, 等. 基于有限元的电力变压器抗短路能力校核方法研究 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 78-87.

[5] 谢茜, 张宗喜, 丁理杰, 等. 变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究 [J]. 四川电力技术, 2022, 45(5): 54-57.