

变压器直流偏磁产生机理与抑制方法研究

易春回

(桂林信息科技学院, 广西 桂林 541004)

摘要 高压直流输电引发的直流偏磁效应威胁变压器安全运行, 本文系统研究了其形成机理与抑制方法, 通过分析地磁暴、新能源并网等诱因导致的铁芯饱和效应, 揭示了谐波畸变、机械形变等多维度危害机理, 对比评估电阻限流、电容隔直、反向补偿等典型抑制方案发现, 电容隔直法在中性点阻抗调控与工频保持方面具有显著优势。研究指出该方法需协同阻容元件抑制暂态过电压, 并通过参数动态优化提升可靠性。

关键词 高压直流输电; 变压器直流偏磁; 电容隔直

基金项目: 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“应用于变压器中性点的电容隔直装置研究”(项目编号: 2023KY1697)。

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.002

0 引言

高压直流输电凭借大容量、低损耗和高稳定性的技术优势, 已成为跨区域电能传输的核心解决方案。然而, 系统运行中产生的直流偏磁现象严重威胁着变压器的安全运行^[1]。当地磁暴、直流接地极不平衡电流或交流系统不对称运行等因素引发直流侵入时, 变压器铁芯将发生非对称饱和, 引起励磁电流的谐波畸变率上升, 铁损增加, 振动和噪声水平提高^[2]。这种异常工况不仅加速绝缘老化, 更会导致继电保护误动作, 危及电网稳定。因此, 研究高效可靠的隔直技术已成为保障新型电力系统安全运行的重要方向。

直流偏磁治理研究具有多维价值: 技术层面, 通过建立磁路-电路耦合模型可揭示偏磁状态下铁芯饱和和动力学特性, 为设备优化设计提供理论依据^[3]; 经济层面, 有效隔直可使变压器空载损耗降低, 延长设备使用寿命, 显著提升电网资产利用率^[4]; 安全层面, 消除直流侵入可避免系统谐振过电压风险, 保障高压交流与直流混联输电系统的可靠运行^[5]。

当前主流抑制技术呈现“被动防护—主动抑制”的演进趋势。被动型方案利用电容隔直法, 通过中性点串联电容器构建高通滤波通道, 但存在面临容量选择的两难困境: 小容量电容器易引发放电击穿, 大容量装置则导致系统谐振点偏移^[6]。电阻限流法虽能快速衰减直流分量, 但固定阻值设计难以适应动态工况。主动补偿方案利用有源逆变型隔直装置, 通过生成反向补偿电流实现快速抵消中性点直流, 但该方案存在控制复杂度高、故障穿越能力弱等缺陷^[7]。

1 变压器直流偏磁问题分析

1.1 直流偏磁的成因

直流偏磁主要由三方面因素引发:

首先, 高压直流输电系统单极大地运行时, 直流电流经接地极注入大地后, 因输电线路电阻远小于大地电阻, 部分直流电流通过变压器中性点形成回路^[8]。这种不对称电流路径导致铁芯磁通偏移基准点, 产生直流磁化效应。

其次, 新能源并网进一步加剧了该现象。风电、光伏等随机性电源占比超过一定比例时, 换流器在开关过程中产生的非特征谐波会与直流分量叠加^[9]。特别是双馈式风电机组在电网不对称工况下, 其定子侧易产生直流电流。

最后, 现代电网结构复杂化形成新的电流路径。多端直流系统与交直流混联电网的拓扑变化, 使得相较于其他路径, 中性点接地变压器因阻抗更低而成为直流电流的优选通道。

1.2 直流偏磁的影响

由于存在直流偏磁, 变压器铁芯容易出现饱和现象。当直流电流叠加在交流电流上时, 直流电流产生的恒定磁场会导致铁芯在某一方向上的磁化增强, 而造成铁芯饱和。当铁芯进入磁饱和状态时, 励磁电流的波形会发生畸变并形成丰富谐波分量。这类高频谐波会加剧绕组的铜损和铁芯的磁滞损耗, 引发设备异常温升, 最终造成能效下降和运行寿命衰减。

此外, 直流偏磁会显著影响铁磁材料的形变特性。当铁磁体处于非对称磁化状态时, 其固有的磁致伸缩

现象将被放大。这种增强效应导致磁芯材料产生与激励频率同频的机械应变，通过结构共振效应将电磁能转化为声能。异常磁化效应不仅会破坏设备运行参数，导致附加损耗和温升超标，更可能诱发谐波畸变、继电装置误动等连锁反应，危及电网可靠性。

2 变压器直流偏磁抑制方法

2.1 抑制方法概述

直流偏磁治理是变压器运行控制的关键环节，需基于多维技术评估选择最优解决方案。不同技术方案在作用机理和工程适用性层面存在显著差异，需结合电网参数、设备特性及经济成本等要素进行针对性决策。

1. 电阻限流法是通过在变压器中性点串联电阻来限制直流电流的一种方法。该方法操作简单、成本低廉，但串联电阻会增加系统接地阻抗，该工况可能导致继电保护系统的动作可靠性下降。此外，选择电阻时还需考虑其耐压、容量和散热等因素。在实际应用中需结合电网工况和运行要求，合理选型电阻参数并确定安装位置。

2. 电容隔直法通过在中性点回路加装电容器组，基于容性元件对低频电流的高阻抗特性，选择性抑制直流分量流通。该方案利用电容器的频率选择特性，在消除地磁暴或不对称运行引发的直流偏磁现象时，仍能保持工频交流系统的正常阻抗路径。这种阻抗差异化的设计，实现了交直流分量在变压器中性点处的选择性隔离。该方法需谨慎选择电容器耐压等级与容量，避免谐振过电压风险，且需配套投切控制技术。

3. 直流电流反向注入法通过向变压器中性点输入逆向电流，实现直流侵入电流的动态抵消。该方案采用主动补偿机制，其效能取决于实时电流监测精度与闭环控制系统的响应速度，需建立多参数协同的智能调节模型。在实施过程中需着重评估补偿装置与电网阻抗的交互影响，通过电磁暂态仿真优化注入点配置参数，避免引发谐波谐振或设备过载风险。

4. 电位补偿法基于中性点电位调控机制。该方案通过在变压器中性点接入动态补偿设备，实时注入反向补偿电流以中和直流分量，从而消除铁芯磁饱和风险。相较于接地方式改造方案，该技术优势在于维持电网原有接地架构不变，系统阻抗特性不受影响，但需重点解决补偿装置响应速度与谐波抑制等关键技术问题。在实施过程中需结合电网拓扑结构、直流入侵路径特征，通过电磁暂态仿真优化补偿装置的动态调节性能与控制参数，确保在不同运行工况下实现有效偏磁抑制。

2.2 抑制方法对比分析

1. 电阻限流法的技术挑战与应对策略。电阻限流法的工程化实施存在显著挑战。变压器中性点回路接入附加电阻会引发接地阻抗异常升高，可能削弱保护

装置的动作可靠性。针对此隐患，需通过优化继电保护配置方案进行风险管控。具体措施包括：加装差动保护元件提升故障判别精度，引入谐波闭锁功能防止误动作，同时根据实测阻抗特性重新校核保护定值参数，构建多重防护机制保障电网运行安全。

在单极接地故障工况下，中性点区域将承受瞬态大电流载荷，这对串联电阻器件的抗热衰退性能与工况可靠性构成严峻考验。工程设计中需优选具备耐高温特性、优异的热传导效率及稳定电热响应的合金材料，同时必须通过严苛的脉冲热循环实验验证，确保器件在瞬态过载条件下维持参数稳定性与结构完整性。

2. 电容隔直法的应用与优化。电容隔直法通过容抗特性实现交直流分量分离，其结构简单、易于实施，能够有效阻断中性点直流偏磁通路，现已成为电力系统中变压器中性点直流隔离的主流解决方案。然而，在实际应用中需重点关注电容器的耐压等级及容量选择，避免因参数失配引发的过电压问题。为解决这一问题，可采用基于电网实时运行数据和仿真建模的动态优化方法，通过分析工况变化调整容值及耐压阈值，从而精准匹配系统需求。同时，配置避雷器、电压互感器等过电压保护装置，并结合在线监测系统实时采集电压数据，可快速识别并切除过电压故障，保障电容器安全运行。

此外，优化措施可聚焦在三个方面：首先，调控运行环境，强化散热条件以抑制温升效应；其次，规范电气参数，通过负载阈值管控规避应力损伤；最后，实施预防性维护，基于介电特性监测与容量衰减分析建立性能预警机制。该策略可有效保障直流偏磁抑制系统的稳定性与使用寿命。

3. 直流电流反向注入法的技术实现与调整策略。直流电流反向注入法通过精准调控电流矢量参数实现高效隔直，其核心在于构建闭环反馈系统与高灵敏度传感器协同工作。针对新能源并网带来的电网阻抗特性变化，系统可基于阻抗谱实时分析建立自适应补偿模型，通过动态匹配网络拓扑的瞬态特征，确保在宽域波动场景下维持最优直流抑制效能。

为确保直流电流反向注入系统的运行安全，需构建多级监测与响应体系。通过阈值判定模块实时检测电流幅值及极性参数，当数据偏离安全区间时，触发多级连锁机制。该机制通过数字化判据与硬件保护协同，有效识别并阻断过流、欠流及方向异常风险，维持系统在预设参数范围内可靠工作。

4. 电位补偿法的实施难点与解决方案。电位补偿法在抑制直流偏磁应用中面临较高技术门槛，其重点在于实现地网电位动态均衡，需构建地表一深层电位梯度数据库，通过自适应补偿算法优化接地极配置方

案。在实施过程中需融合大地电性参数与输电走廊特征参数,建立空间电位补偿矢量模型,确保不同地质单元间的电位耦合系数达到安全阈值。

在电位补偿法的工程应用中,装置设计与安装环节需重点关注。通过拓扑结构优化与电磁兼容性设计,可提升系统效能并控制环境影响。具体技术要点包括:科学规划设备布局并优化系统配置参数,构建多点等位连接结构降低接地阻抗,采用分层屏蔽技术抑制杂散电流。该方案在保证电位均衡精度的同时,能有效规避地电位异常抬升等次生风险。

2.3 抑制方法的选择与优化

在优化变压器直流偏磁抑制方案时,需综合考虑变压器技术特性(类型、容量、运行条件)及电网结构与运行方式,同时评估方法的可行性、经济性与长期可靠性。

高压大容量变压器在运行中面临的直流偏磁效应更为显著,需配置针对性抑制方案。电容隔直法通过在中性点串联电容器(理想工况下可完全阻隔直流分量),显著降低偏磁影响。然而,其动态响应受限,可结合中性点电位补偿法,通过主动调节电场分布进一步抑制直流分量。二者协同可提升治理效果,并减少变压器振动,增强电网暂态稳定性。

在新能源接入较多的电网区域,间歇性电源引发的直流偏磁呈现时变特性。采用反向电流主动补偿技术,通过中性点注入相位可调的逆向电流,可实现直流分量的动态中和。该方案依赖高精度闭环调控系统,需构建多参数协同的反馈机制。可通过并联自适应阻抗调节装置,形成复合治理架构:电阻单元在低频段构建被动隔离屏障,反向注入模块在中高频段实施主动抑制。这种分层控制策略在维持接地安全性的同时,显著提升了系统对宽频域扰动源的响应能力。

综上所述,抑制方法的选择与优化是一个全面的决策过程,需要综合考虑多种因素并制定针对性的解决方案。通过灵活应用不同的抑制方法及其组合,能优化直流偏磁抑制策略,保障电力设备工况稳定性,降低电网异常运行风险。

2.4 最优抑制方法的确定

针对变压器直流偏磁抑制技术的综合评估表明,电容隔直方案展现出显著技术优势。该方案通过构建容抗调控支路,实现直流分量阻隔与工频电流导通的双向调控机制,其核心在于兼具经济性优势与工程适配性。区别于传统方案需重构电网拓扑的特点,该技术通过加装紧凑型补偿装置即可完成系统参数整定,具备快速故障恢复响应能力,同时维持交流传输稳定性。

然而,电容隔直法并非没有缺陷。在实际应用中,

电容器的耐压和容量选择尤为重要。由于电网中可能出现电压波动和冲击电流等因素,电容器可能会面临过高的电压和电流,从而导致损坏或性能下降。因此,确定电容参数时需综合评估耐压等级与容值余量,以保障其在极端温变及电压波动等复杂工况下的可靠性。

尽管存在上述问题与局限,综合考虑各种因素后,电容隔直法是目前最佳的变压器直流偏磁隔直方案。在实际应用中,可以结合电网结构及变压器的具体情况,以电容隔直法为主,辅以其他措施形成综合治理方案。例如,为抑制变压器直流偏磁效应,可在容性回路中加装匹配阻容或感容元件,通过阻抗特性调节抑制暂态过电压幅值并阻断其传导路径。同时,建立周期性巡检与参数校准机制,实时监测介质损耗与容量衰减情况,维持设备运行稳定性。通过将电容隔直法与动态补偿装置协同配置,形成多维度防护体系,可显著提升电网抗扰动能力与供电可靠性。

3 结束语

在对变压器直流偏磁问题的成因、影响及研究现状进行深入分析后,本文系统评估了多种隔直方法的实际效果,最终得出电容隔直法在隔离直流分量方面具有明显优势。然而,电容隔直法在实际应用中仍需关注可能出现的过电压问题,以及电容器的耐压和容量选择。此外,电力设备的拓扑差异与网络架构特性会对隔直方法的适用性产生显著制约。因此,本文在推荐电容隔直法的同时,强调了综合考量多种因素、制定针对性解决方案的重要性。

参考文献:

- [1] 佟昕. HVDC 输电引起变压器直流偏磁分析及抑制措施 [D]. 吉林市: 东北电力大学, 2014.
- [2] 苑舜, 王天施. 电力变压器直流偏磁研究综述 [J]. 高压电器, 2010, 46(03): 83-87.
- [3] 谢志成, 林湘宁, 李正天, 等. 基于隔直装置全局优化投切的直流偏磁治理方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7133-7142, 7427.
- [4] 曾希哲, 曾峰, 肖树清. 基于 PID 搜索优化算法的变压器直流偏磁治理策略 [J]. 江西电力, 2024, 48(03): 27-30.
- [5] 刘青松, 伍衡, 彭光强, 等. 南方电网所辖换流变压器直流偏磁数据分析 [J]. 高压电器, 2017, 53(08): 153-158.
- [6] 林俊岑. 变压器直流偏磁综合治理优化方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [7] 章彬, 黄炜昭, 陈潇. 直流偏磁对深圳电网主变压器的影响及抑制措施的研究 [J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 69-72, 85.
- [8] 杨帆. 变压器直流偏磁的抑制措施及电容隔直装置的应用 [J]. 光源与照明, 2021(09): 98-100.
- [9] 同 [6].