

电力运输过程中的主要电能损耗来源与控制方法

兰彩霞

银川农电力服务有限公司 宁夏 银川 750001

摘要：随着社会经济的快速发展和能源需求的持续攀升，电力运输作为能源保障的核心环节，其效率与稳定性愈发受到关注。本文围绕电力运输中的电能损耗问题，系统分析了主要损耗来源及控制方法。首先概述电力运输系统的组成与原理，随后详细剖析电阻损耗、介质损耗、电晕损耗及变压器漏磁、谐波等其他损耗的产生机制与影响因素，最后从优化电网结构、选用合适导线、提高功率因数、平衡三相负荷、加强设备管理及应用智能电网技术等方面，探讨了降低电能损耗的有效措施，为提升电力运输效率提供参考。

关键词：电力运输过程；主要电能；损耗来源；控制方法

引言：电力作为现代社会的核心能源，其运输效率直接关系到能源利用水平与经济发展成本。在电力从发电端传输至用户端的过程中，由于多种因素影响，不可避免地存在电能损耗，这不仅降低了能源利用率，还可能增加电网运行成本与安全风险。因此，明确电力运输中电能损耗的主要来源，并针对性地采取控制措施，对于提高电网经济性、稳定性具有重要意义。在概述电力运输系统组成与原理的基础上，深入分析各类损耗的产生机制与影响因素，进而提出切实可行的控制方法，旨在为减少电力运输损耗、优化能源配置提供理论与实践支持。

1 电力运输系统概述

1.1 电力运输系统的组成

电力运输系统是连接发电端与用电端的核心网络，主要由输电线路、变电站、配电设施及控制保护系统组成。输电线路分为交流和直流两类，承担长距离、大容量电力输送任务，包括架空线路和电缆线路；变电站负责电压变换，通过变压器将发电机输出的低压电升至高压以减少传输损耗，或降至用户所需电压；配电设施包括配电线路、配电变压器等，将电力分配至工业、居民等终端用户；控制保护系统则通过调度自动化、继电保护装置等，保障系统安全稳定运行，实现电力的高效调配与故障快速处理。

1.2 电力运输的基本原理

电力运输基于电磁感应和能量转换原理，核心是通过电压等级的优化实现高效传输。发电站产生的电能经升压变电站提升电压，依据焦耳-楞次定律，在传输功率一定时，电压越高，电流越小，线路电阻造成的损耗（ I^2R ）越少，因此高压输电可大幅降低远距离传输中的能量损失。电能通过输电线路传输至负荷中心后，经降

压变电站降低电压，再由配电网络分配至用户。交流输电利用电磁感应实现电压变换，直流输电则通过换流站实现交直流转换，适用于超远距离、大容量输电场景，两者共同构成现代电力运输的技术基础^[1]。

2 主要电能损耗来源分析

2.1 电阻损耗

2.1.1 电阻损耗的产生机制

电阻损耗是电流通过导体时的能量转化。导体中自由电子在电场驱动下定向移动，与晶格原子频繁碰撞，电子动能转化为热能散发。交流输电中，集肤效应使电流集中在导体表面，增加碰撞概率，加剧损耗；直流输电虽无此效应，电子定向移动的持续碰撞仍导致热能损失，造成电能浪费。

2.1.2 影响电阻损耗的因素

电阻损耗受导体特性影响，材料电阻率、横截面积和长度起关键作用，电阻率低、截面积大、长度短则损耗小。传输电流大小影响显著，电流越大，损耗越明显。环境温度升高会加剧导体内部原子热运动，增加电子碰撞，使损耗上升。

2.2 介质损耗

2.2.1 介质损耗的形成原因

介质损耗是电能通过绝缘介质时产生的能量损失，主要源于绝缘材料的极化与电导作用。在交变电场中，介质内的分子或偶极子会随电场方向频繁转向，分子间摩擦产生热能，即极化损耗。同时，即使绝缘材料绝缘性良好，仍存在微弱电导，少量电流通过时会因电导作用转化为热量，形成电导损耗。

2.2.2 介质损耗对电能传输的影响

介质损耗会直接降低电能传输效率，损耗的能量以热能形式散发，导致设备温度升高，加速绝缘材料老

化,缩短设备使用寿命,甚至引发绝缘击穿,造成线路短路等故障。对于高压电缆、电容器等设备,介质损耗随电压升高而显著增加,不仅浪费电能,还可能因过热影响设备正常运行,增加维护成本,对电力系统的稳定性和经济性构成潜在威胁。

2.3 电晕损耗

2.3.1 电晕现象的产生条件

电晕现象的产生与电场强度密切相关,当导体表面的电场强度达到周围空气的击穿场强(约 30kV/cm)时,空气分子会被电离,形成局部放电,即产生电晕。此外,导体表面的光滑程度是重要条件,若存在毛刺、划痕等缺陷,会导致局部电场强度骤增,更容易引发电晕。环境因素也有影响,潮湿、多雾或含有尘埃的空气,其击穿场强较低,会降低电晕产生的临界电压,促使电晕现象发生。

2.3.2 电晕损耗的危害及影响因素

电晕损耗会造成电能无端浪费,降低电力传输效率。同时,电晕产生的高频脉冲电流会干扰无线电通信,产生的臭氧还会腐蚀导体及周边设备,缩短其使用寿命。影响电晕损耗的因素包括导体表面状况,表面越粗糙,损耗越大;电压等级越高,电场强度越强,损耗越显著;环境湿度、气压也有影响,高湿度、低气压环境下,损耗会增加。

2.4 其他损耗来源

2.4.1 变压器漏磁损耗

变压器漏磁损耗源于铁芯与绕组间的磁场泄漏。理想状态下,磁场应完全约束在铁芯中,但实际中,部分磁通会穿过空气等非磁性材料形成漏磁。漏磁切割绕组或金属构件时,依据电磁感应原理产生涡流,涡流在导体中转化为热能,造成能量损失。漏磁损耗的大小与绕组结构、铁芯材质及装配精度相关,绕组排列越紧密、铁芯导磁性能越好,漏磁越少,损耗也随之降低。

2.4.2 谐波引起的损耗

谐波由电网中非线性负载(如变频器、电弧炉)产生,其频率为基波整数倍。谐波电流流经输电线路和变压器时,会增加电阻损耗,因集肤效应随频率升高而增强,高频谐波使导体等效电阻增大。同时,谐波磁场在铁芯中产生附加涡流与磁滞损耗,导致设备过热。此外,谐波还会引发谐振,放大损耗,降低电力设备利用率,增加系统运行能耗^[2]。

3 电能损耗控制方法探讨

3.1 优化电网结构

3.1.1 合理规划电网布局

合理规划电网布局是降低电能损耗的基础性措施。需结合区域负荷分布、电源位置及地理条件,构建层次清晰的输电网络。例如,将大型发电站与负荷中心通过高压输电线路直接连接,减少中间转换环节;在工业集中区、城市中心等负荷密集区域,规划环网结构,提高供电可靠性的同时,通过多路径分流降低单条线路的负荷压力。

3.1.2 减少供电半径

供电半径是指从配电变压器到终端用户的平均距离,其长短直接影响低压线路的损耗。缩短供电半径可显著降低线路电阻带来的能量损失,因低压线路电阻损耗随距离增加而累积。实践中,需根据用户分布密度优化配电变压器选址,在城市居民区按“小容量、多布点”原则设置变压器,使供电半径控制在合理范围(通常低压线路半径不超过500米);农村地区则结合村落分布,避免变压器位置过于偏远。

3.2 选用合适的导线

3.2.1 选择高导电率的导线材料

导线材料的导电率直接影响电阻损耗,高导电率材料能减少电流传输中的能量损失。目前常用的导线材料中,铜的导电率高于铝,在相同条件下可降低电阻约30%,但铜的成本较高且重量较大,适用于对损耗控制要求严格的短距离线路或精密设备。铝及铝合金导线成本低、重量轻,通过工艺改进(如添加稀土元素)可提升导电性能,成为长距离输电的主流选择。

3.2.2 合理确定导线截面积

导线截面积是影响电阻的关键参数,截面积越大,电阻越小,损耗越低,但成本与架设难度也随之增加。确定截面积需结合传输功率、距离及环境条件:对于大功率、远距离输电线路,需采用大截面积导线(如 400mm^2 及以上),以降低电流密度;城市配电网负荷密集且距离较短,可选用中等截面积导线(如 $120\text{-}240\text{mm}^2$),平衡损耗与成本;农村低压线路负荷较小,可适当减小截面积,但需避免因过载导致电阻骤增。同时,需考虑热稳定要求,确保导线在最大负荷下的温度不超过安全限值,防止因高温导致电阻上升而增加损耗。

3.3 提高功率因数

3.3.1 功率因数对电能损耗的影响

功率因数是有功功率与视在功率的比值,直接影响线路中的电流大小。当功率因数偏低时,在输送相同有功功率的情况下,线路中会流过更多的无功电流,导致总电流增大。根据电阻损耗与电流平方成正比特性,电流增大将显著增加线路和变压器的电阻损耗。此外,

低功率因数还会降低电力设备的利用率,使线路电压降落增大,影响供电质量,间接加剧电能浪费。

3.3.2 无功补偿措施

无功补偿是提高功率因数的核心手段,常用措施包括安装并联电容器、同步调相机和静止无功发生器等。并联电容器成本低、操作简便,可直接并联在配电线路或用户端,就地补偿感性负载所需的无功功率,减少线路中的无功传输;同步调相机能动态调节无功输出,适应负荷波动,适用于大型变电站;静止无功发生器则通过电力电子技术快速响应无功需求,精度更高,适合新能源并网等复杂场景。

3.4 平衡三相用电负荷

3.4.1 三相不平衡对电能损耗的影响

三相不平衡是指三相电路中各相的电流或功率存在显著差异。当三相负荷不平衡时,中性点会出现位移电压,导致某相电压升高、其他相电压降低。电流较大的一相线路中,电阻损耗会因电流平方的关系急剧增加,同时变压器铁芯中会产生附加涡流损耗,降低设备效率。此外,不平衡电流还会使电机等感性设备产生负序磁场,导致振动加剧、发热增加,不仅浪费电能,还会缩短设备使用寿命,对电网安全经济运行造成不利影响。

3.4.2 实现三相负荷平衡的方法

实现三相负荷平衡需从规划、监测和调整三方面入手。在用户接入时,合理分配三相负荷,避免单相负荷过度集中;安装智能监测装置,实时监控各相电流、电压,及时发现不平衡问题。调整方法包括人工调整用户接线,将重载相的部分负荷转移至轻载相;对于波动性负荷,采用动态无功补偿装置或三相负荷自动调节系统,通过电力电子技术实时分配电流。

3.5 加强电力设备管理与维护

3.5.1 定期巡检与维护电力设备

定期巡检与维护是减少设备额外损耗的关键。针对输电线路,需定期清除杆塔上的杂物、检查导线接头是否松动,避免接触不良导致电阻增大;对变压器,需定期检测油位、油质及铁芯接地情况,防止因绝缘下降引发涡流损耗增加;开关设备要检查触头状态,确保接触良好,减少通断过程中的能量损失。通过红外测温、局部放电检测等技术手段,可及时发现设备过热、绝缘老化等隐患,提前进行处理,保障设备在最佳状态运行,降低因性能劣化导致的电能损耗。

3.5.2 及时更换老化设备

设备老化会显著增加电能损耗,需制定合理的更换计划。运行年限较长的变压器,铁芯硅钢片绝缘层可能老

化,导致磁滞损耗和涡流损耗大幅上升;老旧电缆的绝缘性能下降,介质损耗会明显增加;磨损严重的开关设备,接触电阻增大,通流时发热加剧。及时更换这些老化设备,选用能效等级更高的新型设备(如非晶合金变压器、交联聚乙烯电缆),可降低设备自身的固有损耗。

3.6 采用智能电网技术

3.6.1 智能电网对电能损耗监测与控制的優勢

智能电网借助物联网、大数据和人工智能技术,实现了电能损耗的精细化管理。其优势在于实时性,通过遍布全网的传感器和智能电表,可动态采集各节点的电流、电压、功率等数据,精准定位损耗异常区域;自动化程度高,能根据负荷变化自动调整输电策略,如优化变压器分接头、动态补偿无功功率,减少人工干预带来的滞后性;此外,智能电网具备预测功能,通过分析历史数据预判负荷高峰,提前调配电力资源,避免线路过载导致的损耗激增,从监测到控制形成闭环,显著提升损耗管理效率。

3.6.2 智能电网技术的应用

智能电网技术在损耗控制中的应用广泛,例如高级量测体系(AMI)通过智能电表实现用户用电数据的实时上传,帮助调度中心掌握负荷分布,优化供电方案;配电自动化系统可快速隔离故障区域,减少故障停电带来的电量损失;需求响应技术则引导用户错峰用电,降低电网峰荷压力,减少因超载产生的额外损耗。此外,分布式能源管理系统能协调风电、光伏等新能源与主网的运行,减少新能源并网对电网的冲击,间接降低因电压波动导致的电能损耗^[3]。

结束语

电力运输中的电能损耗,源于电阻、介质、电晕及设备附加损耗等,与系统设计、设备性能和运行环境紧密相连。通过优化电网结构、选用合适导线、提高功率因数、平衡三相负荷、强化设备运维及应用智能电网技术等手段,能有效降低损耗。面对新能源并网和用电多元化的新形势,需持续技术创新,推进数字化与智能化融合,提升损耗管控精度,这对提高能源利用率、构建低碳电力系统意义重大,为能源可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]申学滨.电力线路损耗分析与计算方法比较[J].中国电力教育,2021,03:248-249.
- [2]吴楠.电力系统线路损耗管理系统的设计与实现[J].科技风,2021,18:126.
- [3]徐玉琦.电力线路的负荷不对称附加功率损耗及其计算[J].建筑电气,2021,01:5-7.