

输配电线路节能降耗技术研究

张宝才¹, 于哲²

(1. 国网吉林省电力有限公司白山市城郊供电公司, 吉林 白山 134300;

2. 国网吉林省电力有限公司白山市江源区供电公司, 吉林 白山 134700)

摘要 本文聚焦输配电线路节能降耗技术, 系统分析了输配电线路存在的电阻、铁损、附加及其他损耗问题, 以及相应的解决思路, 并深入探讨了各损耗类型的形成机理与针对性的优化方向, 然后阐述了节能降耗关键技术, 包括高效输电技术、低损耗材料与设备以及相关的运行管理与控制, 通过相关的理论测算与工程案例验证了技术的可行性, 以期对推动电网低碳化的发展有所裨益。

关键词 输配电线路; 节能降耗; 电网优化; 低损耗材料

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.037

0 引言

输配电线路承担着连接发电端与用电端的关键作用。据统计, 我国电网年供电量超过 8 万亿千瓦时, 但输配电环节的损耗长期占发电量的 5% ~ 8%, 这一比例不仅直接影响电网运行的经济性, 更与国家“双碳”战略目标紧密相关。具体而言, 输配电损耗既包含导线电阻、变压器铁损等技术型损耗, 也涉及管理粗放导致的额外能源浪费, 降低输配电线路的能耗, 对于提高电网运行效率、实现“双碳”目标具有重要的现实意义。基于此, 本文重点研究了输配电线路节能降耗的相关技术, 旨在通过系统性优化技术路径与管理策略, 为电网低碳化发展提供支撑。

1 输配电线路能耗的理论基础

输配电线路运行过程中的能量损耗主要存在两种类型, 其中技术性损耗占据绝大部分比例, 另外还存在管理性损耗。就技术性损耗而言, 首先是导线电阻造成的损耗, 主要是由于当电流在导线中流动时, 导体本身存在电阻 (用 R 表示), 根据焦耳定律会产生热量, 这部分损耗是线路能量损失的主要来源。导线的电阻大小和其使用的材质、横截面积的大小以及导线的长度都有直接关系。其次是变压器产生的损耗, 其中包括变压器在空载状态下的损耗以及变压器带负载运行时的损耗。最后是无功功率导致的损耗, 就是电网里像电动机这类感性负载, 在运行过程中需要消耗无功功率来维持磁场, 这会使得线路中的电流增大, 从而间接造成导线电阻损耗的增加。

2 输配电线路中的能耗问题

2.1 电阻损耗

电阻损耗通常由线路自身的阻抗特性所引发, 电阻损耗与电流强度的平方成正比关系, 当线路处于高

电流负荷状态时其损耗量会显著攀升。当前, 输配电线路普遍采用铝导线与铜导线作为传导材料, 铝导线具有质量轻、造价低的显著优势, 但导电过程中产生的电阻值相对较高。对此, 可通过采用多股导线并联连接、扩大导线横截面积等技术手段来降低电阻损耗。此外, 还可借助超导线在特定温度区间内实现电阻归零的特性, 从而达成零损耗传输目标。

2.2 铁损

在变压器、电动机等电气设备的运行过程中, 其内部产生的铁损主要由涡流效应引发的能量损耗和磁滞现象导致的能量损耗这两部分构成。铁芯内部感应生成的涡流是导致涡流损耗的核心成因, 而采用硅钢材质及层叠式铁芯结构可有效抑制涡流效应、降低相关损耗; 磁滞损耗则是在交变磁场作用下, 铁磁材料内部因磁畴转向摩擦而消耗的能量。为降低包含铁损在内的整体输电损耗, 可应用静态无功补偿、柔性直流输电等先进电力电子技术, 通过提升电能传输效率、优化电力流向的精准管控, 实现更高效的能源输送^[1]。

2.3 附加损耗

附加损耗主要涵盖漏电导损耗与谐波响应损耗等类别。漏电流损耗源于绝缘材料自身特性, 其大小会随着环境温度和湿度的变化而波动, 进而引发漏电流现象; 谐波损耗则是由于整流器等非线性负载导致电流波形发生畸变, 从而产生额外发热。为降低此类附加损耗, 可以采用静态补偿、柔性直流传输等先进电力电子技术手段, 通过提升电能传输效率、优化电力流控制与管理, 实现更高效的能源传输过程。

2.4 其他损耗因素

除上述损耗外, 还存在导线温度效应、空气阻力等其他影响因素, 在输配电线路设计阶段, 需全面考虑

温度等环境条件,合理选择导线材质与规格标准,以确保不同运行工况下的能源利用效率。此外,线路的长度设置与空间布局方式同样会对整体能耗水平产生一定影响,针对长距离电力输送场景,采用特高压等高压传输技术能有效降低线路阻抗损耗。同时,通过对线路路径规划与塔间间距的优化设计,不仅可减轻对地线的电磁冲击,还能显著减少线路运行过程中的附加能量损耗。

3 输配电线路节能降耗的关键技术

3.1 高效输电技术

特高压输电技术通过显著提升电压等级来降低线路电流,从而有效减少 I^2R 损耗。理论测算显示,±800 kV 直流特高压输电的损耗仅为 ±500 kV 的约 40%,而 ±1 000 kV 交流特高压的损耗较 500 kV 交流降低约 60%。紧凑型输电与同塔多回技术是实现空间集约化降耗的有效方案:紧凑型输电通过取消相间接地构架,将三相导线集中布置于同一塔窗并缩短相间距离,既能降低导线间的电磁耦合损耗,又可将线路走廊宽度缩减 30% 以上;同塔多回输电则是在单根杆塔上架设 2 回及以上线路,通过共享杆塔基础与土地资源,降低单位输电容量的建设能耗。

串联补偿技术是远距离输配电线路的关键优化手段,该技术通过在输电线路中配置补偿电容或电感元件来调节等效电抗,可显著降低电网损耗并提升系统可靠性与输送容量。由于导线阻抗效应限制了远距离输电能力,串联补偿能降低线路总电抗,从而延长输电距离并提升大容量输送水平。例如:在电网改造工程中,设计人员采用单塔多环布线方案,通过优化线路空间布局大幅减少输电通道数量,有效节约能源成本。

为进一步提升能源利用效率,需合理选用输配电线路材料:铝合金导线凭借高电导率与轻量化特性,可在电力传输过程中降低电阻并减少能量损耗,实现更高效的能源输送;高温超导导线在极低温度环境下可实现零电阻传输,能最大限度降低线路能量损失,在提升配电系统效率与降低整体能耗方面展现出巨大潜力。将这类新型材料应用于电力输配电线路建设,是达成节能目标、增强电网基础设施可持续发展能力的重要举措^[2]。此外,传统固定运行模式易因功率负荷波动导致线路损耗增加,为此需根据实时负荷变化动态调整设备参数,通过引入智能调度系统并结合实际工况实施动态负荷调控与最优功率分配,可显著提升线路运行效率,有效降低传输损耗。

3.2 低损耗材料与设备

碳纤维复合芯铝绞线(ACCC)采用轻质高强的碳纤维复合材料替代传统钢芯作为内层支撑,外部缠绕

高导电性能的铝线。其核心优势体现在三个方面:首先,碳纤维材料无磁损耗且热效应微弱,使导线运行温度较钢芯铝绞线(ACSR)降低 10~15℃,电阻损耗相应减少约 6%^[3];其次,具备更高的抗拉强度,支持更大跨距设计,从而减少杆塔建设数量;最后,材料可循环利用,契合绿色制造理念。大截面导线通过增大单根导体的横截面积,直接降低单位长度的电阻值,有效减少电流通过时产生的发热损耗。在输配电线路设计中,选用大截面导线不仅能显著减小电压降,降低线路损耗并提升传输效率,还能在同等负载条件下保持更低阻抗,承载更大电流,从而增强电力系统的可靠性与安全性。为确保大截面导线的长期稳定运行,需综合考虑导线的力学特性与周边环境条件,并根据电网负载的发展趋势,对线路截面实施动态调整,以满足未来电网升级需求。

在节能金具与低磁材料应用方面,传统铁磁材质金具因磁滞和涡流效应会产生额外损耗。解决方案是采用铝、铜合金或低磁钢等材料制造金具,从根本上消除磁损耗;同时优化金具结构设计,降低风阻与机械损耗。鉴于铁磁材料的导电性能通常处于 250~1 000 s/m 区间,而铜与铝的导电能力高达 1 s/m 以上,因此在金具选材方面优先考虑低磁特性的铜合金、低磁钢等材料,这类材料能够显著降低导线传输过程中的能量损失,实现节能降耗的目的。在制造线路连接金具时建议选用具有高强度与耐热特性的铝合金材料作为基础原料,通过挤出成型工艺制作并沟线夹、铝接线夹等非磁性金属组件,从而优化输配电系统的整体布局结构。在平衡生产成本的基础上,通过采用剪切型金具与低磁材料组合制造无磁金具,既能降低生产投入,又能提升经济效益。

低损耗变压器的损耗占电网总损耗的 20%~30%,传统硅钢叠片铁芯变压器存在空载损耗高、噪声大、效率低等问题,而新型非晶合金铁芯变压器的空载损耗仅为传统产品的 20%(例如 S11 系列相比 S9 系列,空载损耗降低 30%~40%,空载电流减少 70%~80%)。此外,自耦变压器与智能调压变压器也是重要发展方向,为降低包括无功功率在内的输电损耗,应根据现场运行条件合理选取匹配的补偿方案,通过精准判定补偿位置和补偿容量,有效保持系统电压的平稳性,从而达到提高能源利用效率的目的。以典型输电线路为例,可实施分层无功补偿方法,构建起 110 kV、220 kV、330 kV 三个电压等级的阶梯式补偿能力配置,形成三级差异化补偿能力,这样的方式既能提升电容器使用效率,避免过补偿现象,又能有效减少输配电线路损耗。

优化无功配置还需重点关注补偿装置的柔性响应速度，特别是在负载波动剧烈的场景下采用快速响应式无功补偿技术，可更好地适应负载动态变化，将分布式电源与储能系统有机结合能进一步提升电网的灵活性与运行效率，从而建立完整的输配电线路无功控制体系，同时需实时监测电力网络运行状态，并结合负载预测模型动态调整电容器工作参数，实现既提升输配电线路的供电质量，又延长装置使用寿命，降低设备故障率^[4]。

3.3 运行管理与控制

动态增容技术依托导线温度、风速、日照强度等参数的在线监测系统，结合热平衡模型实时计算线路的最大安全载流量，在不更换现有导线的前提下提升输电容量。该技术避免了过度建设输电线路，并通过挖掘现有设施的潜在传输能力，间接降低了电网建设的能源消耗。

无功补偿与电压优化通过在变电站及线路关键节点配置并联电容器，补偿感性负载产生的无功需求，将系统功率因数从 0.8 提升至 0.95 以上，可使线路电流降低约 15%~20%，显著减少电阻损耗。同时，通过调节变压器分接头、优化环网运行模式等措施，将电压稳定控制在合理范围（如 10 kV 线路电压偏差 $\leq \pm 5\%$ ），防止因电压过低导致电流异常增大。无功管理是输配电系统节能的关键环节，当前我国电网企业普遍以 0.9 为基准标准，在电网中加装电容补偿装置以改善运行状况、降低无功损耗。选用无功管理装置时需重点关注其柔性响应特性，特别是在负载波动剧烈的场景下，采用快速响应式无功补偿技术可更好地适应负荷动态变化。将分布式电源与储能系统有机结合，能有效提升电网的灵活性与运行效率，从而构建完善的输配电线路无功控制体系^[5]。此外，需实时监测电网运行状态并结合负载预测模型动态调整电容器工作参数，实现最优无功分配，在改善电能质量的同时延长设备使用寿命，降低故障发生率。

智能电网与需求侧管理则通过智能电表与物联网技术，实现了实时监测线路损耗热点，自动触发报警或动态调整潮流分布；结合峰谷电价机制引导用户错峰用电，平滑负荷曲线，缓解电网高峰时段的传输压力与损耗。例如：广东电网通过实施分压、分区、分线、分台区的四分线损管理与精细化统计分析，已将年度线损率控制在 4% 以下。针对电网谐波损耗问题，高效的谐波治理至关重要，输配电线路中的非线性负载会产生大量非基波频率分量，这些干扰因素会导致设备

过热、损耗增加，甚至引发电网失稳。常用的谐波控制方法是在电网中安装滤波装置，主要分为无源滤波与有源滤波两类：无源滤波器通常由电感、电容及电阻组成，可针对性滤除特定频率的谐波；有源滤波器则能实时检测电网谐波并生成反向电压，动态消除谐波干扰^[6]。实际运行经验表明，大量谐波会降低电网输电效率，并对变压器等用电设备造成严重损害，对此，可在变压器低压侧加装滤波器，实现无源电力滤波器与无功补偿电容器的并联运行，其优势在于低压侧便于滤波器安装，可即时抑制对后续设备的谐波冲击；同时采用被动式电源滤波技术能有效控制电网谐波，减少电压、电流波形畸变。但需注意的是，并联运行时电容与滤波元件的相互作用可能影响系统稳定性，因此必须重点关注以下环节：一是分析电网并联运行时的负荷谐波特性，选择适配的无源滤波方案控制主要谐波成分；二是合理配置电容与滤波参数，确保获得最佳功率因数及负荷控制效果；三是需综合考虑电网电压等级标准、系统运行频率以及实际工作状态，确保电容器组与滤波设备的各项技术参数与电力系统运行特性相协调，避免因参数不匹配问题引发设备故障或功能性能降低的风险。

4 结束语

实现输配电线路节能降耗需要技术、设备、管理三个方面协同合作：特高压与紧凑型技术能够解决远距离低损传输的难题；新型材料与低损耗设备可以从源头上减少能量的浪费；动态管理与智能控制则能对线路运行过程进行优化。随着先进技术的不断发展，输配电线路节能降耗将朝着更加绿色、高效的方向发展，从而为我国“双碳”目标的实现提供有力的支撑。

参考文献：

- [1] 谢硕,潘小欢,梁建利.基于 AI 的电力系统输配电线路节能降耗技术[J].电力设备管理,2025(18):270-272.
- [2] 陈楠.基于智能化监测系统的电力配电线路节能降耗技术研究[J].自动化博览,2025,42(04):86-89.
- [3] 陈仁胜.输配电线路中的节能降耗技术与管理措施[J].大众用电,2025,40(03):36.
- [4] 朱玲艳,吕洁,林超.新时期电力输配电线路节能降耗技术分析[J].电工技术,2024(S2):421-423.
- [5] 刘吉伟.输配电线路中节能降耗技术的应用研究[J].电动工具,2024(06):24-26.
- [6] 刘磊.节能降耗技术在电力输配电线路中的应用[J].光源与照明,2024(10):168-170.