

风电场输变电路损耗分析与降低措施

冀文新

国华（沽源）风电有限公司 河北 张家口 075000

摘要：随着全球对可再生能源需求的增长，风电场作为重要清洁能源基地，其输变电路损耗问题愈发凸显。本文首先概述了风电场输变电路损耗的基本理论，包括损耗类型及成因。接着，深入分析了损耗的计算与评估方法，并探讨了当前风电场损耗的现状与挑战。最后，本文提出了一系列降低损耗的有效措施，如优化电缆材料、改进敷设技术、提升变压器效能等，旨在提高风电场能源利用效率，促进可持续发展。

关键词：风电场输变电路；损耗分析；降低措施

引言：风电场作为可再生能源的重要组成部分，在全球能源结构中扮演着日益重要的角色。然而，风电场输变电路损耗问题一直是制约其能效提升的关键因素。损耗不仅增加了运营成本，还影响了风电场的整体经济效益和环境贡献。因此，深入分析风电场输变电路损耗的成因与特性，探索并实施有效的降低损耗措施，对于提升风电场能源利用效率、促进可持续能源发展具有重要意义。

1 风电场输变电路损耗的基本理论

1.1 损耗的定义与分类

在风电场输变电系统中，损耗是指电流在传输过程中由于各种因素而损失的能量。损耗主要可以分为四大类：（1）电阻损耗。电阻损耗是最主要的损耗形式，发生在电流通过导体时，由于导体具有一定的电阻，电能转化为热能而散失。这种损耗与电流的平方成正比，与电阻成正比。（2）电感损耗。电感损耗是由于电流变化时，在电感器（如变压器和电感线圈）中产生的磁场变化所引起的能量损失。这种损耗与电流的变化率和电感值有关。（3）电容损耗。电容损耗则发生在电容器中，由于电容器两极板间的电场变化而产生的能量损失。这种损耗通常较小，但在高频电路中可能会变得显著。（4）漏电损耗。漏电损耗是指电流通过绝缘材料时，由于绝缘不完全而产生的能量损失。这种损耗通常是由于材料老化、损坏或设计不当造成的。

1.2 损耗产生的原因

损耗产生的原因多种多样，主要包括以下几个方面：（1）材料因素。导体的电阻率、绝缘材料的绝缘性能等都会影响损耗的大小。例如，电阻率高的导体会导致更大的电阻损耗。（2）长度与截面积。电缆的长度越长，损耗就越大；而电缆的截面积越大，损耗则相对越小。这是因为长度增加会加大电阻，而截面积增加则能

降低电阻。（3）敷设方式。电缆的敷设方式也会影响损耗。例如，电缆弯曲、接头过多或敷设环境恶劣（如高温、潮湿）都会增加损耗。（4）周围环境。外部环境因素如温度、湿度、磁场强度等也会对损耗产生影响。例如，高温会加剧导体的电阻损耗，而强磁场则可能增加电感损耗。

1.3 损耗的影响因素

损耗的影响因素主要涉及电缆本身的特性和敷设环境：（1）电缆材料。电缆的导体材料和绝缘材料直接影响其损耗特性。优质的导体材料和绝缘材料能够降低损耗。（2）电缆结构。电缆的结构设计，如导体截面积、绝缘层厚度等，也会影响其损耗大小。合理的结构设计能够优化损耗性能。（3）敷设环境。敷设环境的温度、湿度、磁场等条件对损耗有显著影响。在设计和敷设电缆时，需要充分考虑这些环境因素，以减小损耗。

2 风电场输变电路损耗的计算与评估方法

2.1 直接测量法

直接测量法是通过在输变电路中安装电流互感器和电压互感器，直接测量线路中的电流和电压值，进而计算损耗的方法。这种方法直观且相对准确，但需要在每个测量点安装传感器，成本较高且实施复杂。（1）测量电流与电压：在输变电路的输入端和输出端分别安装电流互感器和电压互感器，实时记录电流和电压数据。为了确保数据的准确性，应定期进行校准和维护。（2）计算损耗：利用欧姆定律（ $P = I^2 R$ ）和功率因数计算损耗。首先，通过电流互感器测得的电流值和电压互感器测得的电压值，计算出线路的有功功率和无功功率。然后，根据线路的电阻值（可通过电缆制造商提供的数据或实际测量得到），利用公式计算出线路的电阻损耗。此外，还需考虑电感损耗和电容损耗，虽然这部分损耗相对较小，但在高精度计算中不可忽视^[1]。

2.2 间接测量法

间接测量法是通过测量电缆的电阻、电感、电容等参数,结合电流和电压数据,计算损耗的方法。这种方法不需要在每个测量点安装传感器,成本较低,但计算过程相对复杂。(1)测量电缆参数:利用专用的电缆参数测试仪,测量电缆的电阻、电感、电容等参数。这些参数反映了电缆的电气特性,是计算损耗的关键数据。

(2)计算损耗:根据测得的电缆参数,结合电流和电压数据,利用电力系统分析软件或自行开发的算法,计算出线路的损耗。这种方法需要考虑多种因素,如线路的长度、截面积、敷设方式等,以确保计算的准确性。

2.3 温度监测法

温度监测法是利用电缆温度推算损耗的方法。电缆在运行过程中会发热,通过监测电缆的温度变化,可以间接推算出线路的损耗情况。这种方法成本较低,但受环境因素影响较大,如环境温度、散热条件等。在实际应用中,可以在电缆表面或内部安装温度传感器,实时监测电缆的温度变化。然后,根据电缆的材料特性、截面积、长度等因素,利用热平衡原理或经验公式推算出线路的损耗。需要注意的是,由于环境温度和散热条件的变化会影响电缆的温度分布,因此在计算损耗时需要对这些因素进行修正^[2]。

2.4 评估指标

为了全面评估输变电线路的损耗情况,需要引入一些评估指标。常用的评估指标包括损耗率、传输效率和热损失等。(1)损耗率:损耗率是指线路损耗功率与输入功率之比,反映了线路的能量损失程度。损耗率越低,说明线路的能量利用效率越高。(2)传输效率:传输效率是指线路输出功率与输入功率之比,反映了线路的传输能力。传输效率越高,说明线路的损耗越小,能源利用效率越高。(3)热损失:热损失是指线路在运行过程中由于电阻损耗等原因产生的热量损失。热损失的大小直接反映了线路的能量损失情况,也是评估线路性能的重要指标之一。

3 风电场输变电线路损耗现状分析

3.1 国内风电场损耗概况

随着国家对可再生能源的日益重视,风电产业在我国得到了快速发展。然而,风电场在运行过程中,输变电线路损耗问题日益凸显,成为制约风电场经济效益和运行效率的关键因素之一。据统计,国内风电场输变电线路损耗普遍较高,部分老旧风电场的损耗率甚至超过了合理范围,严重影响了风电场的整体运营效益。

3.2 损耗的主要来源

风电场输变电线路损耗主要来源于以下几个方面:

(1)电缆传输损耗。电缆作为电流传输的主要载体,在传输过程中会因电阻、电感等因素产生损耗。特别是在长距离传输和复杂地形条件下,电缆传输损耗更为显著。此外,电缆的老化、损坏以及接头处的接触不良等也会增加传输损耗。(2)变压器损耗。变压器在风电场中扮演着电能转换的重要角色。然而,在电能转换过程中,变压器会产生铁损和铜损等损耗。铁损主要由变压器铁芯中的磁滞和涡流引起,而铜损则与变压器线圈中的电流和电阻有关。这些损耗不仅降低了变压器的转换效率,还增加了风电场的整体损耗。(3)辅助设备损耗。风电场在运行过程中还需要大量的辅助设备,如变频器、电容器、滤波器等。这些设备在运行时也会产生一定的损耗,虽然单个设备的损耗较小,但众多设备累加起来也会成为风电场损耗的重要组成部分。

3.3 损耗对风电场运营的影响

损耗对风电场运营的影响主要体现在以下两个方面:(1)经济成本。损耗会增加风电场的运营成本,降低经济效益。一方面,损耗会导致电能传输效率降低,使得风电场输出的电能减少;另一方面,损耗还会增加风电场的设备维护成本和能源消耗成本。因此,减少损耗对于提高风电场的经济效益具有重要意义。(2)运行效率。损耗还会影响风电场的运行效率。损耗过大会导致设备发热、性能下降甚至损坏,从而影响风电场的稳定运行。此外,损耗还会增加电网的负荷压力,降低电网的稳定性和安全性。因此,降低损耗对于提高风电场的运行效率具有重要意义。

4 降低风电场输变电线路损耗的措施

4.1 优化电缆材料与结构

电缆作为电能传输的“血管”,其性能直接影响输变电线路的损耗水平。因此,优化电缆材料与结构是降低损耗的关键。(1)选择低电阻率、高电导率材料。电阻是电缆传输电能时产生损耗的主要因素。为了降低损耗,应选择电阻率低、电导率高的材料制作电缆导体。铜因其良好的导电性而成为首选材料,但在成本受限的情况下,铝或其他合金材料经过特殊处理,也能在一定程度上替代铜,实现经济性与性能的平衡。此外,随着新材料技术的发展,如石墨烯、碳纳米管等高性能导电材料的研究与应用,未来有望为电缆材料带来革命性变革^[3]。(2)单芯电缆代替多芯电缆。在风电场的长距离输电中,单芯电缆相比多芯电缆具有更低的损耗。单芯电缆的导体截面更大,电阻更小,能够减少电能传输过程中的热损耗。同时,单芯电缆结构简单,便于安装和

维护,降低了因接头多而增加的损耗风险。然而,使用单芯电缆也需注意电磁场干扰问题,需采取适当的屏蔽措施。

4.2 改进敷设技术

电缆的敷设方式和技术对损耗有显著影响。科学的敷设设计不仅能减少损耗,还能延长电缆使用寿命。

(1) 选择合适的敷设深度与方式。电缆的敷设深度需根据地形、气候等因素综合考虑。过浅的敷设易受外界环境干扰,增加损耗;过深则可能增加施工难度和成本。对于海上风电场,还需考虑海底地形、海流、海洋生物等因素,选择合适的敷设路径和深度。敷设方式方面,可采用埋地、架空、海底管道等多种方式,根据具体情况灵活选择,以最小化损耗。(2) 减少摩擦损耗与海水腐蚀损耗。在海上风电场中,电缆与海底地形的摩擦以及海水的腐蚀是导致损耗增加的重要原因。为了减少摩擦损耗,可采用滑动支架、减震器等装置,减少电缆在敷设和运营过程中的摩擦。对于海水腐蚀问题,需选用耐腐蚀材料制作电缆外套,或采用涂层、电镀等防腐措施,延长电缆使用寿命,减少因腐蚀导致的损耗。

4.3 提升变压器运行效率

变压器是风电场电能转换的核心设备,其运行效率直接影响损耗水平。(1) 平衡电流负载。变压器的损耗与电流的平方成正比。因此,通过平衡电流负载,使变压器各相电流尽量相等,可显著降低损耗。在风电场的实际运营中,可通过优化发电计划、调整负荷分配等方式,实现电流负载的平衡。(2) 提高功率因数。功率因数反映了电源输出的有功功率与视在功率之比。提高功率因数可以减少无功功率的传输,从而降低变压器的损耗。在风电场中,可通过安装无功补偿装置,如电容器组、静止无功补偿器(SVC)等,提高功率因数,减少无功损耗。

4.4 控制辅助设备用电损耗

风电场中的辅助设备如变频器、空调等也会产生一定的损耗。通过优化这些设备的使用,可以进一步降低风电场的损耗。(1) 优化变频器使用。变频器是风电场中常用的调速设备,但其工作过程中会产生一定的谐波损耗。为了减少这种损耗,可以采用先进的变频技术,如矢量控制技术、直接转矩控制技术等,来提高变频器的运行效率。同时,合理设置变频器的参数,如频率范

围、启动方式等,也可以有效降低损耗^[4]。(2) 优化空调等设备的使用。在风电场的一些关键设备中,如变压器、机柜等,需要采用空调等冷却设备来维持其正常运行。然而,这些冷却设备的运行也会带来一定的损耗。为了降低这种损耗,可以采取一系列措施,如优化空调的运行模式、选择合适的制冷剂等。此外,对于一些非关键设备,可以考虑采用自然冷却等方式来减少空调的使用。

4.5 应用先进技术与系统

随着科技的发展,越来越多的先进技术被应用于风电场,以降低损耗、提高效率。(1) 超导电缆。超导电缆是一种利用超导材料制成的电缆,具有零电阻、大电流承载能力等特性。在风电场中,使用超导电缆可以显著降低传输损耗,提高能源利用效率。虽然超导电缆的初期投资成本较高,但其长期运行效益显著,是未来风电场输电技术的重要发展方向。(2) 智能监测系统。智能监测系统是一种集数据采集、处理、分析于一体的系统,可以实时监测风电场输电线路的损耗情况。通过安装传感器和数据采集设备,智能监测系统可以收集电缆的电流、电压、温度等关键参数,进而分析损耗的大小和分布。

结束语

综上所述,风电场输变电线路损耗问题复杂且关键,需从多个角度进行深入分析与优化。本文提出的损耗分析方法和降低损耗措施,为风电场能效提升提供了科学依据与实践指导。未来,随着技术的不断进步和应用的深化,应持续关注新技术、新材料在风电场输变电领域的应用潜力,不断完善损耗管理体系,以实现风电场更加高效、环保的运行。同时,加强国际合作,共同推动全球能源转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 张凯.减少电力输送方面的损耗[J].电子制作,2020,(19):192-193.
- [2] 沙颖.电力输配电线路中的节能降耗技术[J].电子技术与软件工程,2020,(11):125-126.
- [3] 彭大铭.数据中心供电系统节能减碳途径探讨[J].电信工程技术与标准化,2023,(02):18-19
- [4] 崔立勇.“双碳”催促电力转型:能效提上去,损耗降下来[N].中国经济导报,2022,(03):33-34.