

分布式能源接入下变压器损耗及能效平衡策略

郝永兵 李昌原 王 月
国网冀北秦皇岛供电公司 河北 秦皇岛 066000

摘 要：分布式能源（DER）的接入对电力系统的变压器损耗及能效平衡提出了新的挑战。本文首先分析了DER接入对变压器损耗的影响，指出其可能导致负载波动加剧和损耗增加。接着，探讨了传统及改进的变压器损耗评估方法，建立了考虑DER接入的损耗评估模型，并构建了相应的评估指标体系。在此基础上，提出了变压器能效平衡策略，包括负载优化调度、DER出力控制、参数优化设计和冷却系统优化控制等方法，以实现变压器在DER接入条件下的高效稳定运行。

关键词：分布式能源；变压器损耗；能效平衡

引言

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的增强，分布式能源（DER）作为一种清洁、可再生的能源形式，得到了广泛应用。然而，DER的接入对电力系统中的变压器带来了新的挑战。变压器作为电力系统中的关键设备，其损耗和能效直接影响整个系统的经济性和稳定性。传统变压器损耗评估方法在DER接入的情况下可能不再适用，因此需要建立新的评估模型和指标体系。此外，为了实现变压器的能效平衡，需要综合考虑负载优化调度、DER出力控制、参数优化设计和冷却系统优化控制等多方面的策略。

1 分布式能源接入对变压器损耗的影响

分布式能源接入对变压器损耗有着多方面复杂的影响。一方面，分布式能源如太阳能、风能发电装置的接入，改变了传统配电网单向潮流的特性，使得变压器的负荷分布和大小发生变化。当分布式能源输出功率与本地负荷匹配度较高时，可减少变压器从上级电网获取的功率，在一定程度上降低负载损耗。例如，在白天光照充足时，分布式光伏发电大量上网，若本地用户负载能够及时消纳，变压器传输的功率降低，绕组中的电流减小，由电流引起的铜损就会降低。另一方面，分布式能源具有间歇性和波动性，其输出功率并非稳定不变。这可能导致变压器的负荷频繁波动，使得变压器的铁芯反复经历励磁和去磁过程，增加了铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗。同时，若分布式能源接入位置不合理，还可能引发局部过电压或过电流现象，进一步增大变压器损耗。

2 分布式能源接入下变压器损耗评估方法

2.1 传统变压器损耗评估方法

传统变压器损耗评估方法主要基于变压器的基本原理和运行特性。变压器损耗由空载损耗（铁损）和负载

损耗（铜损）两部分组成。空载损耗是指变压器在空载运行时，铁芯中由于交变磁场产生的磁滞损耗和涡流损耗，其大小主要取决于铁芯材质、结构以及运行电压。通常，厂家会在变压器的技术参数中给出额定空载损耗值，在实际运行中，当电压波动较小时，空载损耗可近似认为恒定。负载损耗则与变压器绕组中的电流大小密切相关，它是由于绕组电阻在电流通过时产生的热损耗。根据焦耳定律，负载损耗与电流的平方成正比。传统评估方法通过测量或计算变压器的负载电流，结合绕组电阻值来确定负载损耗。在实际应用中，常采用短路试验来获取变压器的短路阻抗和额定负载损耗，进而根据实际负载率来计算不同负载情况下的负载损耗。此外，传统评估还考虑变压器的运行时间，将空载损耗和负载损耗按时间进行积分，以得到一段时间内的总损耗。这种方法相对较为理想化，它假设电网运行状态相对稳定，忽略了诸如电压波动、谐波等因素对损耗的影响。但在相对稳态的传统电网环境下，该方法为变压器损耗评估提供了基础且有效的手段，能够帮助电力系统运营者对变压器的能耗有一个较为准确的认识，从而合理安排变压器运行方式，实现节能降耗。

2.2 考虑分布式能源接入的变压器损耗评估模型

随着分布式能源大规模接入电网，传统的变压器损耗评估方法已难以满足实际需求，需要构建新的评估模型。考虑分布式能源接入的变压器损耗评估模型要全面考量分布式能源带来的诸多复杂影响。分布式能源的间歇性和波动性使得电网潮流变得复杂多变，变压器的负荷特性不再遵循传统模式。因此，新模型首先要能实时跟踪分布式能源的输出功率变化以及由此引起的变压器负荷动态变化。例如，通过建立分布式能源发电预测模型，结合气象数据（对于太阳能、风能等）预测其功率

输出,将预测结果作为输入,与电网负荷预测数据共同构建变压器的实时负荷曲线。同时,分布式能源接入可能导致电网电压波动和产生谐波。模型需考虑电压波动对变压器空载损耗的影响,因为电压的变化会改变铁芯中的磁通密度,进而影响磁滞和涡流损耗。对于谐波问题,要分析不同频次谐波电流在变压器绕组中产生的额外损耗。可通过谐波分析技术,获取电网中的谐波含量,依据谐波电流在变压器绕组中的分布规律,计算谐波导致的附加损耗。此外,分布式能源接入位置也对变压器损耗有重要影响。不同接入点会使变压器各侧的功率分布发生改变,模型需考虑这一因素,精确计算变压器各绕组中的电流,从而准确评估负载损耗。

2.3 变压器损耗评估指标体系

变压器损耗评估指标体系是全面、准确评估变压器损耗情况的关键框架,它涵盖多个维度,以实现变压器损耗的深入分析与精准把握。首先是基本损耗指标,包括空载损耗和负载损耗。空载损耗反映了变压器铁芯在无负载电流时的能量消耗,它是衡量变压器铁芯材质和制造工艺优劣的重要指标。较低的空载损耗意味着在变压器轻载或空载运行时能减少不必要的能量浪费。负载损耗则直接与变压器负载电流相关,体现了绕组在传输电能过程中的热损耗,是评估变压器在不同负载水平下能耗的关键指标。其次是损耗变化率指标,如空载损耗变化率和负载损耗变化率。空载损耗变化率用于衡量在电网电压波动、温度变化等因素影响下,空载损耗的相对变化程度,有助于分析变压器对运行环境变化的敏感度。负载损耗变化率则反映了随着负载的动态变化,负载损耗的增减情况,对于评估变压器在负荷波动情况下的损耗特性至关重要。再者,考虑到分布式能源接入带来的影响,引入与分布式能源相关的指标。例如,分布式能源接入引起的变压器损耗增量指标,该指标量化了因分布式能源接入而额外增加的变压器损耗,明确了分布式能源对变压器损耗的具体影响程度。还有分布式能源接入后变压器损耗波动系数,它表征了由于分布式能源的间歇性和波动性,导致变压器损耗在一定时间内的波动剧烈程度,为评估变压器运行稳定性提供依据。

3 分布式能源接入下的变压器能效平衡策略

3.1 变压器负载优化调度策略

在分布式能源接入的复杂电网环境中,变压器负载优化调度策略对于提升能效平衡至关重要。该策略旨在通过合理分配变压器的负载,降低整体损耗,提高能源利用效率。首先,需实时监测变压器的负载情况以及分布式能源的出力 and 电网负荷。借助先进的监测技术和智

能电表等设备,获取精确的实时数据,为后续的调度决策提供依据。例如,利用物联网技术将分布在电网各处的监测设备连接起来,构建实时数据采集网络,确保数据的及时准确传输。基于实时数据,采用智能算法进行负载分配。常用的算法如遗传算法、粒子群算法等,这些算法能够在考虑变压器容量限制、电网安全约束等条件下,对多个变压器的负载进行优化分配。例如,当某区域分布式能源发电过剩,而部分变压器负载较轻时,通过算法计算可将多余的电能合理分配到这些变压器所连接的负载上,避免电能的浪费,同时减少重载变压器的负担,降低其损耗。同时,考虑到电网的动态变化,负载优化调度策略应具备动态调整能力。根据分布式能源输出的间歇性和波动性,以及电网负荷的实时变化,及时调整变压器的负载分配。比如在白天光照充足时,分布式光伏发电量大,调度系统应及时响应,将光伏电能优先分配给合适的负载,同时调整变压器负载,确保各变压器运行在高效区间。

3.2 分布式能源出力控制策略

分布式能源出力控制策略是实现变压器能效平衡的关键环节,它致力于通过合理调控分布式能源的输出功率,降低对变压器损耗的不利影响,提升整个系统的能源利用效率。分布式能源如太阳能、风能等具有天然的间歇性和波动性,其输出功率受自然条件如光照强度、风速等因素影响较大。为应对这一挑战,首先要建立精准的分布式能源发电预测模型。结合气象数据、地理信息以及历史发电数据,运用机器学习、深度学习等技术,对分布式能源的未来出力进行预测。例如,利用长短期记忆网络(LSTM)模型对光伏发电进行预测,提前掌握其功率变化趋势,为后续的出力控制提供依据。基于预测结果,采用多种控制手段来调节分布式能源的出力。对于光伏发电系统,可以通过控制光伏电池的最大功率点跟踪(MPPT)算法的参数,在保证一定发电效率的前提下,适当调整输出功率。当预测到光伏发电量将大幅增加,可能导致变压器过载或损耗增大时,可微调MPPT算法,使光伏电池工作在稍偏离最大功率点的位置,降低输出功率。对于风力发电系统,可采用桨距角控制或变转速控制等方法。在风速过高可能使风机输出功率过大时,通过调整桨距角改变叶片对风能的捕获效率,从而限制风力发电机的输出功率。

3.3 变压器参数优化设计策略

在分布式能源接入的背景下,变压器参数优化设计策略对于提升变压器能效平衡起着基础性的关键作用。传统变压器设计参数在面对分布式能源带来的复杂运

行条件时,可能无法实现最优的能效表现,因此需要对变压器的相关参数进行针对性优化。从铁芯材料与结构方面来看,选用高性能的铁芯材料可以显著降低空载损耗。例如,采用非晶合金材料替代传统硅钢片,非晶合金具有低磁滞损耗和低涡流损耗的特性,能有效减少变压器在空载运行时的能量消耗。同时,优化铁芯的结构设计,合理调整铁芯的形状、尺寸以及磁路布局,可进一步降低铁芯中的磁通密度不均匀性,减少局部磁滞和涡流损耗。例如,采用渐开线铁芯结构,能使铁芯在相同的励磁条件下,磁通分布更加均匀,从而降低损耗。对于绕组参数,合理选择绕组导线材质和规格至关重要。在考虑成本和散热的前提下,选用电导率高的导体材料,如高纯度铜,可降低绕组电阻,减少负载损耗。同时,根据变压器的容量和预期运行负载情况,精确设计绕组的匝数和线径。例如,通过电磁计算和热分析,确定在满足电气性能要求的同时,使绕组电阻最小化的匝数和线径组合,以降低负载电流通过时产生的热损耗。此外,变压器的绝缘设计也不容忽视。

3.4 变压器冷却系统优化控制策略

变压器冷却系统优化控制策略是保障变压器在分布式能源接入下实现能效平衡的重要一环。随着分布式能源接入,变压器的运行工况更加复杂,负载波动频繁,导致其产生的热量变化较大,因此优化冷却系统控制对于维持变压器高效运行至关重要。传统的变压器冷却系统多采用固定的冷却模式,如定时启动风扇或油泵等,这种方式无法根据变压器实际的发热情况进行灵活调整,容易造成能源浪费或冷却不足。优化控制策略首先要实现对变压器运行温度的实时精确监测。利用光纤传感器、红外热成像仪等设备,实时获取变压器绕组、铁芯等关键部位的温度信息。这些传感器可将温度数据实时传输至控制系统,为冷却系统的智能调控提供准确依据。基于实时温度数据,采用智能控制算法对冷却设备

进行调节。例如,引入模糊控制算法,根据变压器当前温度、温度变化率以及负载情况等多个因素,动态调整冷却风扇的转速和油泵的流量。当变压器温度较低且负载较小时,降低风扇转速或减少油泵流量,以降低冷却系统自身的能耗;而当温度升高或负载增大时,及时提高风扇转速和油泵流量,确保变压器得到充分冷却。此外,还可以结合分布式能源的出力情况进行协同控制。当分布式能源出力较大,导致变压器负载增加、发热增多时,提前调整冷却系统的运行参数,增强冷却效果,防止变压器因过热而增加损耗。

结束语

综上所述,DER的接入对变压器损耗及能效平衡提出了新的挑战和机遇。通过对传统评估方法的改进和新型评估模型的建立,可以更准确地评估DER接入下的变压器损耗。同时,综合运用负载优化调度、DER出力控制、参数优化设计和冷却系统优化控制等策略,可以有效提升变压器的能效水平,保障电力系统的稳定运行。未来,随着技术的不断进步和应用的深入,DER与变压器能效平衡的研究将更加精细化和智能化,为实现绿色、高效的电力系统提供有力支持。

参考文献

- [1]刘思宇,李霄.分布式能源接入下的继电保护技术研究[J].电气技术与经济,2025,(01):39-41+44.
- [2]戴旭,陈旭,苏军,肖钰皓,沈冰成,霍耀冉.适应分布式能源大量接入的输配电油浸式变压器故障诊断方法研究[J].四川电力技术,2024,47(06):50-55.
- [3]魏迎春.分布式能源接入电网的功率控制优化策略分析[J].集成电路应用,2024,41(12):354-355.
- [4]杨立宁,谢夏慧,李春春.含分布式能源接入的配电网优化调度研究[J].仪器仪表用户,2024,31(12):124-126.
- [5]吴颖颖.分布式能源接入对输配电系统的影响及应对措施分析[J].仪器仪表用户,2024,31(11):98-100.