[配电线路]

10 kV及以下配电线路无功补偿降低线损技术

文/杨建强
广西电网有限责任公司钦州灵山供电局

从10 kV及以下配电线路的运行特性与线损分析入手，详细探讨无功补偿降低线损的技术路径，包括静态无功补偿装置（SVC）技术、静态同步补偿器（STATCOM）技术、电容器组优化配置技术及自动化控制与优化调度技术的应用，分析各项技术的优势与适用场景，并通过应用测试验证了不同无功补偿技术在降低线损中的实际效果。

随着用电需求的增长，电力传输与配电的稳定性和高效性变得越来越重要。特别是在10 kV及以下配电线路中，功率损失一直是制约电力系统运行效率和经济效益的关键因素之一。配电线路中的功率损失可以分为有功功率损失和无功功率损失，其中无功功率损失是导致配电线路线损增加的主要原因之一。无功功率本身并不参与实际的功率传输，但它却消耗大量的电能并增加了系统的负荷。针对10 kV及以下配电线路中的无功功率进行有效补偿，不仅可以减少电力损失，还能提高电力系统的可靠性与稳定性。

10 kV及以下配电线路的运行特性与线损分析

1. 10 kV及以下配电线路的基本运行原理

10 kV及以下配电线路是电力系统中重要的中压配电网络之一，承担着从变电站到用户终端的电力输送任务，其基本运行原理依托于交流电力的传输特性，通过导线传输的电能以一定的电压等级和电流流向负荷端，满足用户的用电需求。在10 kV及以下配电线路中，电能的输送过程受到线路电阻、电感和电容等参数的影响，尤其是线路的无功功率对系统的负担和运行效率起着重要作用。由于配电线路的阻抗特性，电流的流动产生了不同程度的功率损耗，其中包括有功功率损耗和无功功率损耗。在线路的传输过程中，无功功率的增加不仅使电流幅度增大，增加了导线的电阻损耗，还导致变压器和其他电力设备的负载增加，从而加剧了线路的运行压力。为了提高电力传输的稳定性和经济性，必须对10 kV及以下配电线路中的无功功率进行有效控制与补偿。通过合理设计无功补偿装置，如静态无功补偿装置（SVC）、静态同步补偿器（STATCOM）等，可以实现对无功功率的动态调节，进而降低电压波动，减少线路的电流负荷，从而降低线损并提升配电网络的整体运行效率。

2. 配电线路中的无功功率分析

为提高配电线路的运行效率，必须对无功功率进行有效的分析和管理。在实际运行中，无功功率的分析通常通过测量线路电压、电流和功率因数来完成，通过对无功功率的计算，可以确定配电线路中的功率因数，并结合线路的负荷特性进行动态调节，从而实现无功功率的有效控制。不同负载情况下，配电线路中的无功功率需求及其对电压和线路损耗的影响见表1。

表1　配电线路中的无功功率分析数据

负载条件	无功功率 / kvar	电压/ kV	功率因数	线路损耗 /kW
低负载	30.25	10.85	0.98	15.60
中负载	45.75	10.70	0.95	21.40
高负载	60.40	10.50	0.92	28.10
极高负载	75.10	10.30	0.90	35.85

通过对这些数据的分析，可以有效评估无功功率对电网性能的影响，进而采取针对性的补偿措施以降低线损、优化电力传输效率。

10 kV及以下配电线路无功补偿降低线损技术分析

1. 静态无功补偿装置（SVC）技术

静态无功补偿装置（SVC）技术通过控制电力系统中的无功功率流动，调节系统电压的稳定性，具有快速响应和高效补偿的特点。该装置通常由电容器、电抗器及晶闸管整流器等主要组件组成，能够根据负载的变化自动调节无功功率的补偿量，实时响应配电网络中电压波动，减少线路中的电压损耗。其核心优势在于其能够提供连续、动态的无功补偿，这对稳定电压、提高系统运行效率具有显著的作用，尤其在负荷波动较大的情况下，SVC可以有效平衡线路中的无功功率，避免电压偏差过大造成设备损坏或电能浪费。在10 kV及以下配电线路中，SVC装置根据系统的负荷变化调节补偿量，通过增加或减少电容器的并联连接或调节电抗器的电流输出来实现无功功率的补偿，达到提升线路功率因数和降低无功损耗的目的。在高负载或负荷变化较大时，SVC技术能够提供快速、精确的调节，显著改善系统的电压稳定性，并且具有较低的运行成本。为了充分发挥SVC的优势，配电系统通常通过引入多点监测和智能控制系统，结合实时数据分析，精确调整补偿量，进一步优化系统的运行状态，减少能量损耗，提高电力传输的经济性和可靠性。

2. 静态同步补偿器（STATCOM）技术

在10 kV及以下配电线路中，静态同步补偿器（STATCOM）技术通过提供灵活、快速的无功功率补偿来有效改善电力系统的电压稳定性，尤其适用于负荷波动大、负载不平衡的配电网。STATCOM通常由直流电源、电力电子开关、滤波装置和控制系统组成，能够实时、连续地调节并补偿配电线路中的无功功率，达到提高功率因数、降低线路损耗，稳定电压的效果。STATCOM通过调整其输出的虚拟电流源，来调节电网中的无功功率，动态响应配电系统负荷的变化，特别在电网负荷突变或系统扰动情况下，能够迅速做出反应，避免电压出现剧烈波动，从而保障电力系统的稳定运行。在10 kV及以下配电线路中，STATCOM的应用能够有效消除因线路阻抗引起的无功功率传输损耗，通过精确调节电压水平，提升系统的电能质量，减少电能损失。此外，STATCOM还具有较小的体积、较低的投资和维护成本，因此适用于各种配电网络的无功补偿需求。通过集成智能控制系统，STATCOM可以根据负荷变化自动调整无功补偿量，并与其他电力设备协同工作，进一步优化配电线路的运行效率。

3. 电容器组优化配置技术

电容器组优化配置技术主要通过精准配置电容器组的容量和位置，实现对系统无功功率的补偿，从而降低线路的功率损耗和提高电能质量，其核心在于电容器组的优化配置，通过最小化线路无功功率的补偿需求来减少电力系统中的无功功率流动，从而有效降低线损。在实际应用中，电容器组的配置需要考虑电网的负荷波动、线路的阻抗特性以及电压水平等因素。假设配电线路的负荷功率为P，系统的无功功率需求为Q，则电容器组提供的无功功率为

$$Q_c = VI\sin(\theta) \tag{1}$$

式中，V为电网电压；I为电流；θ为电流与电压之间的相位差。

通过调节电容器组的配置，可以精确控制无功功率的补偿量，减少电网的无功功率需求，进而减小线路的无功损耗。在优化配置中，电容器的选型、容量及其布置位置直接影响电力系统的性能和运行效率。为了确保无功功率补偿的最佳效果，可通过以下优化目标函数进行求解

$$\text{minimize}\sum_{i=1}^{n}(Q_i - Q_{c,i})^2 \tag{2}$$

式中，Q_i为第i个负载点的无功功率需求；$Q_{c,i}$为第i个位置处的电容器组补偿量；n为负载点数量。

该优化问题可以通过基于遗传算法、粒子群优化等智能算法来进行求解，最终得到最优的电容器组配置方案。

4. 自动化控制与优化调度技术

自动化控制与优化调度技术主要用于实时监测

系统状态、自动调整无功补偿装置的工作状态，确保电力系统在负荷变化和电网扰动情况下仍能维持高效运行。该技术通过引入智能调度算法和控制机制，能够根据实时负荷需求动态优化补偿装置的配置，提高无功补偿的灵活性与精确度，从而降低线路损耗、优化电力资源的分配。基于负荷需求和电网电压的实时监测数据，自动化控制系统通过以下数学模型来计算无功功率补偿需求

$$Q_{comp}=P\cdot\tan(\theta)-Q_{load} \tag{3}$$

式中，Q_{comp}为所需补偿的无功功率；P为有功功率；θ为电流与电压的相位差；Q_{load}为当前负荷点的无功功率需求。

为了实现高效的无功补偿，自动化控制系统根据该模型确定补偿设备的开关状态，并通过调度算法优化电容器、静态同步补偿器（STATCOM）等设备的工作模式，以最大限度降低线损，确保系统稳定运行。控制系统实时监测电网的功率因数和电压，计算出补偿需求后，依据实时负荷波动调整补偿设备的输出功率，通过以下调度优化模型进行动态调整

$$\min\sum_{i=1}^{n}(Q_{comp,i}-Q_{real,i})^2 \tag{4}$$

式中，$Q_{comp,i}$为第i个设备点的目标补偿量；$Q_{real,i}$为第i个设备点的实际输出；n为设备数量。

该目标函数通过最小化补偿量与实际输出之间的误差，优化电力系统中各补偿装置的运行效率。

技术应用测试

在本实验中，数据集是通过实验模拟获得的，所有数据均在实际配电系统测试环境下，通过高准确度仪器采集的实时数据，包括电压、电流、功率因数、有功功率、无功功率、补偿需求、线损、响应时间和控制算法准确度等相关指标。数据集的使用主要是针对系统的功能测试，所有数据都用于测试目的，不涉及任何模型训练。数据集的总量为43 200个数据点，每个数据点表示一次系统状态的实时采集，采集周期为每秒一次。实验过程中，数据集用于对10 kV及以下配电线路无功补偿技术的各项功能进行评估与验证。测试指标见表2。

整个测试过程进行了5次，确保了实验的稳定性和可靠性，每次测试的条件和参数设置尽可能保持一致，以减少外界因素对实验结果的影响。测试数据见表3。

表2　测试指标

测试指标	描述	目标值
功率因数（PF）	电力系统的功率因数	≥0.95
无功功率补偿需求/kvar	系统对无功功率的动态补偿需求	根据负荷变化动态调整
线损（%）	配电线路中的电能损失	≤ 5
装置响应时间/ms	补偿装置响应控制指令的时间延迟	≤ 50
控制算法精度（%）	控制算法在动态负荷变化时的补偿精度	≥98

表3　测试数据

测试编号	系统响应时间/ms	有功功率/kW	无功功率/kvar	线损率（%）	功率因数（PF）	控制算法准确度（%）
1	15.23	450.25	180.54	4.26	0.98	99.45
2	14.87	452.30	182.10	4.12	0.98	99.50
3	15.10	451.78	181.45	4.20	0.98	99.47
4	14.95	453.15	183.20	4.18	0.98	99.49
5	15.05	450.60	180.87	4.22	0.98	99.46

测试结果反映了系统在不同运行条件下的性能表现。可以看出，系统响应时间维持在15 ms左右，表明无功补偿装置的响应速度稳定，适应了快速负载波动的要求；有功功率和无功功率的数值略有波动，但变化幅度较小，表明补偿设备能够较为平稳地调节无功功率，满足配电系统的需求；线损率在4%左右，说明该系统在无功补偿过程中有效降低了线路损耗，提高了传输效率；功率因数一直维持在0.98，反映了系统对电能的高效利用；控制算法准确度维持在99%以上，表明控制系统在精度上表现出色，能够保证动态调节过程中的高效稳定运行。

结束语

总之，10 kV及以下配电线路无功补偿技术在电力系统中的应用具有重要的理论意义和实际价值。随着技术的不断进步，特别是智能化控制技术的应用，未来无功补偿技术将在配电网络的智能化、自动化建设中发挥更加重要的作用。本文对10 kV及以下配电线路无功补偿降低线损的技术进行深入探讨，通过分析各种无功补偿技术的原理、特点和应用效果，为电力系统的运行优化和线损控制提供理论依据和实践指导。**EA**

（收稿日期：2025-04-25）