[谐波治理]

面向电气系统谐波治理的无功补偿技术研究

文/赵园园
南京市市政设计研究院有限责任公司

综合考虑电力系统的实际情况、滤波器的性能特点和负载需求，选择适合的滤波器类型滤除电气系统全范围内的特定次谐波。同时，加装静止无功补偿装置动态调节无功功率，维持电力系统的电压稳定和功率因数优化。通过合理计算无功功率补偿量并改进电容器投切策略，进一步增强谐波治理效果，保障电气系统的正常运行。实验结果表明，面向电气系统谐波治理的无功补偿技术能显著降低谐波电流含量和总谐波畸变率，使谐波污染程度保持在一个较低的数值，有效提升了电气系统的稳定性和安全性。

面向电气系统谐波治理的无功补偿技术研究是当前电力行业的重要课题，电力系统中日益严重的谐波污染问题，不仅影响电力系统的稳定运行，还可能导致设备损坏和能源浪费。随着电力电子技术的广泛应用，谐波源不断增加，谐波污染程度日益加剧，对电力系统的安全性和经济性构成严峻挑战。

当前的研究显示，虽然已有多种无功补偿及谐波治理技术被提出并应用于实际系统中，但仍存在诸多不足。例如，孙佳阳等[1]指出无功补偿技术可以有效提高电网的功率因数，降低电网损耗，并通过电容器组等设备的合理配置，对谐波进行一定程度的抑制。但在谐波污染严重的情况下，电容器的损耗和谐波放大问题较为突出，导致补偿效果不够理想。王超[2]提出通过无功补偿装置的应用，可以实现对电网无功功率的快速调节，从而有效抑制电压波动和闪变。然而，这些装置在实际应用中可能受到电网电压波动、谐波干扰等因素的影响，导致补偿效果不够理想。唐爱红等[3]针对海上风电系统这一特定场景，提出基于分布式潮流控制器的谐波治理方法。通过仿真实验验证了该方法的有效性，表明其可以显著降低风电系统注入电网的谐波含量。但在谐波污染程度极高的环境下，该方法的治理效果可能受到一定限制。

针对这些缺陷，本文提出一种新的无功补偿技术研究方法，该方法结合现代控制理论和电力电子技术，期望实现更高效、更灵活的谐波治理。本研究旨在为解决电气系统中的谐波污染问题提供新的思路和技术支持，对于提升电力系统的稳定性和经济性具有重要意义。

谐波滤波器选型

谐波滤波器的选型需根据电力系统的实际情况进行，正确的谐波滤波器能够有效滤除系统内部特定次谐波，减少谐波对电网和用电设备的影响。谐波滤波器的级数指其内部谐振回路的数量。随着级数的递增，滤波器在谐波抑制方面的精确度亦随之提升。然而，这种提升往往伴随着系统结构复杂性的加剧以及成本的增加。因此，在选型时根据电力系统的谐波情况和成本预算来权衡选择。

负载功率因数（Power Factor，PF）也是选型时的关键指标，描述了交流电路中负载有效利用电

能的程度。负载功率因数计算表达式为

$$PF=\cos\phi=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \tag{1}$$

式中，ϕ为电压与电流之间的相位差；P为有功功率，表示负载实际消耗的功率；Q为无功功率。

考虑以上两种因素，在选择时同时参考以下滤波器类型等参数，进行滤波器选型决策，见表1。

表1　滤波器类型及相关参数

滤波器类型	滤波范围/次	负载功率因数(cosϕ)	适用负载类型	备注
无源谐波滤波器	3，5，7，11	⩾0.9	电阻性、电感性负载	成本较低，适用于一般谐波治理
有源谐波滤波器	2～50	⩾0.98	各类非线性负载	动态响应快，滤波效果好，但成本较高
混合谐波滤波器	3～40	⩾0.95	复杂负载环境	结合无源和有源滤波器的优点，性价比高
调谐谐波滤波器	特定次谐波（如5次、7次）	⩾0.92	特定谐波源负载	针对特定次谐波进行精确滤波
高通谐波滤波器	⩾13次	⩾0.9	高频谐波源负载	主要用于滤除高频谐波

根据实际情况，选择出最适合电力系统的谐波滤波器，减少谐波对电网和用电设备的影响。

加装静止无功补偿装置

仅依靠滤波器并不能完全解决谐波问题，特别是当系统中的谐波成分复杂且含量较大时。为此，在选择的谐波滤波器中加装静止无功补偿装置。这种装置能够动态调节无功功率，维持电力系统的电压稳定和功率因数优化，从而进一步降低谐波对系统的影响。在静止无功补偿装置的实践应用中，补偿装置电容值的选定需严密结合电网的负载状态以及功率因数需求。

1）在电网负载呈现感性特征时，并联电容器成为无功补偿的首选方式，以补偿电网中的感性无功功率。而当电网负载转为容性特征时，则应选择串联电容器进行补偿，以适应容性负载的需求。

2）电力系统还对功率因数有一定的要求，例如，一些地区或行业可能规定功率因数PF不得低于0.9。因此，在选择静止无功补偿装置电容值时，应保证补偿后的功率因数能够满足这些要求。选定适当的电容值后，在长距离输电线路中选择合适的地点加装静止无功补偿装置。本文设计的静止无功补偿装置装置在电力系统中的加装位置如图1所示。

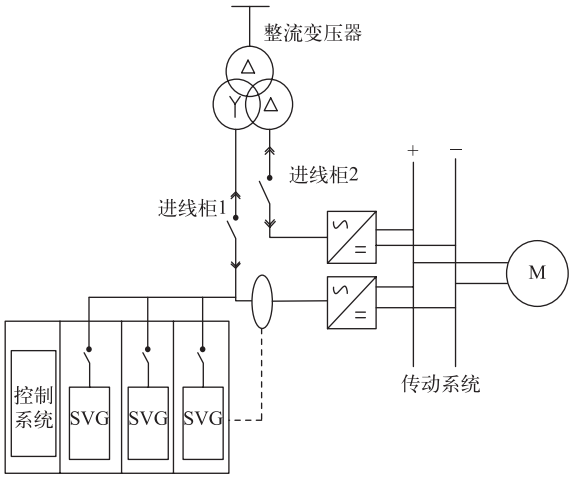


图1　静止无功补偿装置示意图

通过合理的布局和配置，静止无功补偿装置能够最大程度地发挥其改善输电系统稳定性和提高输电能力的作用。

调整无功补偿容量治理谐波

利用静止无功补偿装置和无功补偿技术估计无功补偿容量，以进行合理调整增强谐波治理效果。无功功率补偿量Q_c通常可以通过电容器的电容值、电网电压和角频率来计算，公式为

$$Q_c=\omega U^2 C P_F \tag{2}$$

式中，C为电容值；U为电网电压；ω为角频率，$\omega=2\pi f$。

为提升无功补偿技术的效能，对电容器的投切策略进行改进。在构建投切判据时，充分预估未来生产负载可能出现的波动性，并设计合理的裕量预留机制，以确保在各种工况条件下，补偿系统均能维持良好的性能表现，投切规则为

$$\begin{cases} Q_{ci} > d^1 Q_i, \mathrm{SW}_i = \mathrm{open} \\ Q_{ci} < d^2 Q_i, \mathrm{SW}_i = \mathrm{closed} \end{cases} \tag{3}$$

式中，SW_i为第i个电容器的开关状态；Q_i为对应电容器的额定容量；d^1和d^2分别为抑制系统震荡而进行补偿的系数。

通过融合先进的无功补偿设备、电容器投切策略以及专业的滤波器设计，构建一套无功功率补偿体系，应对电力系统的谐波问题，为电力系统的稳

定运行提供有力保障。

实验与分析

1. 实验准备

某大规模污水厂，引入了多台大功率变频器，导致企业内部的电气系统谐波污染问题日益严重。谐波不仅造成电网电压和电流的波形畸变，还引发变压器、电容器等电气设备的过热、振动和噪声等问题，严重影响电力系统的稳定性和设备的使用寿命。以该企业为例，应用面向电气系统谐波治理的无功补偿技术，验证其效果。根据加装的静止无功补偿装置位置，因此谐波测试点设计如图2所示。

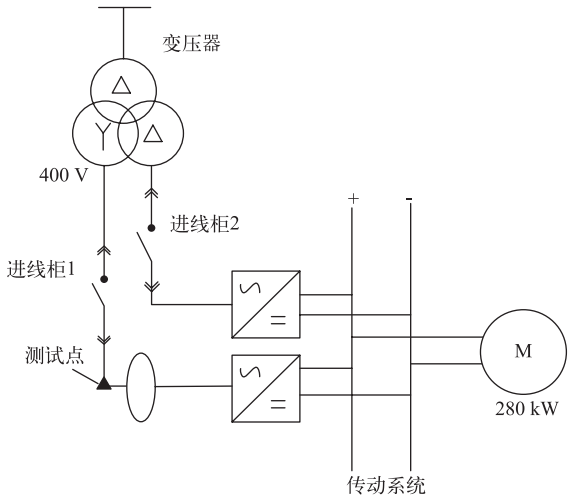


图2　谐波测试点

结合该企业实际情况，选择的实验设备见表2。

在实验过程中，根据电气系统的实际情况和实验需求，对上述设备进行合理的参数设置和调试，以确保实验结果的准确性和可靠性。

2. 谐波污染程度指标

谐波含量：表示谐波电流或电压在总电流或总电压中所占的比例。谐波含量越低，说明谐波治理的效果越好。

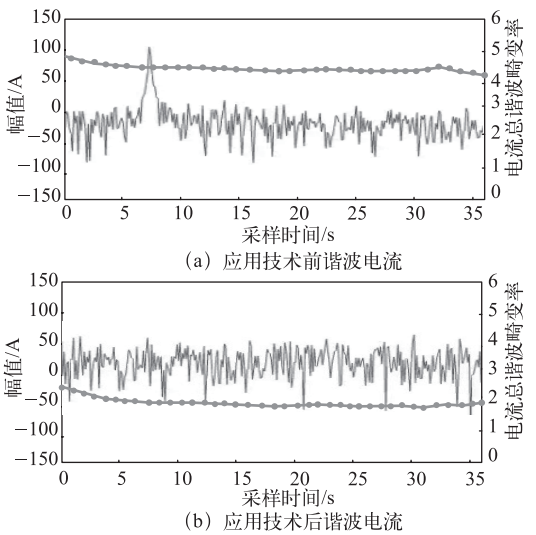
总谐波畸变率（THD）：用于描述电压或电流的波形畸变程度，是各次谐波有效值二次方和的二次方根与基波有效值之比。THD值越低，说明波形畸变越小，谐波治理效果越显著。

3. 实验结果与分析

在本次实验中，针对电气系统中的谐波污染程度进行详细的分析。测量谐波含量和总谐波畸变率两个指标值，结果如图3所示。

表2　实验设备

设备名称	型号	主要参数设置
有源电力滤波器（APF）	APF-500	①额定电压：380 V ②额定电流：500 A ③补偿容量：±500 kVar ④响应时间：<10 ms ⑤滤波范围：2～50次谐波
静止无功发生器（SVG）	SVG-600	①额定电压：380 V ②额定容量：600 kVar ③功率因数调节范围：0.9～1.0 ④响应时间：<20 ms ⑤控制方式：自动/手动
晶闸管投切电容器（TSC）	TSC-1000	①额定电压：400 V ②额定容量：1 000 kVar ③投切时间：<40 ms ④控制方式：自动/手动
谐波分析仪	HARM-1000	①测量范围：电压、电流、功率因数、谐波含量等 ②测量准确度：±0.5% ③采样频率：10 kHz ④显示方式：液晶显示屏 ⑤数据存储：内置存储器，可存储大量数据
无功功率表	VAR-500	①测量范围：0～500 kVar ②测量准确度：±1% ③显示方式：LED数码管 ④电源电压：220 V



（a）应用技术前谐波电流

（b）应用技术后谐波电流

图3　谐波污染程度

在应用无功补偿技术之前，谐波电流的含量较高，且随时间的变化较大，这可能对电气系统的稳定运行构成威胁。特别是在某些特定的时间点，谐波电流的含量甚至达到较高的峰值，加剧电气系统的谐波污染程度。然而，在应用面向电气系统谐波治理的无功补偿技术之后，谐波电流的含量得到显著的降低。通过对比应用技术前后的谐波电流幅值，可以清晰地看到这种降低的趋势。

（下转第156页）

中的有效性和实用性。

未来的研究可以进一步融合多源数据，并结合更多先进算法，以进一步提升故障率预测的精度和适用范围。同时，通过与物联网技术的深度结合，可实现输电变电设备故障预测的实时性和智能化，为智慧电网建设提供更有力的技术支持。EA

（收稿日期：2025-01-25）

参考文献

[1] 万乐．基于云平台输电变电设备故障率预测技术研究[J]．电气技术与经济，2024，6(3)：64-66．
[2] 董先鹏．基于云-边协同的城轨牵引系统PHM技术研究[J]．智慧轨道交通，2023，60(5)：1-5．
[3] 唐宁昆，王高才．云边协同环境下一种面向任务的多智能体强化学习任务卸载方案[J]．小型微型计算机系统，2024，15(5)：165-166．
[4] 冷贵峰，连欣乐，黄佐林，等．基于故障率和云平台的电网实时风险预警策略及实现[J]．电力信息化，2022，13(2)：20-21．
[5] 杨荣，康凤佳，刘浩．基于云平台的石油钻机智能管理维护系统研究[J]．电气传动自动化，2023，45(4)：7-10．
[6] 程诗尧，武赫，朱锦山，等．批量智能电能表故障率预测方法的研究[J]．仪器仪表与分析监测，2022，23(2)：3-5．
[7] 李林张晓寒．基于Power BI云大数据的车辆远程诊断及故障预报研究[J]．汽车与驾驶维修，2024，(57)：133-135．
[8] 姚瑛，季大龙，傅文进，等．考虑状态感知的低压配电网拓扑生成及故障预测技术研究[J]．制造业自动化，2023，45(6)：169-174．
[9] 舒畅，赖飞伟．基于PSO优化的0．4 k V配网故障预测技术研究[J]．粘接，2024，48(10)：124-125．

（上接第152页）

从总谐波畸变率的角度来看，无功补偿技术的应用也取得显著的效果。在应用技术之前，总谐波畸变率较高，这表明电气系统中的谐波成分较为复杂且含量较大。而在应用无功补偿技术之后，总谐波畸变率明显降低，电气系统的谐波污染程度得到有效的控制。

综上所述，面向电气系统谐波治理的无功补偿技术在本次实验中表现出良好的性能。不仅能够有效地降低谐波电流的含量，还能够显著地降低总谐波畸变率，从而有效地提高电气系统的稳定性和安全性。

结束语

经过深入探索与实践，面向电气系统谐波治理的无功补偿技术展现出显著的成效。通过精确计算无功补偿容量，并结合优化的电容器投切策略，本文构建一套高效的无功功率补偿体系，有效降低电力系统中的谐波含量，提升系统的稳定性和电能质量。然而，尽管取得诸多进展，本研究仍存在一些不足之处。例如，对于不同类型和规模的电气系统，无功补偿技术的适用性仍需进一步验证和优化。未来，将继续深化对无功补偿技术的研究，致力于解决现有技术中存在的问题——探索更加智能和自适应的无功补偿方法，以适应不同电气系统的需求。同时，也将加强与相关领域的交流与合作，共同推动电气系统谐波治理技术的创新与发展，为构建更加安全、稳定、高效的电力系统贡献力量。EA

（收稿日期：2024-10-09）

参考文献

[1] 孙佳阳，张曙光．配电网无功补偿及谐波治理技术的研究[J]．电气技术与经济，2024(10)：54-56．
[2] 王超．电网的无功补偿与谐波治理[J]．电力设备管理，2024(13)：26-28．
[3] 唐爱红，宋幸，尚宇菲，等．基于分布式潮流控制器的海上风电系统谐波治理方法和控制策略[J]．电力系统自动化，2024，48(2)：20-28．