

# 充电桩谐波治理与有源滤波协同优化控制技术研究

闫立仁<sup>1</sup> 李佩佩<sup>1</sup> 金冠军<sup>1</sup> 邱仅红<sup>1</sup> 关 雷<sup>1</sup> 张 彬<sup>2</sup>

1. 山东国恒机电配套有限公司 山东滕州 277599

2. 枣庄学院光电工程学院 山东枣庄 277160

**摘 要:** 为了解决充电桩的谐波问题,提出了一种协同优化控制策略,该策略基于有源电力滤波器(APF)。通过对自适应谐波检测算法的改进以及前馈-反馈复合控制策略的设计,获得3.2ms快速动态响应。我们使用了改进的多目标粒子群算法(IMOPSO)来进行参数的优化,从而使得系统的THD抑制率超过了95%,同时能源消耗也减少了18%。经过仿真和实验验证,提出的方法在各种工况下都能稳定地将电网侧THD控制在4.5%以下,并且其长期运行性能的衰减率不超过3%。研究为充电桩谐波治理工作提供了一种行之有效的技术解决方法,在工程应用中较大价值。

**关键词:** 充电桩;有源电力滤波器;谐波治理;协同优化

## 一、充电桩谐波产生机理与治理需求

### (一) 充电桩谐波特性及主要来源

充电桩是一种非线性的电力电子设备,在工作时不可避免地存在谐波污染问题。研究表明,采用三相六脉动不控整流拓扑的充电桩主要产生 $6k \pm 1$ 次特征谐波( $k=1, 2, 3, \dots$ ),其中5、7次谐波含量尤为突出。由傅里叶分析得知,充电桩在PWM调制策略下,边带谐波分量在开关频率周围也不可忽略。谐波畸变率(THD)与充电功率之间存在非线性的联系,并在30%~80%的负载范围内达到顶峰。在多个充电桩的并联工作过程中,谐波的叠加会诱发谐振现象的发生,使电能质量进一步变坏。对这些谐波特性的深刻认识是有效治理策略制定的一个重要前提<sup>[1]</sup>。

### (二) 谐波对电网及设备的影响分析

谐波污染对电力系统的影响主要体现在三个方面,谐波电流会导致变压器和线路附加损耗,实测数据显示,5次谐波含量达到20%时,配电变压器铜损增加约35%。谐波电压畸变会诱发电容器组超载甚至爆炸事故的发生,一座110kV变电站曾经由于谐波谐振造成并联电容器的损坏。再者谐波对继电保护装置采样精度产生干扰而导致误动或者拒动。对充电桩本身来说,谐波会影响BMS系统电压和电流检测的准确性,使充电效率下降。所以谐波治理既是电网公司对充电设施的需求,也是充电设

施安全可靠运行的内在要求。

表1 谐波对电网及设备的影响分析

| 影响方面      | 具体描述                                        |
|-----------|---------------------------------------------|
| 变压器和线路损耗  | 谐波电流导致变压器和线路附加损耗,5次谐波含量达到20%时,配电变压器铜损增加约35% |
| 电容器组超载与爆炸 | 谐波电压畸变诱发电容器组超载甚至爆炸,例:110kV变电站因谐波谐振损坏并联电容器   |
| 继电保护装置误动  | 谐波干扰继电保护装置的采样精度,导致误动或拒动                     |
| 充电设施影响    | 谐波影响BMS系统电压和电流检测的准确性,降低充电效率                 |
| 治理需求      | 谐波治理是电网公司对充电设施的需求,也是充电设施安全可靠运行的内在要求         |

### (三) 现有谐波治理技术的局限性

尽管传统的无源滤波器(PPF)具有相对较低的成本,但其固有的调谐特性在面对充电桩负荷快速变化时显得不太适应。实验结果显示,当负载率的变动超出 $\pm 30\%$ 的范围时,PPF的谐波抑制能力会减少超过40%。尽管有源滤波器(APF)拥有动态补偿的优点,但大容量APF在开关损耗和响应延迟方面存在一些问题。混合型滤波器试图将二者的优势相结合,但面临着控制策略复杂等问题。需要注意的是已有治理方案大多集中在稳态谐波方面,对于充电桩启、停瞬态过程中谐波冲击的抑制作用较差。在多个充电桩协同工作过程中,全局优化问题一直没有得到较好地解决,上述局限性给后续的

**作者简介:** 张彬(1984.07-)男,汉族,山东枣庄,理学博士,实验师,研究方向:光电技术,为本文通讯作者。

研究指出了—个完善的方向<sup>[2]</sup>。

二、有源滤波技术在充电桩谐波治理中的应用

(一) 有源滤波器 (APF) 工作原理与拓扑结构

有源电力滤波器 (APF) 是基于瞬时无功功率的原理, 并利用尖端的电力电子技术来达到谐波的动态补偿目的。它的核心原理就是通过对负载电流谐波分量进行实时检测, 经过控制系统的操作, 驱动逆变器输出与其幅值和相位相等的补偿电流来达到抵消谐波的目的。典型三相三线制 APF 以电压型 PWM 逆变器为主要电路拓扑, 包括直流侧电容, IGBT 功率模块以及输出滤波器等关键部件。与传统的两电平拓扑相比, 现代 APF 系统更倾向于使用三电平拓扑结构, 这样可以将开关损耗减少超过 30%, 同时输出电压的谐波含量也能降低大约 45%。控制系统主要由谐波检测、电流追踪和 PWM 调制三大部分组成。特别是基于瞬时  $pq$  理论或  $ip-iq$  理论的检测方法, 能够在 5ms 内迅速响应, 满足充电桩的动态补偿要求。需要指出的是 APF 补偿性能与其直流侧电压稳定性紧密相关, 而合理的电压控制策略则是保证系统可靠工作的关键<sup>[3]</sup>。

(二) APF 在充电桩场景下的适应性优化设计

根据充电桩负载特性, 需要对 APF 系统进行多侧面适应性优化设计。一, 问题的提出从硬件上要求直流侧电容容量的优化选择不仅要确保动态响应速度还要兼顾成本因素。研究表明对 150kW 的充电桩而言, 直流侧电容取 8000-10000  $\mu F$  时可以达到最佳性价比。接下来, 为了更好地适应冲击性的负载, 控制算法需要提高其适应性, 而使用变步长最小均方 (LMS) 方法可以显著优化其动态响应表现, 实验结果表明, 与固定步长算法相比, 其跟踪误差减少了 60%。在面对多充电桩并联的场景时, 提出了一个基于主从控制的模块化 APF 框架, 其中每个模块都使用下垂控制来实现功率的均匀分配, 从而使系统的扩容能力提高了超过 300%。尤其要注意到充电桩 APF 应该具有谐波和无功综合补偿的功能, 引入加权因子多目标优化算法可以在确保谐波治理效果前提下功率因数提高到 0.98 或更高。

(三) 与传统无源滤波方案的对比优势

与传统无源滤波方案相比, 基于 APF 的充电桩谐波治理表现出了明显技术优势。从补偿效果的角度来看, APF 的总谐波畸变率 (THD) 的抑制能力可以达到 95% 以上, 而无源滤波器在负载变化时 THD 抑制率的波动可以达到 40-60%。从动态响应来看, APF 响应时间可以

控制在 10ms 内, 充分满足了充电桩对负荷快速变化的要求, 同时无源滤波器响应滞后明显。从能量消耗的角度看, APF 的系统损耗大约是补偿容量的 3-5%, 这比无源滤波器要低 15-20%。从系统适应性方面来看, APF 能够同时对多个频率谐波进行补偿, 不受电网阻抗的影响, 无源滤波器则有可能与电网产生谐振。从经济效益的角度分析, 尽管 APF 的初期投资相对较高, 但考虑到其更长的使用寿命 (10-15 年) 和更低的维护费用, 其全生命周期的成本实际上比无源方案要低 25-30%。这些优点, 使 APF 在中高档充电站谐波治理中成为首选<sup>①</sup>。

三、协同优化控制策略设计与实现

(一) 谐波检测与 APF 控制的动态响应机制

充电桩谐波治理系统谐波检测精度和 APF 控制响应速度的高低直接决定着系统的总体治理效果。在本次研究中使用了一种改进的自适应谐波检测方法, 并通过加入滑动平均滤波和相位补偿策略, 成功地解决了传统快速傅里叶变换 (FFT) 算法中的频谱泄露问题。实测数据证明, 非稳态工况下本算法谐波检测误差能够控制在允许范围内。在动态响应机制的设计上, 本研究提出了一种基于前馈-反馈的复合控制策略, 该策略中的前馈通道利用负载电流预测技术可以提前 5ms 对谐波的趋势进行预判; 反馈通道采用模糊自适应 PID 控制并依据误差对控制参数进行动态整定。经过实验验证, 这种控制框架成功地将系统的响应时间减少到了 3.2ms, 与传统的 PI 控制相比, 提高了大约 40%。尤其值得注意的是考虑到充电桩独特的间歇性运行特点, 本研究设计一种动态阈值唤醒机制在谐波含量大于设定阈值后即刻开始进行补偿, 当处于待机模式时, 它会切换到低能耗模式, 从而使系统的能量消耗减少了 18%。

表 2 谐波检测与 APF 控制的动态响应机制分析

| 项目     | 具体内容                                     |
|--------|------------------------------------------|
| 谐波检测方法 | 改进自适应算法+滑动平均滤波+相位补偿, 解决 FFT 频谱泄露问题       |
| 检测精度   | 非稳态工况下检测误差控制在允许范围内                       |
| 控制策略   | 前馈-反馈复合控制: 前馈预测 (提前 5ms 预判)+模糊自适应 PID 反馈 |
| 响应速度   | 响应时间为 3.2ms, 较传统 PI 控制提升约 40%            |
| 动态节能机制 | 动态阈值唤醒+低能耗待机模式, 整体能耗降低 18%               |
| 器件优化   | 多约束优化模型确定功率器件最优工作点, IGBT 寿命延长超 30%       |

## （二）多目标优化算法在参数整定中的应用

充电桩 APF 系统在参数整定过程中面临着补偿精度、响应速度和能耗效率等多个目标难以达到最优。本研究提出了一个基于改进的多目标粒子群算法 (IMOPSO) 的参数优化框架,通过加入动态惯性权重和精英保留策略,有效地避免了传统算法容易陷入局部最优解的问题。在目标函数的构建中,构建了包括 THD 抑制率,响应时间和系统损耗六个关键指标在内的评价体系,利用熵权法对各个指标进行权重确定。优化过程中考虑了三类约束条件,电气约束(例如直流侧电压的波动幅度)、热约束(功率器件结温限制)和控制约束(采样频率要求)。经过 Pareto 最优解集的深入分析,我们观察到,当开关频率维持在 8-10kHz 的区间时,该系统能够达到 95% 或更高的谐波补偿效果,同时确保能量损失不超过额定功率的 4%。为了检验优化后的效果,构建了一个 150kW 的实验平台进行比较测试。测试结果表明,优化后的系统综合性能指标提高了 27.6%,并且在各种负载条件下都能保持稳定。通过将优化后的结果与人工经验参数调整进行比较,我们发现前者在动态环境下的适应能力明显胜过后者,尤其是在负载突然变化时,THD 的波动减少了 65%<sup>[1]</sup>。

## （三）仿真与实验验证结果分析

为了综合评价协同优化控制策略效果,该研究通过仿真和实验验证了该策略。在构建仿真平台的过程中,基于 MATLAB/Simulink 和 PLECS 的联合仿真平台,创建了一个包含 30 台 60kW 充电桩的详尽模型,并充分考虑了电网阻抗差异和背景谐波等实际影响因素。模拟的数据表明,经过优化的系统在满载状态下能够将电网侧的 THD 从 28.7% 减少到 3.1%,并且所有的谐波含量都满足 IEEE519-2014 的标准规定。在实验验证环节,我们使用了由 RT-LAB 实时仿真系统和物理控制器构成的硬件在环 (HIL) 测试平台,并特别关注了三种不同的典型场景,单台充电桩阶跃加载、多台充电桩随机投切、电网

电压畸变条件下的运行性能。经过实际测试数据显示,在最为严格的多机随机切换条件下,该系统依然可以将 THD 维持在 4.5% 以下,并且在动态调整过程中的超调幅度不会超过 15%。通过比较分析可知,仿真及实验结果误差主要源于未建模线路阻抗及传感器噪声等因素,而关键指标最大偏差均在允许范围内,证明该模型精度较高。长期运行测试(连续 1000 小时)显示,系统各性能参数衰减率小于 3%,证明所提方法具有良好的可靠性。

## 结论

在该研究中成功研制出适合充电桩谐波控制的协同优化控制系统,理论分析与实验验证结果表明,改进后的自适应谐波检测算法能够有效地提高检测精度,前馈-反馈复合控制策略显著改善了系统的动态响应性能。采用多目标优化算法,使得系统参数达到最优匹配,从而使得各性能指标平衡提高。通过长期运行测试,验证了该方案可靠、稳定。该方案较现有技术在 THD 抑制率,能耗效率以及动态响应上都有明显的优越性。研究结果为充电基础设施电能质量治理工作提供一种新技术途径,对于推动电动汽车产业的良性发展有重要意义。今后的研究可以对人工智能技术应用于系统自学习优化方面进行进一步的探讨。

## 参考文献

- [1] 施浩杰,王英健,庄永,等.基于有源滤波的单相交流充电桩谐波治理研究[J].电力电子技术,2023,16(12):4-6.
- [2] 李镇,潘若妍,朱霄,等.改进天牛须算法优化自抗扰APF直流侧电压控制[J].电子测量技术,2022(002):4-5.
- [3] 黄炜.电动汽车充电桩的电能质量控制策略[C]//全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(六).2024,(12):8-10.