[谐波]

基于改进小波包分解的新型电力系统谐波有源抑制方法

文/杨志祥　唐璐　肖泽龙　冯喜军　孙勇卫　罗哲　李天宇　龙晓明
威胜能源技术股份有限公司

在新型电力系统发展过程中谐波问题日益凸显，给电能质量造成了严重影响，因此提出一种基于改进小波包分解的新型电力系统谐波有源抑制方法。基于改进多阈值小波包分解算法检测出新型电力系统的谐波成分，针对检测结果设计一个有源电力滤波器，并联在系统中实现新型电力系统谐波有源抑制。实验结果表明，设计方法可以有效且准确地抑制新型电力系统谐波电流中不同干扰成分，验证该方法是可行且可靠的。

谐波作为电力系统中的一种常见干扰，不仅会导致电能质量的下降，还可能对系统中的设备造成损坏，进而影响整个系统的稳定运行，所以研究电力系统谐波抑制方法对新型电力系统的可持续发展具有重要作用。近年来，众多学者开展研究，并已经取得了一定研究结果。文献[1]中针对大量分布式电源接入，造成电力系统电压畸变严重的问题，设计一种混合谐波抑制策略，实现本地负载电压和并网电流的谐波协同抑制，但该谐波抑制策略对参数敏感性较高，实际应用中难以保障谐波抑制结果的鲁棒性。文献[2]中在电力系统中安装SVG装置，进行谐波抑制，改善了系统电能质量的问题，但是SVG装置成本较高且控制复杂，难以大规模应用于我国电力系统中。针对上述问题，本文通过研究一种基于改进小波包分解的新型电力系统谐波有源抑制方法，为推动新型电力系统的大规模应用与发展提供一种新的思路和方法。

基于改进小波包分解算法检测新型电力系统谐波

小波包分解算法作为一种有效的时频分析方法，在电力系统信号处理领域得到广泛应用。然而，传统的小波包分解算法在实际应用中，常常面临频率分辨率和时间分辨率之间的矛盾。这种矛盾使得该算法在检测电力系统中的谐波时，难以同时满足高准确度和高实时性的要求[3]。因此，本文引入一种改进多阈值小波包分解算法进行新型电力系统谐波检测，该算法通过对小波包分解和阈值处理方法的优化，实现频率分辨率和时间分辨率的平衡，从而提高谐波检测的准确性。首先，根据新型电力系统的实际运行情况，选择合适的母小波和分解层数，对系统中电压和电流等电力信号进行小波包分解，表达式为

$$B_{i,j}(t)=\sum_{Z}D(Z-2j)B_{i-1,Z}(t)+\sum_{Z}G(Z-2j)B_{i-1,Z}(t) \quad (1)$$

式中，$B_{i,j}(t)$为电力信号分解后第i层第j个子频带上的小波包系数；D、G分别为低通和高通滤波器系数；Z为子频带数量。

通过式（1）的不断迭代运算，可以得到新型电力系统电流与电压信号在不同频段上的小波包系数。然后对获取的小波包系数进行多阈值处理[4]，以此提取出有用的谐波信息，表达式为

$$\overline{B}_{i,j}(t)=\begin{cases}B_{i,j}(t), |B_{i,j}(t)|\geq\gamma_n\\ 0, |B_{i,j}(t)|<\gamma_n\end{cases} \quad (2)$$

式中，$\overline{B}_{i,j}(t)$为多阈值处理后的小波包系数；γ_n为第n个阈值。

如式（2）所示，由于单阈值难以适应复杂谐波成分的变化，所以本文采用多阈值处理小波包系数，即根据小波包系数的统计特性，设定多个不同的阈值，对每个频段上的小波包系数进行逐一判断和处理，可更加准确地提取出电力信号中的谐波成分。最后，对多阈值处理后的小波包系数进行重构，重构过程是小波包分解的逆过程，通过逐层递推，将处理后的小波包系数重新组合成时域信号，具体表达式为

$$X(t)=\sum_{i,j}\overline{B}_{i,j}(t) \tag{3}$$

式中，$X(t)$为重构后的新型电力系统的电力信号。

如式（3）所示，被分解的小波包系数重构后，得到了新型电力系统中电力信号子频带的时域信息，也就是对原始信号中特定频率成分的一种表示。由于原始电力信号是一个包含多种频率成分的复杂信号，其中可能包括基波、谐波以及其他干扰成分，所以本文经过改进小波包分解算法对电力信号处理后，就可将原始信号分解为多个子频带内的时域信号，每个子频带对应一个特定的频率范围，实现对新型电力系统谐波成分的检测。

设计有源电力滤波器抑制新型电力系统谐波

一般来说，新型电力系统中谐波成分随系统中负荷的变化而变化，所以在进行新型电力系统的谐波有源抑制时，应用的有源装置需要根据实时检测到的谐波成分具体情况，进行针对性地抑制，以此保障系统谐波抑制效果[5]。因此，本文设计一个有源电力滤波器（APF）作为系统谐波抑制装置，具体结构如图1所示。

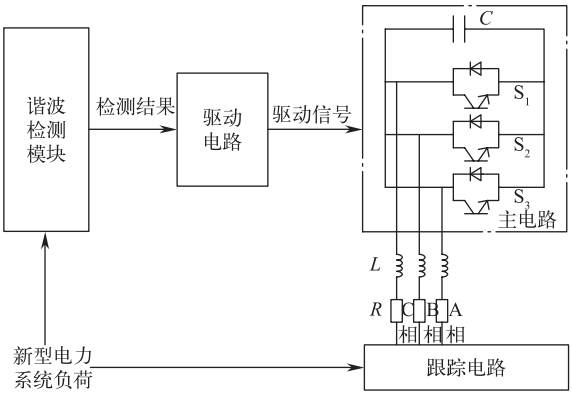

图1　有源电力滤波器原理结构图

由图1可知，在本文设计的有源电力滤波器结构中，主要包含谐波检测和谐波主动补偿两个模块。其中谐波检测模块负责实时监测新型电力系统中的谐波成分，为后续的谐波补偿提供准确的数据支持。本文主要搭载了改进小波包分解算法，根据上述内容对新型电力系统在不同频段上的谐波成分进行有效检测，而谐波主动补偿模块主要由主电路、驱动电路和跟踪电路组成。主电路是生成补偿畸变负荷的核心，该电路通过PWM技术生成补偿负荷，实际应用中主电路会根据改进小波包算法检测的新型电力系统谐波成分，调整电路中PWM信号的占空比和相位，进而生成与畸变负荷在幅值和相位上完全相反的负荷，以此作为谐波补偿负荷。驱动电路是主电路的主要控制电路，主要负责将APF中控制信号转换为适合主电路工作的驱动信号，确保主电路能够准确、快速地响应谐波检测模块的输出。跟踪电路则负责实时监测APF产生的补偿畸变负荷与新型电力系统中实际畸变负荷的匹配程度，确保补偿负荷能够精确地抵消谐波。因此，将上述结构的APF并联在新型电力系统中，当非线性负载对新型电力系统负荷造成影响，引发系统负荷畸变时，APF中的谐波检测模块就会对畸变负荷成分进行实时检测，谐波主动补偿则根据检测结果进行畸变负荷的主动补偿，促使新型电力系统的负荷波形接近或成为线性正弦波，实现新型电力系统谐波有源抑制。

实验分析

1. 实验准备

为验证设计的基于改进小波包分解的新型电力系统谐波有源抑制方法的有效性和正确性，以设计方法为实验组，引入文献[1]中方法、文献[2]中方法为对照组，展开仿真对比实验。首先，在Simulink软件中，构建一个新型电力系统的仿真模型，系统电压等级为10 kV，基波频率为50 Hz，负载采用非线性负载模拟谐波的产生。然后运行新型电力系统仿真模型，记录A相基波电流和谐波电流的波形图，如图2所示。

图2所示新型电力系统谐波电流为仿真实验数据，分别采用本文设计方法、文献[1]中方法、文献[2]中方法进行新型电力系统谐波的检测与抑制，对

比分析抑制结果。

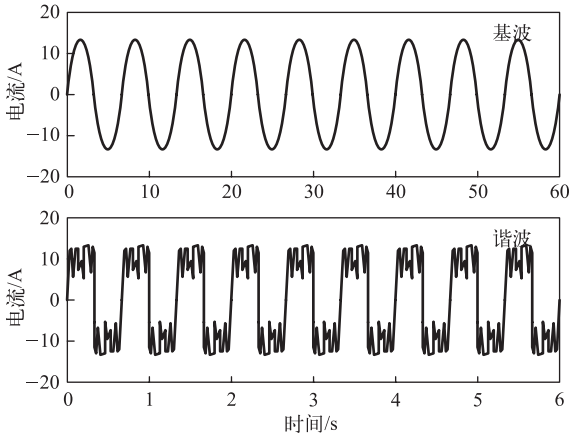

图2　新型电力系统A相谐波电流波形图

2. 结果分析

在仿真实验中，为评估各方法下新型电力系统谐波电流抑制效果，在实验系统谐波抑制前后，分别提取出各谐波干扰成分，统计不同谐波次数下的谐波畸变率数据，见表1。

表1　不同方法下谐波电流抑制效果对比

谐波次数	谐波畸变率（%）			
	抑制前	设计方法抑制后	文献[1]方法抑制后	文献[2]方法抑制后
3次	8.6	2.1	4.2	3.6
5次	6.3	1.5	3.5	2.9
7次	4.9	1.3	2.7	2.2
9次	3.8	1.1	2.0	1.7

从表1中数据可以看出，无论是应用本文设计方法，还是应用文献[1]中方法和文献[2]中方法，新型电力系统A相谐波电流中各干扰成分的畸变率均显著下降，说明三种方法都可以有效抑制系统谐波。但是，与文献[1]中方法和文献[2]中方法相比，本文设计方法的谐波抑制效果更优越，设计方法抑制后新型电力系统A相谐波电流中各干扰成分的畸变率均最低。因此，本文所设计的基于改进小波包分解的新型电力系统谐波有源抑制方法是有效且准确的。

结束语

本研究基于改进小波包分解算法，提出一种新型电力系统谐波有源抑制方法。先通过改进小波包分解算法完成新型电力系统谐波的检测。同时，结合有源滤波技术，实现对谐波的有效抑制，提高新型电力系统的电能质量和稳定性。实验结果表明，本研究提出的方法在谐波抑制方面取得了显著效果，为电力系统的安全、稳定运行提供有力保障。未来研究工作将探索适用于不同类型电力系统的谐波抑制方法，满足不同场景下的需求，为推动我国电力事业的发展做出贡献。EA

（收稿日期：2024-09-27）

参考文献

[1] 杨权，梁永昌，魏建荣，等．多谐波源下分布式电源并网逆变器的谐波抑制策略[J]．电工技术学报，2023，38(11)：2908-2920．

[2] 唐超，向思屿，曾琢琳，等．基于SVG的供电系统动态无功补偿及谐波抑制[J]．沈阳工业大学学报，2022，44(6)：625-630．

[3] 周军，李永祥，任佳鹏．基于MEEMD与HT的谐波检测方法[J]．电力系统及其自动化学报，2023，35(6)：73-82．

[4] 武鑫，李洋涛，马志勇，等．基于改进小波包分解的混合储能系统容量配置方法[J]．太阳能学报，2023，44(8)：23-29．

[5] 江悦，曹旌，梁刚，等．光伏并网逆变器谐波特性分析与谐波电流抑制[J]．电力系统及其自动化学报，2022，34(9)：64-72．