

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106640

基于改进 i_p-i_q 法的谐波多功能精细检测方法^{*}

王一帆 袁智峰 张亮

(中南大学自动化学院 长沙 410083)

摘要: 为了实现复杂电网环境下对基波和任意次谐波精细化检测补偿的需求,基于传统 i_p-i_q 检测法设计了一种对基波和任意次谐波电流的多功能精细检测新方法。基于瞬时无功功率理论给出了谐波电流有功/无功分量的定义,通过使用单锁相环结合倍频器的方法获取了各指定次谐波的频率信号,利用相位合成补偿的方法改进了传统 i_p-i_q 法的 Park 变换矩阵,设计了直流分量积分提取法代替传统方法中的低通滤波器。该方法弥补了传统检测方法的功能性不足,并具有更高的检测速度和检测精度。通过 MATLAB/Simulink 仿真分析,验证了所提方法的有效性和灵活性。

关键词: 瞬时无功功率理论;相位补偿;指定次谐波检测;谐波电流有功/无功分量

中图分类号: TM935 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Multifunctional refined harmonic detection method based on improved i_p-i_q method

Wang Yifan Qiu Zhifeng Zhang Liang

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To realize the requirement of refined detection and compensation of fundamental and arbitrary harmonics in complex power grid environment, a new multi-functional refined detection method for fundamental and arbitrary harmonics is designed based on the traditional i_p-i_q detection method. Based on the instantaneous reactive power theory, the definition of the active/reactive component of harmonic current is given. The frequency signals of the specified harmonics are obtained by using a single phase-locked loop combined with frequency multiplier. The Park transform matrix of the traditional i_p-i_q method is improved by using the phase synthesis compensation method, and the DC component integral extraction method is designed to replace the low-pass filter in the traditional method. This method makes up for the lack of functionality of traditional detection methods, and has higher detection speed and accuracy. The effectiveness and flexibility of the proposed method are verified by MATLAB/Simulink simulation.

Keywords: instantaneous reactive power theory; phase compensation; specified frequency harmonic detection; active/reactive component of harmonic current

0 引言

电网谐波污染等电能质量问题日益严重,越来越要求有源电力滤波器(active power filter, APF)等谐波补偿装置具备精细化和柔性化的谐波检测功能^[1-2]。电网由于普遍存在电压不平衡和背景谐波畸变的情况,要求谐波补偿装置能够准确检测出负载基波电流的正序有功分量和正序无功分量,为谐波和无功补偿提供基础^[3]。此外,换流型非线性负载产生的部分次谐波电流的有功分量会被负载自身所消耗,例如交流感性负荷设备运行过程中存在涡流损耗和电缆趋肤效应热损耗,并不会流入电网造成污染;同样,

电网背景谐波电压产生的谐波电流中的部分次有功分量会被负荷所消耗,不会对电网本身造成污染^[4-5]。非线性负载产生的部分次谐波电流有功分量和电网背景谐波电压产生的部分次谐波电流有功分量在公共连接点(PCC)也会有一定的叠加关系,其最终被负载消耗或是流入电网造成污染都与负载和电网的实际情况相关。这些情况的存在,更要求谐波补偿装置能够实现谐波有功/无功分量的柔性化和精细化检测。

目前,从谐波检测的功能性方面,基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法可以划分为3类:第1类,检测基波电流分量或基波电流正序分量,将所有次谐波分量作为整体进

收稿日期:2021-05-10

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(62073335,61988101,U1701261)、国家自然科学基金面上项目(62073345)资助

行检测和补偿,如传统的 $p-q$ 法,文献[6]改进了 $p-q$ 法的变换矩阵,文献[7-8]通过矩阵变换改进了锁相环的鉴相功能,文献[9]改进了 i_p-i_q 法的低通滤波器环节,这些方法本质上都是把各次谐波作为整体进行检测,没有实现基波和谐波分次分序检测。第2类,检测基波电流有功分量或基波电流正序有功分量,将基波无功分量与各次谐波分量作为整体进行检测和补偿,如传统的 i_p-i_q 法,文献[10]设计了无锁相环的 i_p-i_q 法,文献[11]设计了全参量计算矩阵,文献[12]提出了 i_p-i_q 法的改进全补偿模式,这些方法要求谐波补偿装置具有较大的补偿容量,补偿成本较高。第3类,检测指定次谐波电流分量,将各指定次谐波电流分量分别进行检测和补偿,如 $d-q-0$ 法,改进的 i_p-i_q 法、 $d-q$ 法等,文献[13]设计与各次谐波同频率的正余弦信号,文献[14]改进了 i_p-i_q 法的变换矩阵,这些方法实质上是将检测到的指定次谐波电流的正序、负序和零序分量相加得到该次谐波电流整体,并未对其进行有功/无功分量细分。

鉴于此,本文对传统 i_p-i_q 检测法进行了改进,提出了一种谐波多功能精细检测方法。结合瞬时无功功率理论进一步指出了谐波电流有功/无功分量的定义,建立了指定次谐波正/负序分量与倍频值的关系,设计了相位合成补偿的方法准确获取 Park 变换相角。MATLAB 仿真分析结果表明了本文方法相比于传统 i_p-i_q 法检测速度快、精度高、功能性强,且可以实现复杂电网环境下指定次谐波电流各组成分量的精细化检测。

1 负载基波和任意次谐波的精细化检测方法

1.1 基波电流分量的精细化检测思路

在三相不平衡系统中,根据对称分量法,三相电压和三相电流瞬时值在三相静止坐标系下可分解为正序、负序和零序信号,电力系统中常见三相三线制和三相四线制的星形接法,此时便不存在零序分量^[5]。本文以三相三线制系统的正序和负序信号为主进行分析,零序不作考虑。考虑 PCC 点注入电网的三相负载电流信号 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} ,其可以表示成工频基波和各次谐波正、负序分量的组合,如式(1)所示^[15]。

$$\begin{cases} i_{La} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} [I_n^+ \cos(n\omega t + \varphi_n^+) + I_n^- \cos(n\omega t + \varphi_n^-)] \\ i_{Lb} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[I_n^+ \cos(n\omega t + \varphi_n^+ - \frac{2}{3}\pi) + \right. \\ \quad \left. I_n^- \cos(n\omega t + \varphi_n^- + \frac{2}{3}\pi) \right] \\ i_{Lc} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[I_n^+ \cos(n\omega t + \varphi_n^+ + \frac{2}{3}\pi) + \right. \\ \quad \left. I_n^- \cos(n\omega t + \varphi_n^- - \frac{2}{3}\pi) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表示各次谐波电流的对应频次; I_n^+ 和 I_n^- 分别对应

第 n 次负载谐波电流中的正序和负序分量的幅值; φ_n^+ 和 φ_n^- 分别对应第 n 次负载谐波电流的正序和负序分量的初相角; ω 为电网电压基波角频率。

根据 i_p-i_q 检测法,将三相负载电流依次经过 Clark 变换和 Park 变换,变换到两相 dq 旋转坐标系下,如式(2)所示,变换结果如式(3)所示。本文使用的 Clark 变换和 Park 变换矩阵分别如式(4)和(5)所示。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = [C_{dq}] [C_{32}] \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-I_n^+ \sin((n-1)\omega t + \varphi_n^-) + \\ I_n \sin((n+1)\omega t + \varphi_n^+)] \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-I_n^+ \cos((n-1)\omega t + \varphi_n^-) - \\ I_n \cos((n+1)\omega t + \varphi_n^+)] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_{dq} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3),考虑到 n 的取值并不会使基波正/负序分量的倍频值出现同时为 0 的情况,分别令 n 对应基波倍频值取 1 和 -1,可获得式(6)和(7),将其进行低通滤波,基波工频分量将变为直流分量,再经过 Park 和 Clark 反变换即可实现基波正/负序和有功/无功分量的选择性提取。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_1^+ \sin(\varphi_1^+) + I_1^- \sin(2\omega t + \varphi_1^-) \\ -I_1^+ \cos(\varphi_1^+) - I_1^- \cos(2\omega t + \varphi_1^-) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_1^+ \sin(-2\omega t + \varphi_1^-) + I_1^- \sin(\varphi_1^-) \\ -I_1^+ \cos(-2\omega t + \varphi_1^-) - I_1^- \cos(\varphi_1^-) \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此当 $n=1$ 时,将 i_d 和 i_q 信号分别经过低通滤波,即可获得负载电流中的正序基波 dq 直流分量 i_{p1}^+ 和 i_{q1}^+ ,分别对应基波正序有功分量和基波正序无功分量,如式(8)所示;当 $n=-1$ 时,同理可以获得基波负序有功/无功直流分量 i_{p1}^- 和 i_{q1}^- ,如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{p1}^+ \\ i_{q1}^+ \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_1^- \sin(\varphi_1^+) \\ -I_1^+ \cos(\varphi_1^-) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} i_{p1}^- \\ i_{q1}^- \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1^- \sin(\varphi_1^-) \\ -I_1^- \cos(\varphi_1^-) \end{bmatrix} \quad (9)$$

对提取到的基波正序有功/无功直流分量分别进行反变换即可分别获得 abc 坐标系下的基波正序有功分量和基波正序无功分量,将基波负序有功/无功直流分量一同进行反变换即可获得基波负序不平衡电流分量。

1.2 基波和任意次谐波电流通用精细检测方法

根据以上对基波检测方法的改进及计算分析,考虑对

任意次谐波电流的各个分量的提取,并设计基波和任意次谐波各分量的通用检测方法。根据瞬时无功功率理论,谐波电流矢量在同频次的谐波电压矢量上的投影,即是谐波电流的有功分量。令 k 为待求的谐波次数, k 为正整数。当第 k 次电网谐波电压分量与 dq 旋转坐标系下的 d 轴重合时,第 k 次谐波电流分量在 d 轴的分量与第 k 次电网谐波电压分量重合,此时电流 d 轴分量 i_{kd} 即对应第 k 次谐波电流的有功分量,电流 q 轴分量 i_{kq} 对应第 k 次谐波电流无功分量。

当电网电压不平衡且存在背景谐波时,第 k 次谐波电压分量往往不与 d 轴重合,做出第 k 次谐波电流分量 i_{Lhk} 及其对应电网侧的第 k 次谐波电压分量 u_k 的矢量图,如图 1 所示, φ_{uk} 为第 k 次电网侧谐波电压的初相位角, i_{LhkP} 和 i_{LhkQ} 分别表示坐标系旋转后对应的第 k 次谐波电流有功分量和无功分量。此时若依据传统瞬时无功功率理论下的 i_p-i_q 法,以 d 轴、 q 轴谐波电流分量作为谐波电流的有功/无功分量进行检测已不够准确。

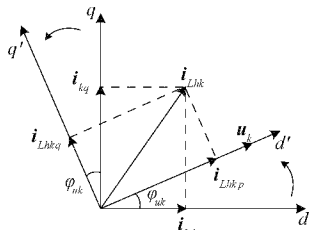


图 1 第 k 次谐波电压、电流 dq 坐标分量矢量图

根据同步坐标变换法,此处对 Park 变换进行改进,使原 $d'q'$ 坐标系下的电压电流矢量保持相对位置不变,向 d 轴方向旋转角度 φ_{uk} ,也即是说将 dq 坐标系旋转角度 φ_{uk} ,从而使第 k 次谐波电压分量矢量与新 dq 坐标系下的 d 轴重合,进而可以获得对应第 k 次谐波电流的有功分量和无功分量。

改进后的三相谐波电流变换公式如式(10)所示,变换后所求得的谐波电流在新 dq 坐标系下的分量 i'_d 和 i'_q 如式(11)所示,且分别对应 i_{LhkP} 和 i_{LhkQ} ,此时 C'_{dq} 为对应改进 Park 变换矩阵,如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = [C'_{dq}][C_{32}] \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-I_n \sin((n-k)\omega t + \varphi_n^+ - \varphi_{uk}^+) + I_n \sin((n+k)\omega t + \varphi_n^- + \varphi_{uk}^-)] \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-I_n \cos((n-k)\omega t + \varphi_n^+ - \varphi_{uk}^+) - I_n \cos((n+k)\omega t + \varphi_n^- + \varphi_{uk}^-)] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C'_{dq} = \begin{bmatrix} \sin(k\omega t + \varphi_{uk}) & -\cos(k\omega t + \varphi_{uk}) \\ -\cos(k\omega t + \varphi_{uk}) & -\sin(k\omega t + \varphi_{uk}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

当基频倍数 n 依次等于待提取的谐波电流次数 k 的 ± 1 倍,即分别令 $n=k$ 和 $n=-k$,如式(13)和(14)所示, φ_{uk}^+ 和 φ_{uk}^- 分别对应求取的 PCC 点电网侧第 k 次谐波电压正序和负序分量的初相位角。

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_k^+ \sin(\varphi_k^+ - \varphi_{uk}^+) + I_k^- \sin(2k\omega t + \varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \\ -I_k^+ \cos(\varphi_k^+ - \varphi_{uk}^+) - I_k^- \cos(2k\omega t + \varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_k^+ \sin(-2k\omega t + \varphi_k^- - \varphi_{uk}^-) + I_k^- \sin(\varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \\ -I_k^- \cos(-2k\omega t + \varphi_k^- - \varphi_{uk}^-) - I_k^+ \cos(\varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \end{bmatrix} \quad (14)$$

再通过低通滤波器即可获得第 k 次谐波电流对应的正、负序各直流分量,即可以获得第 k 次谐波电流的正序有功/无功直流分量 i_{kp}^+ 和 i_{kq}^+ ,如式(15)所示,以及负序有功、无功直流分量 i_{kp}^- 和 i_{kq}^- ,如式(16)所示。通过 Park 和 Clark 反变换即可进一步提取出该次谐波电流在 abc 坐标系下的三相谐波电流各交流分量。同理当 $k=\pm 1$ 时,对应畸变电网电压下的负载基波正序有功/无功分量和负序不平衡分量的提取。

$$\begin{bmatrix} i_{kp}^+ \\ i_{kq}^+ \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} -I_k^+ \sin(\varphi_k^+ - \varphi_{uk}^+) \\ -I_k^+ \cos(\varphi_k^+ - \varphi_{uk}^+) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{kp}^- \\ i_{kq}^- \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_k^- \sin(\varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \\ -I_k^- \cos(\varphi_k^- + \varphi_{uk}^-) \end{bmatrix} \quad (16)$$

当电网电压发生畸变时,传统检测方法不可避免地会存在误差,改进后检测方法的变换矩阵中只需要取 $\sin(k\omega t + \varphi_{uk})$ 和 $\cos(k\omega t + \varphi_{uk})$ 参与运算,基波和各次谐波的频率通过单锁相环结合倍频器获取,电网侧谐波电压初相位 φ_{uk} 通过计算准确获得,检测结果具有较高的精度,而且还实现了对基波和任意次谐波的 4 种组成成分的精细化检测,具有更强的功能性和灵活性。

2 电网侧谐波电压初相位的提取

为了保证各次谐波电流在 d 轴投影分量为对应次谐波电流的有功分量,在 q 轴的投影分量为对应次谐波电流的无功分量,需要保持谐波电压、电流矢量位置不变,改进 Park 变换矩阵,令 dq 坐标系旋转各对应 k 次电网侧谐波电压的初相位角 φ_{uk} 。

对于电网侧第 k 次谐波电压初相位 φ_{uk} 的获取,与 i_p-i_q 检测法一致,需要先进行式(2)和(3)相似的 Clark 变换和 Park 变换,如式(17)所示,再通过低通滤波获得第 k 次谐波电压正/负序分量分别在 dq 轴上的对应投影分量 u_{kd}^+ 和 u_{kq}^+ ,然后进一步通过式(18)提取第 k 次谐波电压正/负序分量的初相位角 φ_{uk}^+ 和 φ_{uk}^- ,分母为 0 时使用较小的值代替 0 值。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = [C_{dq-k}][C_{32}] \begin{bmatrix} u_{ssa} \\ u_{ssb} \\ u_{ssc} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \varphi_{uk} = \arctan\left(\frac{u_{ku}}{u_{kd}}\right) \\ \varphi_{ik} = \arctan\left(\frac{u_{kq}}{u_{kd}}\right) \end{cases} \quad (18)$$

Park 变换矩阵 C_{dq-k} 如式(19)所示。式(17)中, u_{ssa} 、 u_{ssb} 、 u_{ssc} 表示 PCC 点的电网侧电压信号,当电网侧的线路阻抗非常小且可以忽略时,PCC 处的电网侧电压信号与电网的电源电压信号 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 相同。

$$C_{dq-k} = \begin{bmatrix} \sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & -\sin(k\omega t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 多功能检测电路的设计

考虑到电网电压存在频率波动的情况,当频率波动偏差与工频相比较小时,例如 GB/T 15945-2008 相关频率偏差标准规定的不超过 ± 0.2 Hz,由于低通滤波器截止频率的存在,其提取到的仍是一个频率非常小的交流分量,即可以近似为一个直流分量^[16]。此时通过设置固定的基波频率代替锁相环可以提高检测速度,但是当电网频率波动较大时,为了进一步提高检测算法的抗频率干扰性,就需要使用锁相环对电网基波频率进行检测及锁定。

由于锁相环一般只能对一种输入信号进行频率和相位的锁定,当需要进行多次谐波分量检测时,会由于锁相环的多次使用增加电路设计和调试的难度,且其本身容易受到信号干扰导致锁相存在误差。结合本文所提方法,使用单锁相环进行电网电压基频检测,然后通过倍频器和反相器生成基频的各个正负倍频值,并建立正余弦表,不仅有利于谐波电流多次检测及重复利用,且节省了多锁相环的投入成本。

本文改进的任意第 k 次谐波电流有功/无功分量分序精细检测电路原理如图 2 所示,其对于负载基波电流各个分量的提取同样适用。

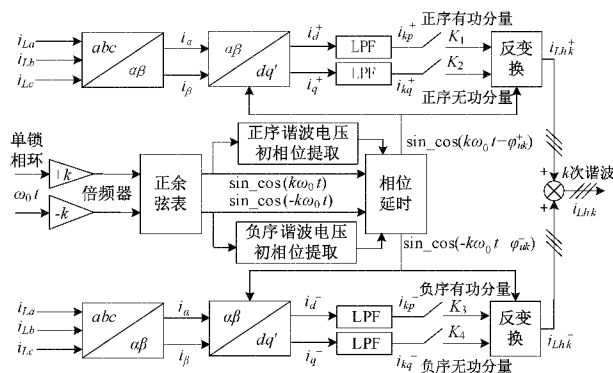


图 2 任意第 k 次谐波电流各分量精细检测原理

对直流分量控制开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 进行选择性开

断,可以实现第 k 次谐波的各个分量的选择性精细检测,具体如表 1 所示,对号表示开关闭合状态。

表 1 第 k 次谐波检测分量与控制开关的关系

k 次谐波检测分量	K_1	K_2	K_3	K_4
k 次总谐波分量	✓	✓	✓	✓
k 次正序分量	✓	✓		
k 次负序分量			✓	✓
k 次有功分量	✓		✓	
k 次无功分量		✓		✓
k 次正序有功分量	✓			
k 次正序无功分量		✓		
k 次负序有功分量			✓	
k 次负序无功分量				✓

在传统谐波电流检测方法中,低通滤波器模块一般都是采用的 20~100 Hz 的 2~5 阶 Butterworth 低通滤波器,其由于自身特性,存在相位延时和幅值衰减的问题。考虑到在低通滤波器过滤直流分量之前,基于积分均值思想, dq 分量中的交流量在一个工频周期内的平均值为 0,而直流量的平均值与该直流量自身的值相等,因此本文提供一种基于 dq 坐标系的直流分量积分提取法来代替传统的低通滤波器,如图 3 所示。一个周期内的积分数量由 PWM 采样频率确定,该方法相比传统的低通滤波器可以有效减少谐波指令信号的幅值衰减和相位延时问题。

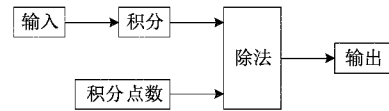


图 3 基于直流分量积分提取的低通滤波器原理

4 仿真分析

使用 MATLAB/Simulink 搭建并联型有源滤波器(SAPF)、三相三线制不平衡畸变电压源和含变压器的三相桥式不可控整流对称非线性负载的仿真模型。设置电网线电压为 380 V,频率为 50 Hz,电网侧线路阻抗为 0.1 Ω ,采样时间为 1×10^{-5} s;SAPF 直流侧电压参考值为 800 V,直流侧电容值为 4 700 μ F,并网电感和寄生电阻分别为 0.4 mH 和 2 Ω ;负载阻感值为 $10 + j(2e-3) \Omega$ 。

4.1 负载基波电流分量的检测仿真对比

使用两种检测方法进行对比分析,方法 1 为传统的 i_p-i_q 检测法,方法 2 为本文所提方法,两种方法下的 SAPF 电流跟踪控制结构参数均相同。当电网电压不平衡且存在背景谐波时,检测到 PCC 处的电网侧电压波形如图 4 所示。

分别使用方法 1 和方法 2 对非线性负载的基波直流分量进行检测,检测结果如图 5 所示。可知方法 2 检测速度更快,检测结果在一个工频周期左右即达到稳定状态。

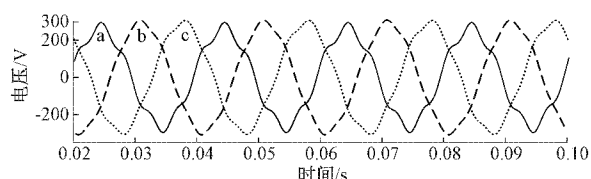


图 4 三相不平衡电网侧电压畸变波形

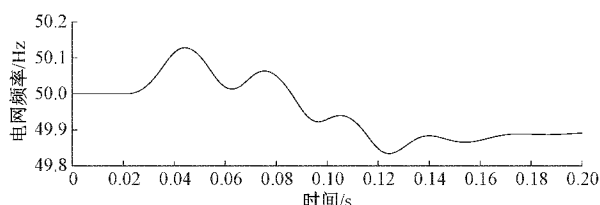


图 7 电网频率波动曲线

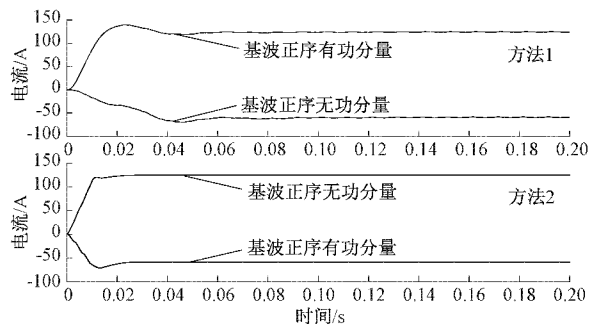


图 5 方法 1、2 对负载基波有功/无功直流分量的检测

使用负载电流减去提取到的整个基波分量即可获得负载注入电网的总谐波分量,分别对两种方法检测到的总谐波电流进行补偿,补偿后的网侧馈线电流经过 FFT 分析如图 6 所示。基波电流理论真实幅值 139.1 A 与方法 2 检测结果一致,方法 2 相比方法 1 具有更高的谐波检测补偿精度。

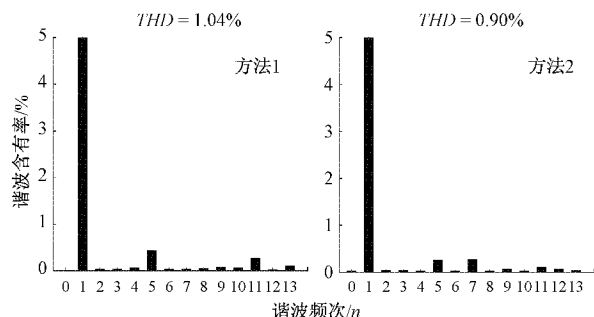


图 6 方法 1、2 补偿后的网侧馈线电流畸变率柱状图

为验证本文方法的抗频率干扰性,从 0.02 s 开始持续对电网频率施加 ± 0.2 Hz 以内的扰动,如图 7 所示。在 0.04 s 投入本文方法下的 SAPF 进行补偿,补偿后网侧馈线电流如图 8 所示。稳定后的网侧馈线电流波形几乎没有波动,始终接近于理想正弦波,FFT 分析得到网侧馈线电流畸变率一直保持在 1.2% 以下,本文方法具有较强的抗电网频率干扰性。方法 2 相比方法 1 在功能性上更强,还能实现对负载基波负序不平衡电流的检测,如图 9 所示。

4.2 复杂电网工况下的负载指定次谐波电流精细检测及成分分析

以非线性负载电流中常见的 5 次和 7 次谐波电流为例,与理想电网情况不同,在复杂电网情况下,负载谐波电流往往表现为不平衡分量。方法 1 中使用锁相环跟踪电网

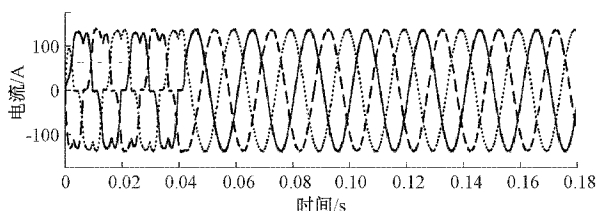


图 8 电网频率波动下的网侧馈线电流补偿后的曲线

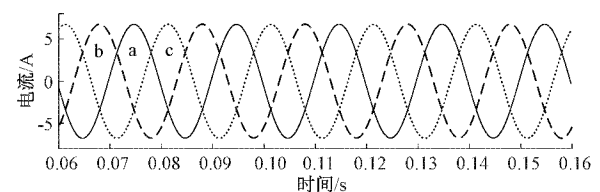


图 9 方法 2 对负载基波负序不平衡电流的检测

A 相正序电压初相位,当电网电压不平衡时,方法 1 并不能实现对非线性负载指定次谐波的准确精细检测。电流分量有效值记为 RMS ,网侧馈线电流中 5 次和 7 次谐波电流含有率分别记为 THD_5 和 THD_7 。

1) 本文方法对负载 5 次谐波的精细检测

给定电网背景谐波中的 5 次谐波畸变电压初相位为 40° ,负序幅值设置为 19.0 V,正序幅值设置为 3.8 V。检测到 5 次谐波电流波形如图 10 所示,可见其含有一定的不平衡分量,且已经检测到 5 次谐波电流中负序分量含量相比正序分量更高。

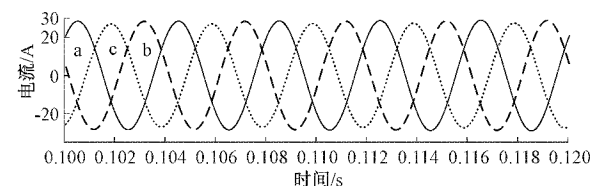


图 10 负载 5 次谐波电流检测波形

保持电网侧线路阻抗不变,进一步对负载 5 次谐波电流负序分量进行有功/无功分量分解检测,结果如图 11 所示。对检测到的负载 5 次谐波电流各个分量分别进行单独补偿和 FFT 分析,数据记录如表 2 所示,可知 5 次谐波电流的主要成分为 5 次负序有功电流分量。

由图 11 和表 2 可知,负载 5 次谐波电压负序分量和 5 次谐波电流负序有功分量具有相同的相序和相位,负载对该次谐波的负序有功分量呈线性电阻性,5 次谐波电流负

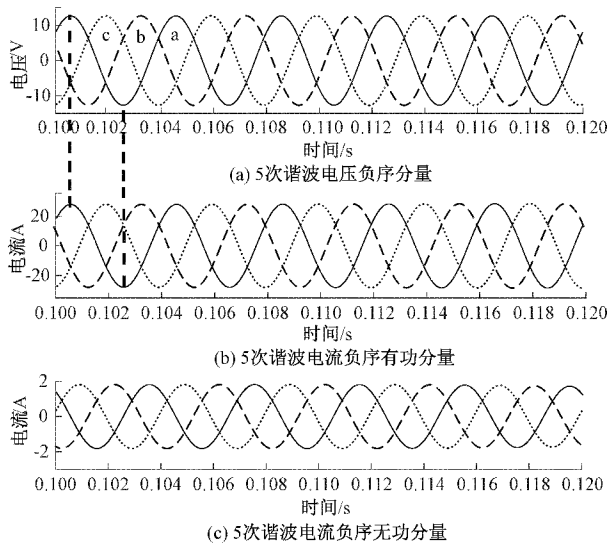


图 11 负载 5 次谐波电压、电流负序分量精细检测

表 2 负载 5 次谐波电流各分量的检测补偿效果对比

检测及补偿分量	RMS/A	THD ₅ /%	
		补偿前	补偿后
负序有功分量	20.20		0.51
负序无功分量	1.08		19.89
负序分量	20.21	20.86	0.59
正序分量	0.67		19.56
5 次谐波分量	19.62		0.57

序有功/无功分量的谐波责任同时来自于电网背景谐波和非线性负载,由于负载为对称负载,5 次谐波电流正序分量的谐波责任则全部来自于电网背景谐波。因此在对负载 5 次谐波电流进行治理时,用户侧只需要考虑补偿其负序有功分量,相比于直接全部补偿,可以使 APF 有效补偿容量提高 0.58 A,使 5 次谐波电流含有率降低 0.06%。

2) 本文方法对负载 7 次谐波的精细检测

给定电网电压背景谐波中的 7 次谐波畸变电压初相位为 -35°,正序分量和负序分量幅值都为 11.4 V。使用本文方法对 7 次谐波电流的检测曲线如图 12 所示,检测到 7 次谐波电流正序分量和负序分量含量相差较小,因此进行分序精细检测。

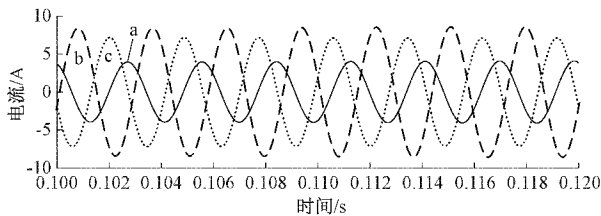


图 12 负载 7 次谐波电流检测波形

保持电网侧线路阻抗不变,对负载 7 次谐波电压分量分序检测和 7 次谐波电流各组成分量检测结果如图 13 和

14 所示。对检测到的非线性负载 7 次谐波电流各个分量分别进行单独补偿,并作 FFT 分析,数据记录如表 3 所示,可知 7 次谐波电流的主要成分是 7 次正序无功电流分量。

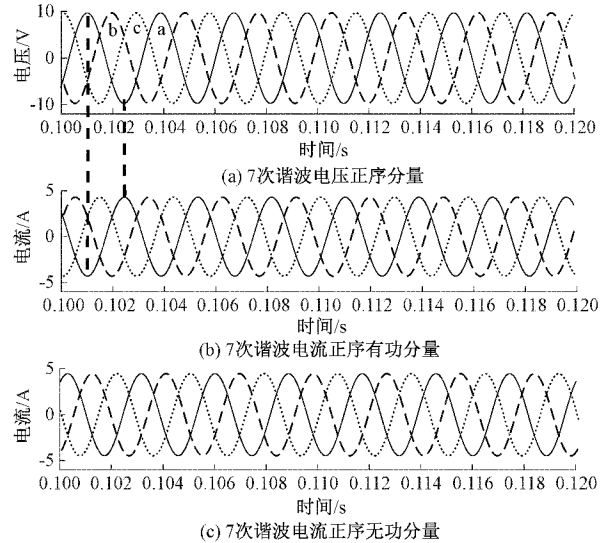


图 13 负载 7 次谐波电压、电流正序分量精细检测

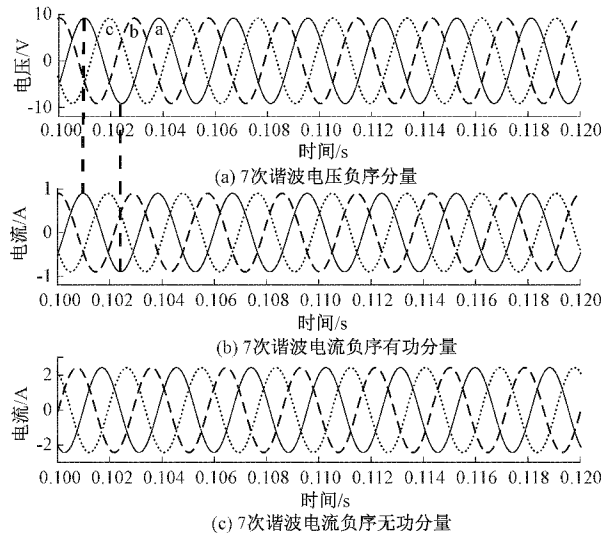


图 14 负载 7 次谐波电压、电流负序分量精细检测

表 3 负载 7 次谐波电流各分量的检测补偿效果对比

检测及补偿分量	RMS/A	THD ₇ /%	
		补偿前	补偿后
负序有功分量	0.617		3.04
负序无功分量	1.716		4.10
正序有功分量	3.022		1.92
正序无功分量	3.310	2.82	2.59
负序分量	1.840		4.52
正序分量	4.371		1.69
7 次谐波分量	2.701		0.25

结合图 13、14 和表 3 可知,7 次谐波电流正序有功分量和 7 次谐波电压正序分量相位相差 180° ,说明 7 次谐波的正序有功分量会注入电网造成污染;7 次谐波电流负序有功分量与 7 次谐波电压负序分量具有相同的相序和相位,说明 7 次谐波负序有功分量与负载电阻为线性关系,功率方向为电网流向负载,被负载消耗,不会流入电网造成污染。

由于负载为对称负载,7 次谐波电流分量的负序分量责任全部来自于电网,7 次谐波电流分量的正序分量责任则同时来自于电网和非线性负载。因此,用户侧在补偿时只需要对 7 次谐波电流的正序分量进行补偿,电网侧只需补偿 7 次谐波电流的负序无功分量,7 次谐波电流的负序有功分量不会对电网造成污染,可以选择忽略补偿。若需要实现 PCC 处网侧馈线电流畸变率最优,则需要对 7 次谐波电流全补偿。

复杂电网环境下的负载 5、7 次谐波电流精细检测补偿后的网侧馈线电流各次谐波含有率情况如图 15 所示,实现了较好的选择性谐波检测补偿效果。同样对其他频次谐波电流进行精细分析,可以有效优化 Δ PF 等谐波补偿装置的补偿容量,实现各指定次谐波的精检测及优化补偿。

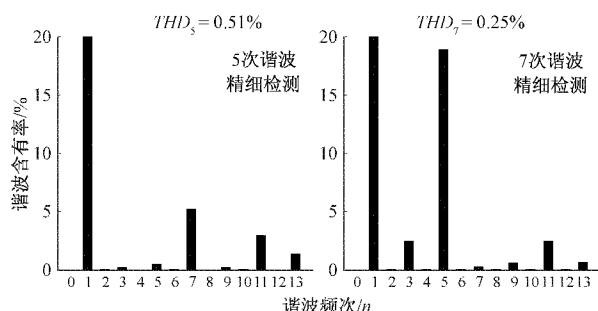


图 15 5、7 次谐波选择性精细检测补偿后的网侧馈线电流各次谐波含有率柱状图

4.3 负载高频次谐波电流分量检测仿真

设电网背景谐波中不含 11、13、17、19 等高次谐波,负载对应高次谐波表现为对称分量。使用本文方法对其进行检测,并将幅值检测值与 FFT 计算所得真实值对比,结果如图 16 和表 4 所示,可知本文方法对高次谐波的检测也具有较高的准确度。

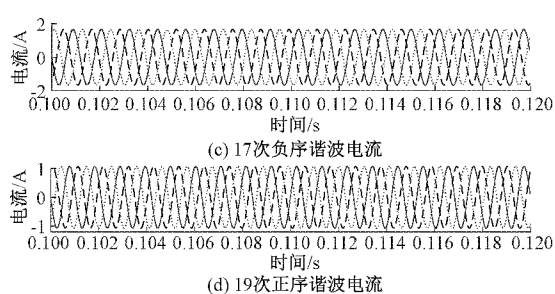
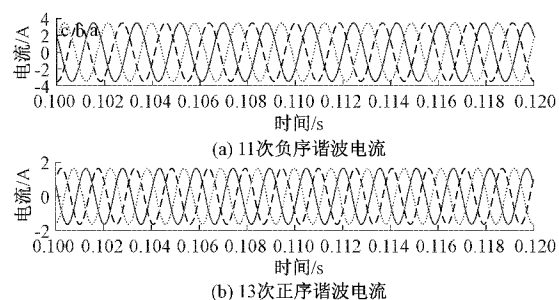


图 16 负载高频次谐波电流检测波形

表 4 负载高次谐波电流幅值检测对比

谐波电流频次	真实值/A	检测值/A	相对误差/%
11	3.490	3.490	0
13	1.644	1.643	-0.000 608 2
17	1.658	1.659	0.000 603 1
19	1.069	1.072	0.002 806 0

5 结 论

本文提出的负载基波和任意次谐波电流多功能精细检测方法,实现了电网电压不平衡和背景谐波畸变情况下的谐波分量精细检测。通过详细仿真分析,验证了本文方法具有如下特点。

- 1) 检测精度和细粒度高,检测结构具有较高的通用性和易扩展性。
- 2) 给出了各次谐波有功/无功分量的定义,可实现任意次谐波各组成成分的灵活精细检测,改善了传统基于瞬时无功率理论的谐波检测方法的检测功能单一性。
- 3) 对于电网系统侧和用户侧的谐波责任划分具有指导意义,对于实现小容量谐波补偿装置对特定次谐波的选择性精细补偿具有一定的工程价值。

参考文献

- [1] 王宁,田书娅,贾清泉,等. 主动配电网谐波治理设备的综合优化配置方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 91-98.
- [2] 魏学良,程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 73-76.
- [3] 陈乐鹏,谭晓东. i_p-i_q 的改进算法与小波变换谐波检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 69-74.
- [4] 赵鑫涛,裴智峰,于品荣,等. 并联型有源滤波器精细化补偿方案[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1290-1299.
- [5] 胡增见,桂宁,包晓安,等. 基于相位补偿的任意次谐波有功/无功电流的检测[J]. 浙江理工大学学报, 2016, 35(4): 570-576.
- [6] 胡智宏,吕志斌,李少轩,等. 基于瞬时无功率理论谐波检测算法的优化[J]. 电工技术, 2019(5): 26-29.

- [7] 王子绩, 孟鑫, 张彦兵, 等. 基于瞬时无功功率理论的新型谐波检测算法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(4): 9-13.
- [8] 张敢, 施火泉, 邹嘉丰. 改进型 i_p-i_q 电网谐波电流检测算法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 37-41.
- [9] 曹雷, 张立广, 贾红敏. 基于自适应滤波器的电力谐波检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(16): 138-142.
- [10] 刘继权, 张茂松. 基于瞬时无功功率理论的新型谐波检测法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(10): 29-32, 51.
- [11] 慕小斌, 王久和, 孙凯. 非正弦不平衡电流全参量的检测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 160-165, 181.
- [12] 杜少通, 谭兴国, 冯高明. 一种适用于多样化补偿的谐波检测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 110-116.
- [13] 吕晓琴, 章春军, 张秀峰. 三相不对称系统任意次谐波电流检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 93-96.
- [14] 李金, 张喜铭, 时伯年, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 92-96, 106.
- [15] 任雪, 郭凤仪, 朱连勇, 等. 基于瞬时无功功率理论的串联型故障电弧检测方法[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 267-273.
- [16] 艾永乐, 许增渊, 李向前, 等. 基于 i_p-i_q 改进的谐波和有功电流检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 172-178.

作者简介

王一帆, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电、电能质量控制技术。

E-mail: wangyifan_csu@163.com

裘智峰, 副教授, 主要研究方向为新能源、人工智能在能源系统的应用。

E-mail: zhifeng.qiu@csu.edu.cn