

DOI: 10.7667/PSPC170209

一种改进的方均根值谐波检测方法的研究

苗长新, 韦彬, 晏夏瑜, 史干东, 师珂

(中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对传统检测方法不能有效应用于电网畸变和频率波动的缺陷, 提出了一种改进的无锁相环的方均根值谐波检测方法。该方法采用基波正序提取环节代替锁相环, 得到与基波电压正序分量同步的信号, 进而检测谐波分量。将其与传统 i_p-i_q 检测法相比, 该方法响应速度快, 且可以有效地工作在电网恶劣的情况下。仿真和实验结果表明, 将其应用于 APF 的谐波检测环节, 电网侧谐波的补偿达到了预期的效果。

关键词: 谐波检测; 有源电力滤波器; 无锁相环; 基波正序

Research on an improved root-mean-square harmonic detection method

MIAO Changxin, WEI Bin, YAN Xiayu, SHI Gandong, SHI Ke

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the deficiencies of traditional detection methods under distorted power grid voltage and fluctuant frequency, an improved Root-Mean-Square (RMS) harmonic detection method without Phase Locked Loop (PLL) is proposed. This method uses the fundamental positive sequence extraction segments instead of phase locked loop, so as to obtain the signals synchronized with the fundamental positive sequence component and then detect the harmonic component. Compared with the traditional i_p-i_q detection method, this method can be used effectively at severe condition of power grid with fast response speed. Simulation and experimental results verify that the compensation of power grid side harmonic can achieve the desired results when the method is used in the active power filter.

This work is supported by the Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110095110014) and Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. 311021).

Key words: harmonic detection; active power filter; without phase locked loop; fundamental positive sequence

0 引言

随着电力电子设备的广泛使用, 电网电流畸变的问题显得愈发突出。基于改善电能质量的目的, 有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)被广泛使用。而谐波电流检测精度对系统谐波电流补偿效果有很大影响, 因此快速准确地检测谐波分量是 APF 有效工作的关键技术之一^[1-3]。

目前, 常用的谐波检测方法主要有基于瞬时无功理论的 $P-Q$ 法和 i_p-i_q 法^[4-5], 但需要进行两次坐标变换, 并且当电网电压不对称或发生畸变时, 检测精度会降低^[6-8]。文献[9]提到快速傅里叶变换(FFT)

及离散傅里叶变换(DFT)的方法, 该方法检测精度高, 但是对计算量和存储空间的要求较高, 因此实时性得不到保障^[10]。此外, 近些年也有专家学者提出小波变换及神经网络的检测方法^[11-13], 但由于各种问题, 目前很少应用在实际工程中。

相对于前面所叙述的检测方法, 文献[14]提出的基于方均根值的谐波检测方法具有诸多优点, 如计算时间短、节省数据存储空间和省去坐标变换等。传统的方均根值谐波检测法采用锁相环(Phase Locked Loop, PLL)来获取电压相位信息^[15], 在三相电压对称时能有效地提取谐波指令电流信号, 然而在电网电压畸变或频率波动时, PLL 无法得到准确的电压相位信息, 导致谐波检测的精度降低^[16]。

针对上述传统方均根值法的不足, 本文研究了一种改进无锁相环的方均根值谐波检测方法。该方法采用基波正序电压提取环节代替锁相环, 通过采

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110095110014); 教育部科学技术研究重大项目资助(311021)

集电网电压，得到与基波正序同频同相的三相电压的相位信号，并可以直接用于谐波指令信号的计算。将该方法应用在 APF 中，仿真和实验表明，与传统的方法进行对比，本文提出的方法响应速度更快，并且在电压环境恶劣的情况下也有效地计算出谐波指令电流。

1 方均根值谐波检测原理分析

方均根值法的具体理论推导过程见文献[14]，现对其检测原理进行说明。图 1 为方均根值法的原理框图。其中： e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电压；PLL 为锁相环；RMS 为有效值计算模块； i_{aL} 、 i_{bL} 、 i_{cL} 为三相负载电流； I 为负载基波电流的有效值； i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} 为基波正序有功电流； i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 为补偿指令电流。

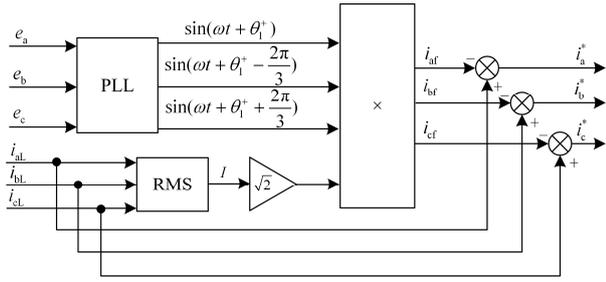


图 1 传统方均根值检测法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional RMS detection method

以 A 相为例，利用负载电流的有效值 $RMS[i_{aL}]$ 代替基波电流的有效值 I ，最终构造的负载基波电流为

$$i_{af} = \sqrt{2}RMS[i_{aL}] \sin \omega t \quad (1)$$

但这种近似的处理在负载电流存在畸变时，恒有： $RMS[i_{aL}] \geq I$ 。令误差电流为 I_{error} ，即

$$I_{error} = RMS[i_{aL}] - I \quad (2)$$

式(2)代入式(1)得

$$i_{af} = \sqrt{2}I \sin \omega t + \sqrt{2}I_{error} \sin \omega t \quad (3)$$

由式(3)可知，影响基波正序电流计算的误差存在于负载电流的有效值与实际负载基波电流的差值 I_{error} 以及由锁相环得到的电压相位信息 $\sin \omega t$ 。由于 $I_{error} \geq 0$ ，在不对直流侧电压控制时，方均根值检测法会导致直流侧电压的无限上升^[17]，因此文献[14]提出将直流侧电压的控制量 Δi_p^* 叠加在由负载电流有效值构成的基波电流通路上，实现对误差的 I_{error} 完全补偿。因此，在电网电压正常的情况下，方均根值谐波检测法是可以正常工作的。

但是在电网电压不对称或发生畸变时，锁相环

检测到的参考信号并不是基波电压正序分量，而是由电网电压的正序、负序和零序分量共同作用的结果，将导致实际检测到的电压相位和电压基波正序分量的相位存在一个相位差 $\Delta\theta$ ，这使得谐波和无功电流的检测精度受到很大影响。

2 改进无锁相环方均根值法的基本原理

由上文分析可知，在三相电压不对称和畸变的情况下，传统的方均根值法的检测精度会受到影响。所以，本文研究了一种改进无锁相环的方均根值谐波检测方法。该方法由基波正序电压提取环节代替锁相环^[18]，避免锁相环在电网恶劣情况下的误差，其原理如图 2 所示。

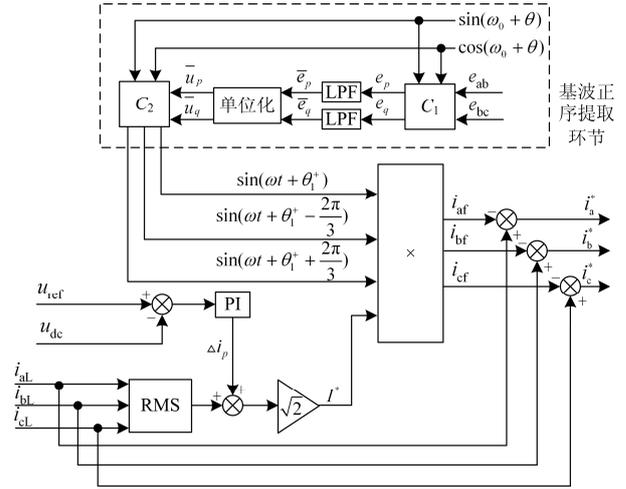


图 2 改进方均根值检测法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of improved RMS detection method

图 2 中， $\cos(\omega_0 + \theta)$ 为信号发生器产生的正余弦信号。 $\omega_0 = 100\pi$ ， θ 为任意值，即产生的是和电网同频的正余弦信号。矩阵 C_1 和 C_2 分别为

$$C_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \theta) & \sin(\omega_0 t + \theta - \frac{\pi}{3}) \\ \cos(\omega_0 t + \theta) & \cos(\omega_0 t + \theta - \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \theta) & \cos(\omega_0 t + \theta) \\ \sin(\omega_0 t + \theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_0 t + \theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_0 t + \theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_0 t + \theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

C_1 和 C_2 中的各元素均可由与电网同频的正余弦信号的三角函数计算得到。

电网电压畸变时，由对称分量法可得：

$$\begin{cases} e_a = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \sin(n\omega t + \theta_n^+) + \\ E_n^- \sin(n\omega t + \theta_n^-) + e^0 \end{matrix} \right] \\ e_b = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \sin(n\omega t + \theta_n^+ - \frac{2\pi}{3}) + \\ E_n^- \sin(n\omega t + \theta_n^- + \frac{2\pi}{3}) + e^0 \end{matrix} \right] \\ e_c = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \sin(n\omega t + \theta_n^+ + \frac{2\pi}{3}) + \\ E_n^- \sin(n\omega t + \theta_n^- - \frac{2\pi}{3}) + e^0 \end{matrix} \right] \end{cases} \quad (6)$$

因为两路线电压即可表达三相电压, 所以在提取基波正序信号时, 可以只采集两路信号。由式(6)得:

$$\begin{cases} e_{ab} = e_a - e_b = \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \sin(n\omega t + \theta_n^+ + \frac{\pi}{6}) + \\ E_n^- \sin(n\omega t + \theta_n^- - \frac{\pi}{6}) \end{matrix} \right] \\ e_{bc} = e_b - e_c = \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} -E_n^+ \cos(n\omega t + \theta_n^+) + \\ E_n^- \cos(n\omega t + \theta_n^-) \end{matrix} \right] \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)和 C_1 可得:

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \end{bmatrix} = C_1 \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \end{bmatrix} = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \cos(n\omega t - \omega_0 t + \theta_n^+ - \theta) - \\ E_n^- \cos(n\omega t + \omega_0 t + \theta_n^- + \theta) \end{matrix} \right] \\ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} E_n^+ \sin(n\omega t - \omega_0 t + \theta_n^+ - \theta) + \\ E_n^- \sin(n\omega t + \omega_0 t + \theta_n^- + \theta) \end{matrix} \right] \end{cases} \quad (8)$$

e_p 和 e_q 经低通滤波器后, 由于电网频率允许偏差范围在工频内的 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ Hz, 则 $\omega \approx \omega_0$, 故只有 $n=1$ 时的正序分量可以保留下来, 即

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_p \\ \bar{e}_q \end{bmatrix} = \begin{cases} E_1^+ \cos[(\omega - \omega_0)t + \theta_1^+ - \theta] \\ E_1^+ \sin[(\omega - \omega_0)t + \theta_1^+ - \theta] \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行单位化, 得:

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} = \begin{cases} \cos[(\omega - \omega_0)t + \theta_1^+ - \theta] \\ \sin[(\omega - \omega_0)t + \theta_1^+ - \theta] \end{cases} \quad (10)$$

式(10)与矩阵 C_2 相乘, 通过三角函数变换, 便可以消去任意初相角 θ 和参考角频率 ω_0 的影响, 得到三相基波正序信号为

$$\begin{bmatrix} u_{al}^+ \\ u_{bl}^+ \\ u_{cl}^+ \end{bmatrix} = C_2 \begin{bmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_1^+) \\ \sin(\omega t + \theta_1^+ - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \theta_1^+ + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

由上述推导过程可以看出, 在三相电网发生畸变以及频率波动的情况下, 基波正序提取环节能有效地得到基波正序电压的频率和相位信息。将该环

节代替锁相环, 应用到方均根值的指令电流获取, 提高了检测精度, 减少锁相环误差的影响。

3 仿真实验

为了验证所述方法的正确性, 本文采用 Matlab/Simulink 进行仿真实验, 并与传统的 i_p-i_q 法进行了对比。仿真参数如下: 电网三相电源为 220 V/50 Hz; 采用三相不可控整流桥作为谐波源, 整流桥的直流侧取电阻 $R = 30 \Omega$, 交流侧进线电感为 0.05 mH; APF 的直流侧电压为 800 V, 直流母线电容为 3500 μF , 交流侧进线电感为 4 mH, 等效电阻为 0.3 Ω ; 电流环采用 PI+重复控制^[19], 电压环采用 PI 控制。

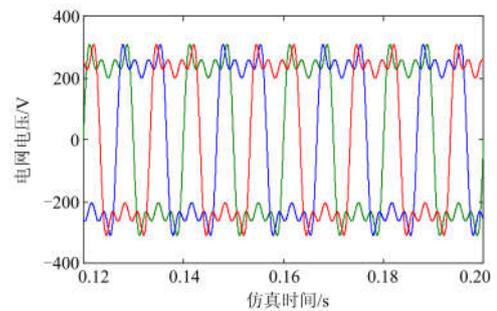
3.1 电网恶劣的情况下

为验证本文的方法在电网恶劣的条件下能够正常工作, 分别在两种不同条件下进行了仿真实验:

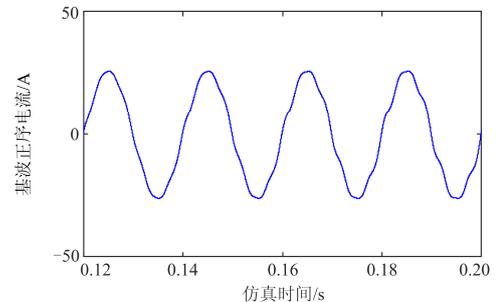
(1) 电网电压波形畸变, 含有 3、5、7 次谐波, 谐波幅值与基波幅值之比分别为 40%、20%、15%, 电压 THD 为 47.17%。

(2) 电网电压频率发生波动, 电压频率波动至 50.2 Hz 和 50.5 Hz。

由图 3 可以看出, 当电网电压波形畸变时, 传统的 i_p-i_q 法得到的基波正序电流已经出现很大畸变, 而改进无锁相环方均根值法得到的基波正序电流不受影响。由图 4 的频谱分析可知, 采用 i_p-i_q 法检测到的基波正序电流的畸变率为 6.49%, 而改进的方均根值法的畸变率为 0.11%。可见, 当电网电压发生畸变时, 改进无锁相环的方均根值法的检测精度依然很高。



(a) 三相电网电压波形



(b) i_p-i_q 法提取的基波正序电流波形

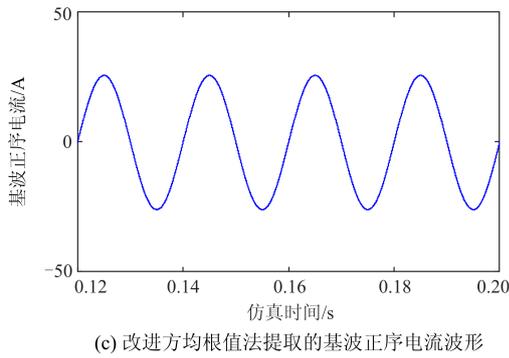


图 3 电网电压畸变时的电网电压和基波正序电流

Fig. 3 Power grid voltages and fundamental positive sequence currents under distorted power grid voltage

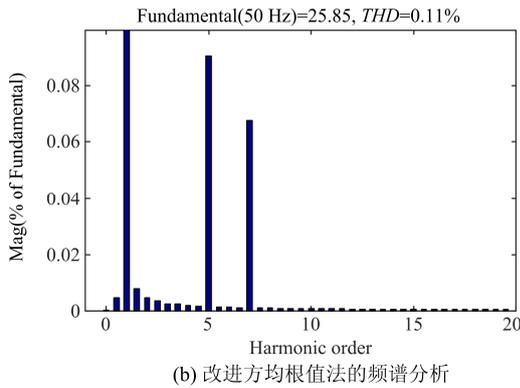
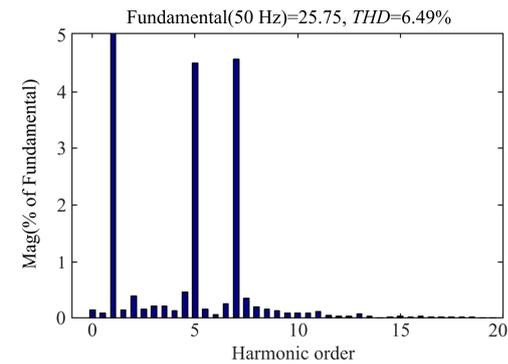


图 4 电压畸变时基波正序电流频谱分析

Fig. 4 Spectral analysis of fundamental current under distorted power grid voltage

当电网电压频率发生波动时, i_p-i_q 法和改进方均根值法的基波正序电流畸变率见表 1。随着频率波动幅度的增大, 传统方均根值检测方法的基波电流畸变率越来越高; 而改进无锁相环的方均根值检测方法的畸变率变化很小。可见, 当电网电压频率波动时, 本文提出的改进无锁相环方均根值检测方法的精度不受频率波动的影响。

表 1 电压频率波动时基波正序电流畸变率

Table 1 Fundamental positive sequence current distortion rate under fluctuant frequency

检测方法	f/Hz	THD/%
i_p-i_q 法	50	0.35
	50.2	1.27
	50.5	3.41
改进方均根值法	50	0.02
	50.2	0.09
	50.5	0.22

3.2 负载突变情况下

为比较两种方法的动态特性, 在 $t=0.12\text{ s}$ 时突加负载, 分别观察两种方法得到的基波正序电流。

图 5 中, 红色虚线为负载突变后系统稳定后的 A 相基波正序电流, 蓝色实线为系统检测出的基波正序电流, 通过红色、蓝色线重合时刻来分析不同检测方法的动态性能。从图 5(a)、图 5(b)可知, 在负载突变后, 传统的 i_p-i_q 法需要近 2 个周期才能跟踪负载的变化, 而改进的方均根值法在一个周期内即可跟踪负载变化。究其原因, 是 i_p-i_q 法的动态响应受到低通滤波器环节的影响^[20], 而 RMS 法是对负载电流的平方作积分, 被积函数恒大于零且是关于 $t=T/2$ 对称的周期函数, 所以在求取有效值的过程中即使负载突变, 理论上也仅有 $T/2$ 的延时。

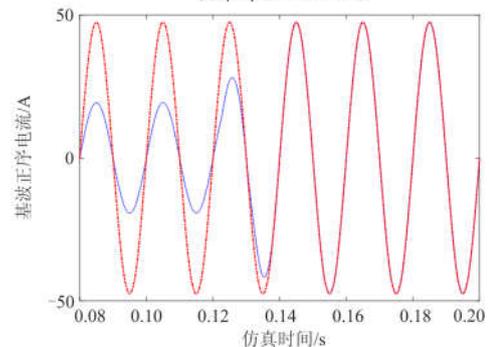
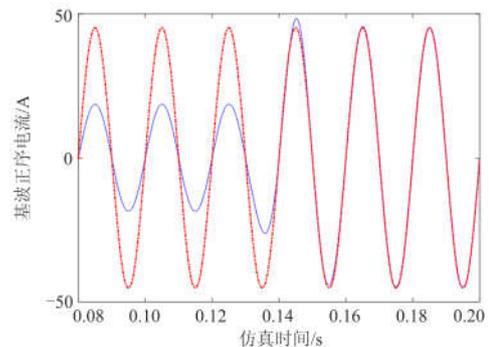


图 5 两种不同谐波检测方法的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms by using two different harmonic detection methods

图 6 为采用改进无锁相环的方均根值检测法的补偿效果。可以看出, 该方法可以有效地应用在 APF 的指令电流生成环节。

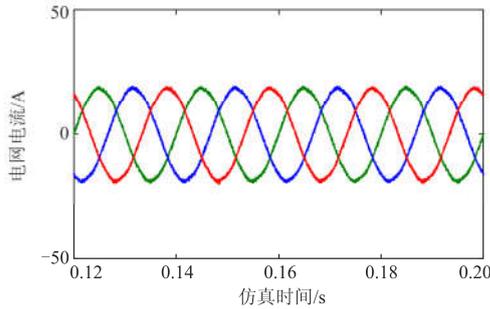


图 6 补偿后网侧电流波形
Fig. 6 Waveforms of grid currents after compensation

4 实验验证

为验证理论分析的正确性, 根据仿真参数搭建 APF 实验平台, 对本文所提方法进行实验验证。主控芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335 型 DSP。实验条件为: 相电压为 220 V 市电电压; 谐波源为三相不可控整流桥组成的负载, 负载参数与仿真参数一致。

图 7(a)为三相负载电流波形, 可以看出补偿前三相电流畸变, 含有大量的谐波和无功。图 7(b)为补偿后三相网侧电流波形, 相较于补偿前的负载电流波形, 三相电流的畸变程度得到了很大改善, 电流波形较为光滑。

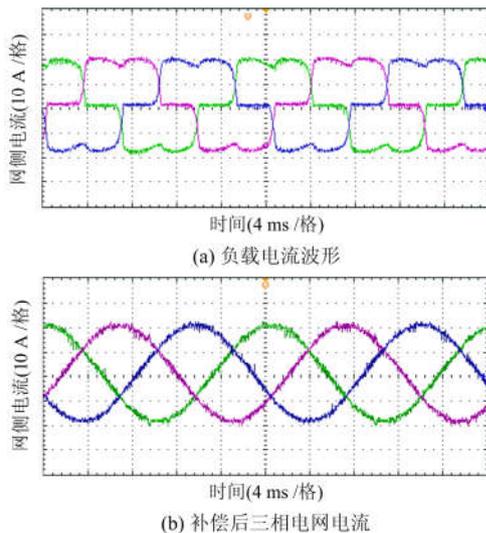


图 7 电网电压正常时的实验波形

Fig. 7 Experiment waveforms under normal power grid voltage

为验证本文提出的方法可以应用在电网恶劣的环境, 实验时对三相 220 V 电网电压进行处理, 通过调压器降压输出, 再经变比为 1:1 的隔离变压器输出作为电源电压。因为隔离变压器的铁芯磁路

存在非线性, 且工作电压与额定工作电压相差较大, 所以变压器二次输出电压会出现较大畸变。

图 8 为 A 相畸变的电源电压波形和经 APF 补偿后的网侧电流波形。可以看出, 在电源电压发生很严重畸变的情况下, APF 补偿后的网侧电流与电网电压是同频同相位, 补偿效果不受影响, 由此可证明所提出的检测方法在电网恶劣的情况下也能正常工作。

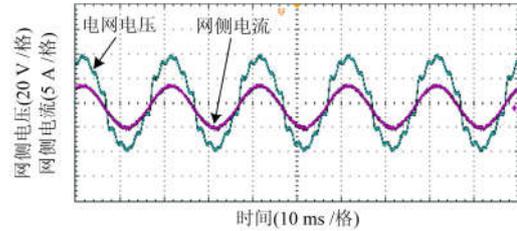


图 8 电网电压畸变时的实验波形
Fig. 8 Experiment waveforms under distorted power grid voltage

为进一步验证所提方法的动态性能, 这里将 i_p-i_q 法和改进方均根值法分别用于指令电流的提取环节, 做对比试验。如图 9 所示, 在 t_1 时刻, 在整流桥的直流侧投入并联电阻, 使负载发生变化, 再观察补偿后的网侧电流。从图 9(a)可以看出, 经过 1 个工频周期到达 t_2 时刻后, 蓝色电流在红色虚线范围内的极小值要低于相邻的紫色电流极小值, 说明在 t_2 时刻以后, i_p-i_q 法的网侧电流还没稳定下来。实际上在大约 t_3 时刻, 即 2 个周期后网侧电流才稳定下来。而从图 9(b)可知, t_2 时刻以后网侧电流便稳定下来。这证明改进的方均根值法的动态性能要优于传统的 i_p-i_q 法。

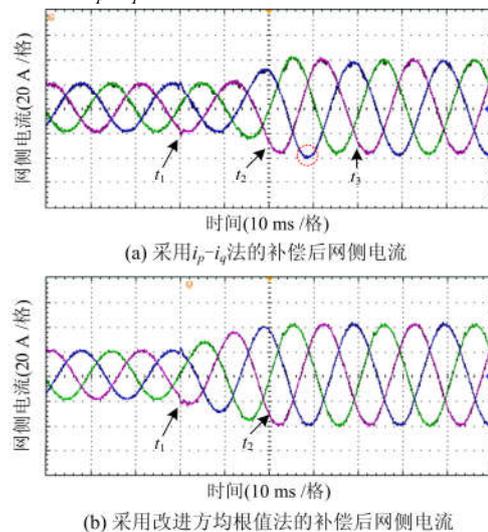


图 9 两种不同谐波检测方法的实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms by using two different harmonic detection methods

5 结论

本文分析了传统谐波检测方法在电网恶劣情况下引起的误差,指出其在电网畸变和频率波动的情况下存在的缺陷。在此基础上,研究了一种改进的方均根值谐波检测方法。该方法采用基波正序提取环节替代锁相环提取参考电压的基波正序分量,进而求取补偿指令电流,消除了电网畸变和波动的情况下锁相环引起的误差。仿真验证和实验结果表明,该方法响应速度快,可以有效地应用在 APF 的指令电流提取环节,并在电网电压恶劣的情况下,仍能有效地补偿谐波分量。

参考文献

- [1] 王清亮, 赵东强, 付周兴, 等. 一种改进的无锁相环 FBD 谐波电流检测方法[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(11): 19-24.
WANG Qingliang, ZHAO Dongqiang, FU Zhouxing, et al. Improved FBD harmonic current detection method without PLL[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(11): 19-24.
- [2] DAS J. Power system harmonics and passive filter designs[M]. Wiley-IEEE Press, 2015.
- [3] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] 武敏, 孟润泉, 赵刚. 三电平并联型 APF 死区效应分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 20-26.
WU Min, MENG Runquan, ZHAO Gang. Tri-level shunt APF dead-time effect analysis and its countermeasure research[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 20-26.
- [5] 许胜, 费树岷, 赵剑锋. 同步旋转坐标系中谐波电流分次控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 154-162.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng. Harmonic current frequency dividing control strategy based on synchronous rotating frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 154-162.
- [6] 赵辉, 吕新亚, 王红君, 等. 基于复合控制策略的混合有源滤波器谐波治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 60-66.
ZHAO Hui, LÜ Xinya, WANG Hongjun, et al. Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 60-66.
- [7] 石军奇, 肖慧荣, 黄同意. 基于高通滤波器的电网谐波电流检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2014(5): 102-106.
SHI Junqi, XIAO Huirong, HUANG Tongyi. Research on harmonic current detection method based on high-pass filter[J]. Computer Simulation, 2014(5): 102-106.
- [8] CHEN T, WANG L Y, WANG H X, et al. Harmonic detection method based on positive sequence extractor of fundamental current[C] // IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, November 20-23, 2015, Shanghai, China: 242-243.
- [9] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于乘法窗函数的插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 1-5.
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. An algorithm for harmonic analysis based on multiplication window function[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 1-5.
- [10] 周尚筹, 钱文姝, 杨昊. 基于 PSONM 和 LS 的电力系统谐波估计方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 28-37.
ZHOU Shangchou, QIAN Wenshu, YANG Hao. Study on power system harmonic estimation method based on PSONM and LS[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 28-37.
- [11] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39.
LI Zhengming, XU Min, PAN Tianhong, et al. A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 34-39.
- [12] 孙曙光, 庞毅, 王景芹, 等. 一种基于新型小波阈值去噪预处理的 EEMD 谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42-48.
SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD harmonic detection method based on the new wavelet threshold denoising pretreatment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-48.
- [13] 刘传林, 苏景军, 梁文祯, 等. 基于改进级神经网络自适应电网谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 134-141.
LIU Chuanlin, SU Jingjun, LIANG Wenzhen, et al. Adaptive detection of harmonic current in power grid based on improved cascade neural network[J]. Power

- System Protection and Control, 2016, 44(20): 134-141.
- [14] 黄落成. 基于有效值谐波检测新方法的大容量 APF 研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
HUANG Luocheng. Research on large-capacity APF based on a new root-mean-square harmonic detection method[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [15] 岑扬, 黄萌, 查晓明. 电网电压不平衡跌落下同步参考坐标系锁相环瞬态响应分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 2): 28-38.
CEN Yang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming. The transient response analysis of SRF-PLL under the unbalance grid voltage sag[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 28-38.
- [16] 苗长新, 樊露丹, 李洪涛, 等. 一种新的谐波检测方法及其在 APF 中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 1-6.
MIAO Changxin, FAN Ludan, LI Hongtao, et al. A new harmonic detection method and its application in active power filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5): 1-6.
- [17] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [18] 常鲜戎, 王辉云, 张海生. DSTATCOM 补偿指令电流的新型检测方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2819-2824.
CHANG Xianrong, WANG Huiyun, ZHANG Haisheng. A novel method to detect reference compensation current for DSTATCOM[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2819-2824.
- [19] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复 PI 控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 219-225.
ZHENG Shicheng, XU Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 219-225.
- [20] 王强. 基于瞬时无功功率理论谐波电流检测方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
WANG Qiang. Research on the harmonic current detection method based on the theory of instantaneous reactive power[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.

收稿日期: 2017-02-19; 修回日期: 2017-03-22

作者简介:

苗长新(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为无功补偿与谐波治理, 电能质量的控制及应用;

韦彬(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为谐波抑制与无功补偿; E-mail: weibin@cumt.edu.cn

晏夏瑜(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(编辑 葛艳娜)