

DOI: 10.7667/PSPC171488

基于FOGI的微网不平衡负载补偿策略研究

周建萍^{1,2}, 王涛¹, 张纬舟¹, 李泓青¹, 李欣煜¹, 郭昱交¹

(1. 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海发电过程智能管控工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 针对孤岛微网中不平衡负载导致逆变器输出不平衡电流的问题, 提出了基于四阶广义积分器(FOGI)的基波正序电流分离的电流补偿策略。该策略利用四阶广义积分器构成基于基波正序分量分离的不平衡电流补偿控制结构, 实现线路上不平衡电流的补偿。对FOGI与二阶广义积分器(SOGI)的补偿效果进行比较, 结果证明FOGI具有比SOGI更强的补偿能力, 能够充分地补偿线路上的不平衡电流。仿真结果也表明, 所提控制策略具有更强的不平衡补偿能力和谐波抑制能力。

关键词: 不平衡负载; 正序分量; 四阶广义积分器; 补偿

Research on compensation strategy of unbalanced load of microgrid based on FOGI

ZHOU Jianping^{1,2}, WANG Tao¹, ZHANG Weizhou¹, LI Hongqing¹, LI Xinyu¹, GUO Yujiao¹

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Management and Control for Power Process, Shanghai 200090, China)

Abstract: As for the problem of unbalanced current output from the inverter due to the unbalanced load in the island microgrid, a current compensation strategy based on Fourth Order Generalized Integrator (FOGI) for fundamental wave positive sequence current separation is proposed. The method uses the FOGI to construct the unbalanced current compensation strategy based on fundamental wave positive sequence component separation, which compensates the unbalanced current in the microgrid. The compensation results comparison of FOGI and Second-Order Generalized Integrator (SOGI) shows that FOGI has stronger compensation ability than SOGI, and can compensate the unbalanced current on the line fully. Simulation results show that the proposed method has better imbalance compensation ability and harmonic suppression ability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61275038).

Key words: unbalanced load; positive sequence component; FOGI; compensation

0 引言

微电网在运行过程中, 所接负载很少有三相完全对称的, 尤其在孤岛运行的情况下, 三相负载不对称的情况是普遍存在的。在孤岛运行的情况下, 三相不对称负载将导致逆变器输出的电压电流出现三相不平衡情况, 会影响微网稳定运行^[1]。同时, 三相不平衡会给供电系统以及各电子器件带来一系列的危害。因此, 有必要对三相不平衡负载进行平衡化补偿。

针对不平衡负载的补偿, 国内外学者都做了大

量研究。文献[2-3]引入了正负序控制器代替传统双环控制策略中的电压外环, 实现了逆变器在接三相不平衡负载下, 输出三相平衡的电压。文献[4-5]在逆变系统传统控制环路中引入了谐振控制, 实现了在三相不平衡负载下, 逆变器仍能输出平衡的三相电压。文献[6]采用了组合式三相逆变器实时调整每相电压的参考电压和频率, 保证三相电压的对称性。文献[7]根据 Steinmetz 电纳平衡补偿理论采用静止无功补偿器补偿不平衡负载。文献[8]对虚拟同步发电机的正序和负序电压进行独立控制, 实现了三相电压的稳定运行。文献[9-10]采用了静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)实现对不对称分量和微网谐波的补偿。文献[11]针对单位功率因数和正序对称这两个补偿目标, 给出了补

基金项目: 国家自然科学基金项目(61275038); 上海市重点科技攻关计划(14110500700); 上海市科委项目(13DZ2273800)

偿参数的详细计算方法。文献[12]针对不对称运行工况下的电压不平衡提出注入零序分量的方法从而保证不平衡功率在相间交换,使得 STATCOM 可以在非理想电压下补偿不平衡负荷。

在不平衡负荷补偿装置中,有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)因其较强的输出能力和补偿灵活多变等优点,目前在处理各种电能质量问题上得到了较为广泛的应用^[13]。基波正序有功分量的准确检测是衡量 APF 工作性能的重要指标之一。文献[14-15]提出了基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测方法,但需要设计复杂的滤波器环节,响应速度较慢;文献[16-19]提出了基于 SOGI 的正负序分离方法,不需要滤波器环节。提高了检测的实时性。

本文在 SOGI 的基础上提出了基于 FOGI 的正

序电流检测方法。该方法不仅继承了 SOGI 实时性好、不需要设计复杂的低通滤波器环节等优势外,还具有比 SOGI 更好的滤波性能,能够更为精确地分离三相不平衡电流分量中的基频正序有功分量,同时还具有更强的抗干扰能力。通过 FOGI 分离微网中的正序电流分量,可实现对微网线路中负序分量和谐波分量的补偿,保证逆变器端口实时输出三相平衡稳定的电压电流。仿真实验验证了该方法的正确性和有效性。

1 三相逆变器输出不平衡电压电流分析

微网三相逆变系统的一种典型结构如图 1 所示。 V_{oabc} 、 I_{oabc} 分别为逆变器输出三相电压和电流。

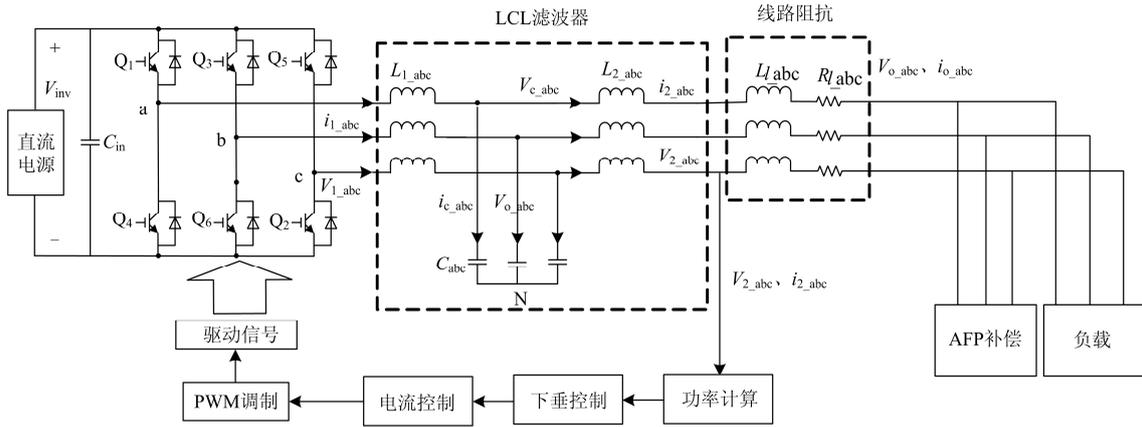


图 1 三相逆变系统的一种典型结构

Fig. 1 A typical structure of three-phase inverter system

在没有补偿策略下,若图 1 系统接不平衡负载,逆变器将输出三相不平衡电压和电流,通过对称分量法可以将三相不平衡电压电流分解为正序分量、负序分量和零序分量的叠加。不考虑谐波分量,在 $dq0$ 坐标系下系统输出不平衡电压如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \\ V_{o0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{dq0} \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = U_m^+ \begin{bmatrix} \cos \alpha^+ \\ -\sin \alpha^+ \\ 0 \end{bmatrix} + U_m^- \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \alpha^-) \\ -\sin(2\omega t + \alpha^-) \\ 0 \end{bmatrix} + U_m^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cos(\omega t + \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: V_{od} 、 V_{oq} 、 V_{o0} 和 V_{oa} 、 V_{ob} 、 V_{oc} 分别为 $dq0$ 坐标系和 abc 坐标系下逆变器经滤波后输出电压值; U_m^+ 、 U_m^- 、 U_m^0 分别为逆变器输出正负零序电压幅值; α^+ 、 α^- 、 α^0 分别为逆变器输出正负零

序电压初始相角。

$$\mathbf{T}_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

在 $\alpha\beta$ 坐标系下系统输出的不平衡电流可以表示为

$$\begin{cases} i_{\alpha\beta}^+ = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^+ i_{abc}^+ = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^+ \mathbf{T}_+ i_{abc} = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^+ \mathbf{T}_+ \mathbf{T}_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} \\ i_{\alpha\beta}^- = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^- i_{abc}^- = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^- \mathbf{T}_- i_{abc} = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^- \mathbf{T}_- \mathbf{T}_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} \\ i_{\alpha\beta}^0 = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^0 i_{abc}^0 = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^0 \mathbf{T}_0 i_{abc} = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^0 \mathbf{T}_0 \mathbf{T}_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i_{\alpha\beta}^{+0}$ 表示 $\alpha\beta$ 坐标系下三相电流值。

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}.$$

从而有

$$\begin{cases} i_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} i_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_\alpha - qi_\beta \\ qi_\alpha + i_\beta \end{bmatrix} \\ i_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} i_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_\alpha + qi_\beta \\ -qi_\alpha + i_\beta \end{bmatrix} \\ i_{\alpha\beta}^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} i_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 。

由式(1)可知, 当三相负载不平衡时, 逆变器输出电压会产生 2 倍工频信号, 导致三相电压输出不平衡, 文献[3]据此给出了一种采用比例积分谐振(PIR)控制的电压补偿策略, 简化了电压环的控制结构, 但文献[3]并没有给出不平衡电流的补偿方案。由公式(2)可知, 在 $\alpha\beta$ 坐标系下, 零序分量并不存在, 且正负序分量的计算需要对 $\alpha\beta$ 分量进行正交旋转变换, 据此, 文献[16]采用了基于改进的 SOGI 产生正交信号来检测基波正序电流的补偿方案, 简化了补偿环节的低通滤波环节, 但二阶积分环节容易受到谐波分量的影响, 并且在输出正交分量时对低频谐波滤波效果不够理想。本文提出基于 FOGI 的正序电流检测方案用于补偿不平衡电流。

2 FOGI 的正序电流检测和补偿策略

一般而言, 具有高阶传递函数的滤波器具有更好的滤波特性, 但相应地需要设定的参数也会增多, 为了在保持更好的滤波特性下尽可能地简化参数的设计, 本文在 SOGI 的基础上, 通过将两个 SOGI 串联构成了四阶广义积分器(FOGI)来实现更好的滤波效果。

2.1 SOGI 和 FOGI 的基本结构

与 SOGI 相比, FOGI 采用两个 SOGI 相互串联构成了四阶系统, 具有更好的滤波效果, 同时也可以实现输入信号对选定频率信号的同向输出和正交输出。SOGI 和 FOGI 的基本结构如图 2 所示, 图 2(a)为 SOGI 的结构模型, 图 2(b)为 FOGI 的结构模型, K_1 、 K_2 为比例系数, ω 为谐振频率。

由图 2(a)可以得出 SOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} D_s(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{K_1 \omega s}{s^2 + K_1 \omega s + \omega^2} \\ Q_s(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{K_1 \omega^2}{s^2 + K_1 \omega s + \omega^2} \end{cases} \quad (4)$$

由图 2(b)可以得出 FOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} D_F(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{K_1 K_2 \omega^2 s^2}{s^4 + K_2 \omega s^3 + (2 + K_1 K_2) \omega^2 s^2 + K_2 \omega^3 + \omega^4} \\ Q_F(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{K_1 K_2 \omega^3 s}{s^4 + K_2 \omega s^3 + (2 + K_1 K_2) \omega^2 s^2 + K_2 \omega^3 + \omega^4} \end{cases} \quad (5)$$

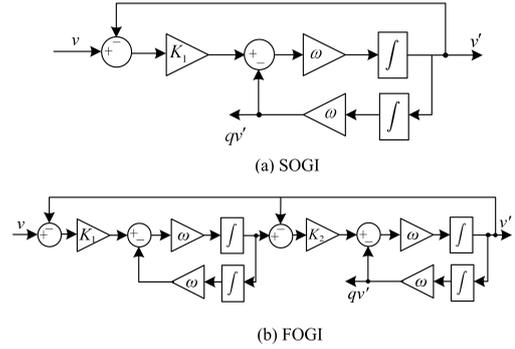


图 2 SOGI 和 FOGI 基本结构

Fig. 2 Basic structure of SOGI and FOGI

SOGI 和 FOGI 的伯德图如图 3 所示。

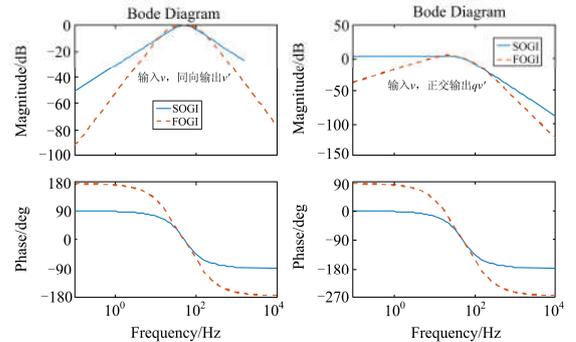


图 3 SOGI 和 FOGI 的伯德图

Fig. 3 Bode diagram of SOGI and FOGI

图 3 的伯德图中, $K_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $K_2 = 2\sqrt{2}$,

$\omega = 100\pi$ 。由图 3 可以看出, 在基频同向输出 v' 时, FOGI 具有更好的滤波性能; 同时, 在正交输出 qv' 时, SOGI 对低频信号并没有抑制能力, 易受到谐波成分的影响, 而 FOGI 对基频以外信号的抑制能力都要优于 SOGI。图 4(a)—图 4(d)分别给出了不同

K_1 和 K_2 的取值下 FOGI 的伯德图和阶跃响应曲线, 可以看出, 当 K_2 不变, K_1 逐渐增加时, FOGI 的带宽将逐渐增加, K_1 过大时会出现两个谐振尖峰, 同时 FOGI 的阶跃响应速度会有一个由慢变快再变慢的过程; 当 K_1 不变, K_2 逐渐增加时, FOGI 的带宽将逐渐增加, 滤波效果逐渐减弱, FOGI 的阶跃响应速度会变快, 但波动会越来越大。综合各方面考虑, 本文取 $K_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $K_2 = 2\sqrt{2}$ 。

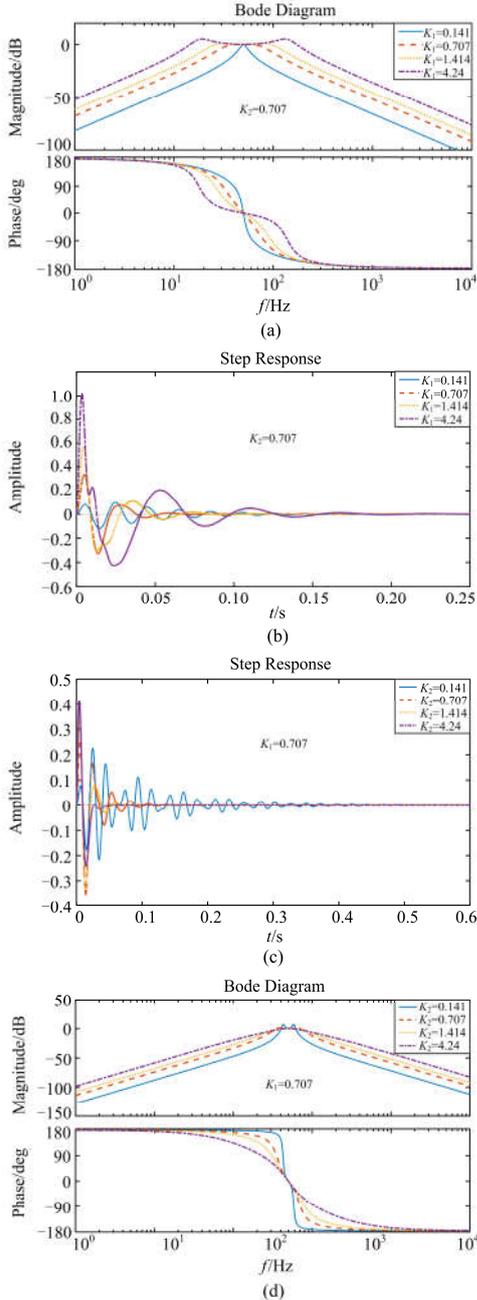


图 4 不同 K 值下 FOGI 的伯德图和阶跃响应
Fig. 4 Bode plot and step responses of FOGI for different values of K

2.2 基于 FOGI 的正序电流检测方法

由前文所述可知, 本文所提的 FOGI 可以更好地滤波和输出正交信号, 下文将基于 FOGI 来获取系统不对称电流的基波正序分量。由式(3)可知, 在 $\alpha\beta$ 坐标系下, 不对称电流的 $\alpha\beta$ 正序分量可以由 $\alpha\beta$ 分量经过一定的正交变换得到, 并且没有零序分量, 如式(6)所示。结合式(6)和 FOGI, 图 5 给出系统不平衡电流正序分量获取过程。

$$\begin{cases} i_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_\alpha - qi_\beta \\ qi_\alpha + i_\beta \end{bmatrix} \\ i_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_\alpha + qi_\beta \\ -qi_\alpha + i_\beta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

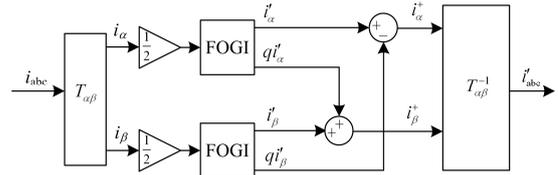


图 5 基于 FOGI 的正序分量分离结构图

Fig. 5 Positive sequence component separation structure diagram based on FOGI

如图 5 所示, 系统检测到微网中的电流信号 i_{abc} 以后, 经 $\alpha\beta$ 坐标变换, 可获得三相电流的 $\alpha\beta$ 分量 $i_{\alpha\beta}$, 接着将 $i_{\alpha\beta}$ 送入 FOGI 后可以获得电流基频信号的 $\alpha\beta$ 分量 $i'_{\alpha\beta}$ 以及对应的正交分量 $q'_{\alpha\beta}$, 最后, 经过运算和反变换后即可获得基频正序电流分量 i_{abc}^+ 。

2.3 基于 FOGI 正序电流分离的电流补偿策略

基于 FOGI 正序电流分离的不平衡电流补偿策略如图 6 所示。

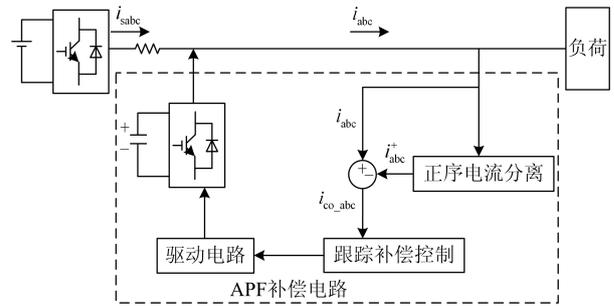


图 6 基于 FOGI 的不平衡电流补偿策略

Fig. 6 Unbalanced current compensation strategy based on FOGI

在图 6 中, 系统采用有源电力滤波器(APF)来补偿不平衡电流。系统实时地检测母线上的三相电流分量 i_{abc} , 并将 i_{abc} 通过本文所提的 FOGI 正序电

流检测方案, 分离出三相电流中的基频正序电流 i_{abc}^+ , 最后, 通过将 i_{abc} 与 i_{abc}^+ 做差比较, 即可得到 APF 所需要补偿的补偿电流 i_{co_abc} 。对于补偿电流的跟踪控制环节, 本文采用滞环比较电流跟踪控制策略^[20], 如图 7 所示。在获取 i_{co_abc} 后, 将该电流信号与从 APF 处测得的补偿电流 $i_{co_abc}^{re}$ 做差比较, 将其差值 Δi_{co} 作为滞环比较器的输入信号, 控制滞环环节产生控制主电路开关的 PWM 信号, 最终经驱动电路控制主电路输出补偿电流 $i_{co_abc}^{re}$, 并使其能够始终跟踪 i_{co_abc} , 保证逆变器端口输出三相平衡的电流。

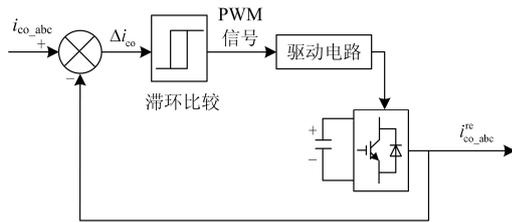


图 7 滞环比较电流跟踪控制策略

Fig. 7 Hysteresis comparison current tracking control strategy

3 实验仿真

为了验证 FOGI 对不平衡电流的补偿效果, 本文在 Matlab/Simulink 平台上构建了如图 1 所示的三相逆变系统, 采用图 6 所示的 APF 补偿策略, 系统接三相不平衡负载, 三相负载容量如表 1 所示, 同时在负载处主动注入谐波来验证控制策略的有效性。系统直流侧接 500 V 理想直流电源, 逆变控制侧采用下垂控制策略, 在电压环处采用 PIR 控制策略^[3]对不平衡电压进行补偿控制, 同时采用 APF 来补偿不平衡电流。本文将采用 SOGI 策略与 FOGI 策略的补偿效果进行对比, 以验证本文所提的 FOGI 补偿策略的优越性。

表 1 三相不平衡负载容量

Table 1 Three phase unbalanced load capacity

线路	有功功率/kW	无功功率/kvar
A 相	5	0.5
B 相	10	1
C 相	10	1

经仿真实验并采用 SOGI 和 FOGI 补偿策略后, 逆变器输出的负序电流如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在不采用补偿策略时, 逆变器输出的负序电流在 10 A 左右; 采用 SOGI 补偿方案后, 逆变器输出的负序电流由 9 A 左右降为 0.5 A 左右; 而采用了 FOGI 补偿方案后, 负序电流基本降为 0 A, 采用 FOGI 的负序电流补偿能力最好。

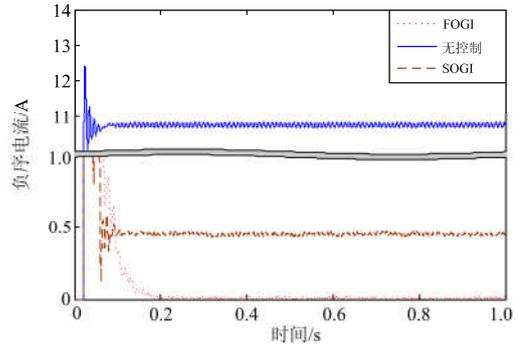


图 8 SOGI 和 FOGI 下逆变器输出的负序电流值

Fig. 8 Inverter outputs negative sequence current between SOGI and FOGI

图 9(a)—图 9(c)分别为不采用补偿策略、采用 SOGI 补偿和采用 FOGI 补偿下, 逆变器输出 A 相电流波形的 FFT 分析。从图 9 可以看出, 在不采用补偿策略的前提下, 逆变器输出 A 相电流 THD 为 7.21%, SOGI 补偿下, A 相电流 THD 降到了 1.95%, 而采用 FOGI 补偿后, A 相电流 THD 降到了 0.79%, FOGI 对电流谐波的补偿也比 SOGI 更优越, 进一步验证了本文所提控制策略的优越性。

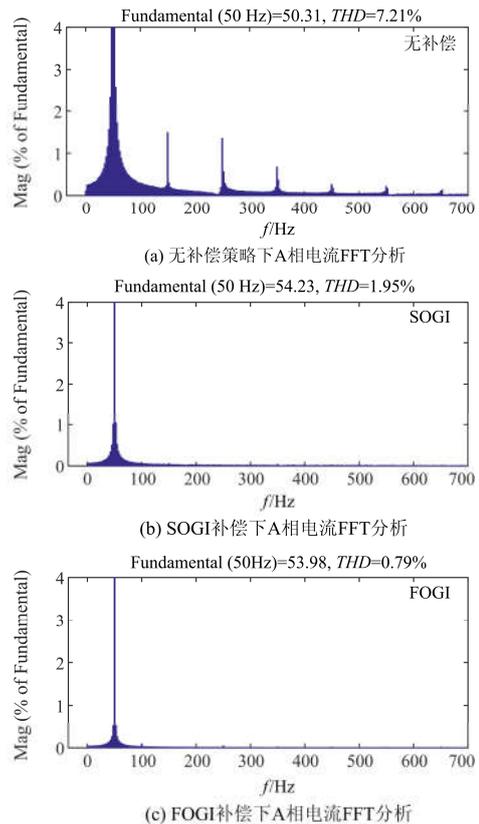


图 9 两种补偿策略下逆变器输出电流的 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of inverter output current with two compensation strategies

4 结论

本文提出了一种基于 FOGI 的电网电流正负序分量的检测方法和分离补偿策略, 在逆变器接不平衡负载下, 通过 FOGI 分离线路正序电流, 并通过 APF 补偿逆变器输出电流的负序分量和谐波分量, 可以得到比 SOGI 策略更好的补偿效果。仿真实验表明, 该策略可以很好地补偿线路的负序电流, 同时也能有效地抑制电网电流中的谐波分量, 验证了本文所提补偿方法的有效性。

参考文献

- [1] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [2] 王恒利, 付立军, 肖飞, 等. 三相逆变器不平衡负载条件下双环控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 398-404.
WANG Hengli, FU Lijun, XIAO Fei, et al. A double-loop control strategy for three-phase inverter with unbalanced load[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 398-404.
- [3] 张弛, 黄培专, 裴星宇. 网侧功率波动条件下储能变流器控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 47-52.
ZHANG Chi, HUANG Peizhuan, PEI Xingyu. Control strategy for energy storage converter under grid-side power fluctuation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 47-52.
- [4] 韦徵, 茹心芹, 石伟, 等. 适用于不平衡负载工况下的微网逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 76-82.
WEI Zheng, RU Xinqin, SHI Wei, et al. Control strategy for microgrid inverter under unbalanced load conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 76-82.
- [5] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
- [6] 任碧莹, 赵欣荣, 孙向东, 等. 不平衡负载下基于改进下垂控制策略的组合式三相逆变器控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1163-1168.
REN Biying, ZHAO Xinrong, SUN Xiangdong, et al. Improved droop control based three-phase combined inverters for unbalanced load[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1163-1168.
- [7] WANG J, FU C, ZHANG Y. SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1658-1665.
- [8] 曾正, 邵伟华, 李辉, 等. 孤岛微网中虚拟同步发电机不平衡电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 372-381.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, LI Hui, et al. Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in islanded micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 37(2): 372-381.
- [9] 陈奎, 周东, 孙建坡. 基于序分量法的 D-STATCOM 直接功率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 43-49.
CHEN Kui, ZHOU Dong, SUN Jianpo. Study on predictive direct power control of D-STATCOM based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 43-49.
- [10] 赵学华, 史丽萍, 陈丽兵. 基于复合控制的改进型级联 STATCOM 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 98-106.
ZHAO Xuehua, SHI Liping, CHEN Libing. A new current control strategy of cascaded STATCOM with composite control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 98-106.
- [11] 王一, 刘建政. 不对称电压下不平衡负载的平衡化补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 85-93.
WANG Yi, LIU Jianzheng. Balanced compensation for unbalanced load in condition of asymmetrical voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 85-93.
- [12] 刘安灵, 张彬, 梁昊, 等. Y 形链式 STATCOM 的相间电容电压平衡控制策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 32-38.
LIU Anling, ZHANG Bin, LIANG Hao, et al. DC capacitor voltage balance control strategy for Y-type cascaded h-bridge STATCOM[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 32-38.
- [13] 刘欣, 李尚盛, 吴楠, 等. 基于谐波源注入的 SAPF 补偿容量确定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 22-27.
LIU Xin, LI Shangsheng, WU Nan, et al. Compensation capacity prediction of SAPF based on harmonic source injection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 22-27.

- [14] 刘进生, 钱平. 一种改进型谐波检测方法的 LPF 及仿真研究[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2370-2372, 2378.
LIU Jinsheng, QIAN Ping. Simulation research of LPF based on improved harmonic detection method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(12): 2370-2372, 2378.
- [15] 吴超. 非理想电压时一种改进的 i_p-i_q 检测法[J]. 广东电力, 2016, 29(7): 72-77.
WU Chao. An improved i_p-i_q detection method under the condition of non-ideal voltage[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(7): 72-77.
- [16] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [17] 周林, 张林强, 李怀花, 等. 光伏并网逆变器负序分量补偿法控制策略[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1197-1203.
ZHOU Lin, ZHANG Linqiang, LI Huaihua, et al. Negative component compensation control scheme for photovoltaic grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1197-1203.
- [18] PATIL K R, PATEL H H. Modified dual second-order generalised integrator FLL for synchronization of a distributed generator to a weak grid[C] // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 7-10, 2016, Florence, Italy: 1-5.
- [19] 王平, 李刚健, 张海宁, 等. 改进广义积分器在三相基波正序有功电流检测中的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3199-3205.
WANG Ping, LI Gangjian, ZHANG Haining, et al. Application of improved generalized integrator in three-phase fundamental positive-sequence active current detection[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3199-3205.
- [20] 申凯. 基于 APF 的配电网三相不平衡负荷补偿策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2016.
SHEN Kai. Research on load compensation strategy of three-phase unbalanced in distribution network based on APF[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2016.

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2017-12-29

作者简介:

周建萍(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式发电与微电网技术。E-mail: zhoujianping@ship.edu.cn

(编辑 魏小丽)