

一种改进的并网逆变器电压不平衡补偿策略

马志远, 黄海宏

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:随着光伏和风电等可再生能源的普及率日益提高,提高并网系统运行的可靠性与稳定性已经成为系统内的一项关键技术。受电网的动态特性影响,若在电网电压不平衡的情况下仍然采用传统下垂控制,并网逆变器将无法稳定有效地运行,且公共连接点(PCC)的电压和电流不平衡度也将随之升高。针对并网系统中PCC点电压不平衡问题,提出了一种改进的电压不平衡补偿控制策略,在传统下垂控制基础上,引入正序无功下垂补偿回路和负序电压前馈补偿回路,叠加生成逆变器输出电压补偿参考值,从而有效地减小了并网连接点的电压不平衡度。建立了系统的小信号模型,并在此基础上进行了控制策略的稳定性分析,最后仿真验证了该下垂控制策略的有效性与可行性。

关键词:下垂控制;不平衡补偿;负序电压前馈;小信号分析

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23029

An Improved Compensation Strategy for Voltage Unbalance of Grid-connected Inverter

MA Zhiyuan, HUANG Haihong

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: With the increasing popularity of renewable energy sources such as photovoltaics and wind power, improving the reliability and stability of grid-connected system operation has become a key technology in the system. Affected by the dynamic characteristics of the grid, if the traditional droop control is still used in the case of the grid voltage imbalance, the grid-connected inverter will not be able to operate stably and effectively, and the voltage and current imbalance at the point of common coupling (PCC) will also be increased accordingly. Aiming at the problem of voltage imbalance at the PCC in the grid-connected system, an improved voltage imbalance compensation control strategy was proposed. Based on the traditional droop control, a positive sequence reactive power droop compensation loop and a negative sequence voltage feedforward compensation loop were introduced and superimposed to generate the inverter output voltage compensation reference value, so as to effectively reduce the voltage imbalance of the grid connection point. The small signal model of the system was established, and the stability analysis of the control strategy was carried out on this basis. Finally, the effectiveness and feasibility of the droop control strategy was verified by the simulation.

Key words: droop control; unbalance compensation; negative sequence voltage feedforward; small signal analysis

由于电网输电线路阻抗的性质及其参数的三相不对称性,以及电网内大量单相或三相不平衡负载的接入,使得电网电压和并网连接点(point of common coupling, PCC)电压极易出现不平衡的情况^[1-2]。然而,三相并网逆变器的控制策略一般是针对电网平衡工况下设计的,若在电网

电压不平衡工况下仍然采用传统的并网控制策略,会导致逆变器输出电流发生畸变、输出电压负序分量大幅增加且公共连接点的部分负荷不能正常使用^[3-4]。针对电网电压不平衡问题,国际电工委员会建议电力系统中PCC的电压不平衡度不得超过2%,根据《GB/T—15543—2008 电能

作者简介: 马志远(1996—),男,硕士研究生, Email: 1085249809@qq.com

通讯作者: 黄海宏(1973—),男,博士,教授, Email: hhaihong741@126.com

质量《三相电压不平衡》的规定,电网正常运行时,电压不平衡度(voltage unbalance factor, VUF)不得超过2%,短时间内不可超过4%^[5]。VUF为负序电压分量 V_{PCC}^- 与正序电压分量 V_{PCC}^+ 的绝对值之比,即

$$VUF = \left| \frac{V_{PCC}^-}{V_{PCC}^+} \right| \times 100\% \quad (1)$$

文献[6]提出了一种在电压环增加谐振控制器的控制方案,通过谐振控制器补偿输出阻抗上的负序压降,从而实现对接网点不平衡电压的补偿。但其控制结构和参数调节较为复杂。文献[7]在传统下垂控制基础上,应用了虚拟阻抗技术按比例均分补偿负序电流,但是该控制策略会造成输出电压明显降落。文献[8]在传统功率下垂控制的基础上引入了一种负序无功电导不平衡下垂控制环,通过控制电导进而控制负序电流,从而达到抑制微网电压负序分量的效果,但是该电流补偿信号在电压外环表现为扰动量,会直接影响到电压控制的稳定性。

综上所述,针对传统补偿策略对PCC的不平衡电压补偿不够稳定、有效的问题,提出了一种改进的电压控制型不平衡补偿控制策略,即在传统功率下垂基础上加入正序无功下垂补偿回路和负序电压前馈补偿回路,由此协调叠加产生逆变器输出电压的参考指令值,实现了三相电压的不平衡补偿,大幅降低了并网点的电压不平衡度且提高了微网系统电压的稳定性。

1 不平衡电压电流矢量分析

典型的交流微网三相并网逆变器拓扑如图1所示,主要由微源 u_{dc} 、三相逆变全桥电路以及LC滤波器构成。图1中,L和C分别为微源逆变器输出侧的滤波电感和滤波电容, L_g 为微网系统的线路感抗。微电网和大电网之间通过公共连接点PCC实现互联。

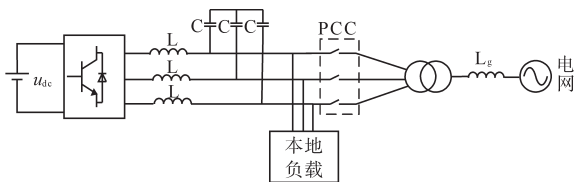


图1 三相并网逆变器拓扑

Fig.1 Three-phase grid-connected inverter topology

当电网电压发生不对称故障时,基于对称分量法可将电压矢量分解为正序、负序和零序三个

分量,其电压矢量可由下式表示:

$$\begin{cases} U_a = U_{a+} + U_{a-} + U_{a0} \\ U_b = U_{b+} + U_{b-} + U_{b0} \\ U_c = U_{c+} + U_{c-} + U_{c0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{a+}, U_{b+}, U_{c+} 为正序分量; U_{a-}, U_{b-}, U_{c-} 为负序分量; U_{a0}, U_{b0}, U_{c0} 为零序分量。

如图1所示,由于本文研究的是三相三线制的电路,不存在零序电流通路,所以本研究只对正序分量以及负序分量的控制进行分析。在本研究中,只考虑了电感阻抗,在两相静止坐标系下对逆变器输出侧列写基尔霍夫电压方程可得:

$$\begin{cases} V_\alpha = V_{g\alpha} + L_g \frac{di_\alpha}{dt} \\ V_\beta = V_{g\beta} + L_g \frac{di_\beta}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{g\alpha}, V_{g\beta}$ 为电网电压; V_α, V_β 为逆变器输出侧电压(PCC处电压); i_α, i_β 为入网电流。

由此进一步可得电网电压 V_g 的正序和负序分量表达式为

$$\begin{cases} V_g^+ = V^+ - \omega L_g I^+ \\ V_g^- = V^- + \omega L_g I^- \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I^+ = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q^+}{V^+} \\ I^- = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q^-}{V^-} \end{cases}$$

其中

式中: V^+, V^- 分别为逆变器输出电压的正序分量和负序分量; ω 为微网系统的角频率; I^+, I^- 分别为逆变器输出电流 I 的正序和负序分量; Q^+ 为正序无功功率, Q^- 为负序无功功率。

由式(4)可以看出,馈入电网的正序无功功率和负序无功功率可以分别调节逆变器输出电压的正、负序分量。输出一定的正序无功功率可以增加PCC的正序电压分量,输出负序无功功率可以削减其负序电压分量,从而降低PCC电压的不平衡度。由于网侧不平衡电压的存在,正序电压 V_g^+ 减小,负序电压 V_g^- 增大。可以看出,无功补偿的目的是通过注入无功功率 Q 来增加PCC正序电压幅值,降低PCC负序电压幅值。

图2以矢量图的形式说明了无功补偿的原理: V_g^+ 以314 rad/s的角速度逆时针旋转,而 V_g^- 则以相同大小的角速度顺时针旋转。如图2所示,正序无功电流 I^+ 比 V_g^+ 相位超前 90° ,从而在线路阻抗上产生了大小为 $\omega L_g I^+$ 的电压,此时PCC正序电压分量 V^+ 大小为 V_g^+ 和 $\omega L_g I^+$ 之和。可以看出正序无功功率的注入可以使PCC正序电压分

量增加。同样,PCC负序电压 V^- 的大小为 V_g^- 和 $\omega L_g I^-$ 之差,负序无功功率的注入降低了PCC的负序电压分量。因此,通过同时注入正序和负序无功功率,可以补偿PCC的不平衡电压,使PCC电压在安全的运行范围内。

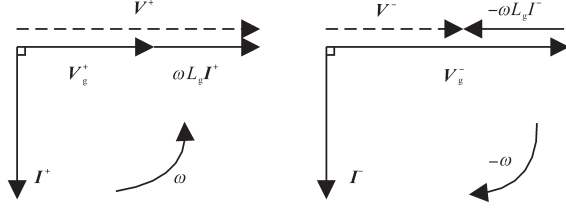


图2 无功补偿矢量图

Fig.2 Reactive power compensation vector diagram

2 改进不平衡补偿控制策略

2.1 改进下垂控制方程

当逆变器输出线路阻抗为感性时,传统的 $P-f$ 和 $Q-U$ 下垂表达式^[9]为

$$\begin{cases} U = -k_q(Q - Q_0) + U_0 \\ f = -k_p(P - P_0) + f_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: f, U 分别为基准频率和输出电压指令值; f_0, U_0 分别为逆变器的额定频率和输出电压幅值; P_0, Q_0 分别为额定有功功率和额定无功功率; P, Q 分别为逆变器输出的有功功率和无功功率; k_p, k_q 分别为有功下垂系数和无功下垂系数。

下垂控制要求并网系统动态调节输出的有功、无功功率,以控制输出电压的幅值和相位^[10]。然而在实际的并网系统中,经常观察到系统的电压幅值以及频率会有微小的波动。因此,传统的下垂表达式不能很好地适用,必须相应地移动下垂曲线,其变化量的表达式如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta f_0 = (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(P_0 - P) \\ \Delta U_0 = (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})(Q_0 - Q) \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{pp}, k_{pq} 为比例系数; k_{ip}, k_{iq} 为积分系数。

下垂曲线的移动过程如图3所示,下面以 $P-f$ 下垂曲线移动来做说明。

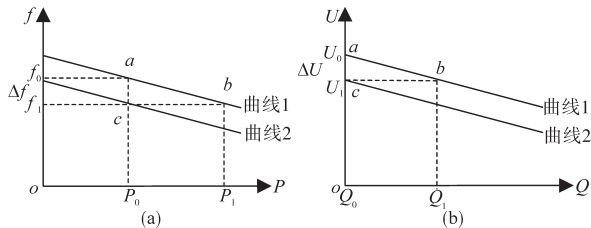


图3 下垂曲线移动示意图

Fig.3 Moving graph of droop curve

假设逆变器初始工作点为 a ,若电网的频率从 f_0 变为 f_1 ,由于逆变器的频率是由电网强制的,所以其新工作点将位于 b ,但为了保持输出有功功率不变,需要动态地将 $P-f$ 下垂曲线从曲线1平移到曲线2,此时逆变器新的工作点变为 c ,稳态时的系统频率为 f_1 ,输出有功功率为 P_0 。这里采用比例积分(PI)控制器来维持逆变器频率和输出电压的变化值。

由式(5)和式(6)可以得到并网模式下改进的下垂控制方程为

$$\begin{cases} f = f_0 + (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(P_0 - P) \\ U = U_0 + (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})(Q_0 - Q) \end{cases} \quad (7)$$

2.2 电压不平衡补偿策略

利用二阶广义积分器(second-order general integrator, SOGI),可以得到电压、电流的正序和负序分量。再根据瞬时功率理论^[11],可以计算出正序有功功率 P^+ 、负序有功功率 P^- 、正序无功功率 Q^+ 和负序无功功率 Q^- :

$$\begin{cases} P^+ = u_\alpha^+ i_\alpha^+ + u_\beta^+ i_\beta^+ \\ P^- = u_\alpha^- i_\alpha^- + u_\beta^- i_\beta^- \\ Q^+ = -u_\alpha^+ i_\beta^+ + u_\beta^+ i_\alpha^+ \\ Q^- = -u_\alpha^- i_\beta^- + u_\beta^- i_\alpha^- \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_\alpha^+, u_\alpha^-, u_\beta^+, u_\beta^-, i_\alpha^+, i_\alpha^-, i_\beta^+, i_\beta^-$ 分别为电压、电流在两相静止坐标系下的正、负序分量。

若只考虑不平衡电网电压的正序分量,对式(7)扩展可得其对应的正序下垂方程为

$$\begin{cases} f = f_0 + (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(P_0^+ - P^+) \\ U = U_0 + (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})(Q_0^+ - Q^+) \end{cases} \quad (9)$$

利用式(9)可以在不平衡的电网电压下控制逆变器输出正序的有功功率和无功功率,但对负序分量引起的不平衡无法进行有效抑制。为了解决上述问题,在正序功率下垂控制的基础上,加入一个负序电压前馈补偿回路,对PCC的不平衡电压进行协同补偿。

负序电压前馈补偿回路控制逆变器输出一定量的负序无功功率,该负序无功的参考指令值计算式为

$$Q_{ref}^- = k_x (V_{pcc}^- - V_{ref}^-) \quad (10)$$

式中: k_x 为不平衡补偿系数; V_{pcc}^-, V_{ref}^- 分别为并网点的负序电压幅值及参考值。

式(10)表示的控制框图如图4所示,当电网电压不平衡时,将逆变器输出电压与指令值相减,经过PI控制器,得到负序无功功率参考,再与逆变器输出无功作比较后经过PI控制器生成负序电压参考 u_{ref}^- 。

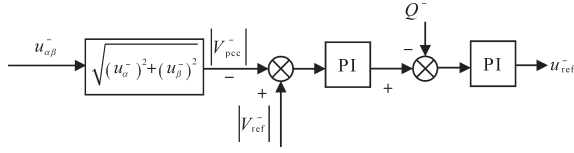


图4 负序电压参考生成示意图

Fig.4 Schematic diagram of negative sequence voltage reference generation

将负序电压参考 u_{ref}^- 与正序无功下垂补偿回路生成的正序电压参考 u_{ref}^+ 叠加在电压外环的参

考输入上,利用电压电流双环控制器产生两相电压参考指令 u_{ref}^* ,再通过电压空间矢量脉宽调制生成SVPWM控制信号控制开关管对PCC进行不平衡补偿。本文电压环电流环控制均采用准比例谐振(quasi proportional resonant, QPR)控制器,其传递函数为

$$G = k_{cp} + \frac{2k_{cr}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (11)$$

式中: k_{cp} , k_{cr} 分别为控制器的比例系数、谐振增益; ω_c 为截止频率; ω_0 为中心谐振角频率。

综上所述,本文所提改进的并网逆变器电压不平衡补偿策略控制框图如图5所示,包括了正负序功率计算模块、正序功率下垂控制模块、负序功率下垂控制模块、负序电压前馈控制模块和电压电流双闭环控制模块。

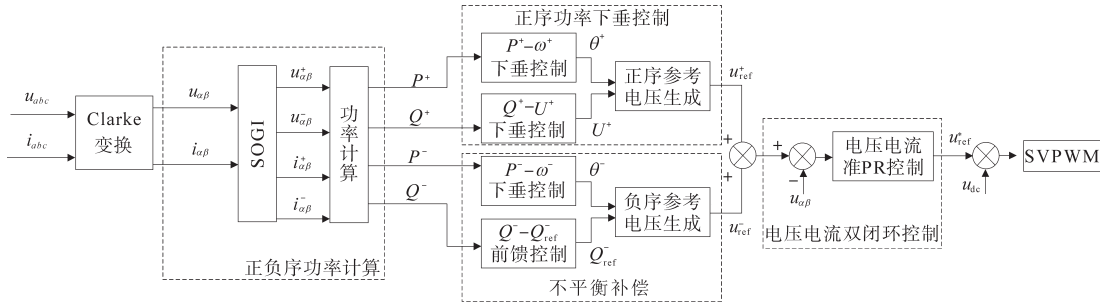


图5 改进不平衡补偿控制结构图

Fig.5 Structure diagram of improved unbalance compensation control

2.3 小信号稳定性分析

针对电网不平衡的并网系统建立了小信号模型,分析了本文所提的不平衡补偿控制算法中参数变化对系统的稳定性影响。

逆变器输出的负序有功和无功功率经过低通滤波器后可以表示为

$$P^-(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \left(\frac{V^- V_g^- \sin \theta^-}{L_g} \right) \quad (12)$$

$$Q^-(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \left[\frac{V^- V_g^- \cos \theta^- - (V_g^-)^2}{L_g} \right] \quad (13)$$

式中: θ^- 为逆变器负序输出电压的相角。

对并网逆变器的负序角频率、负序电压和输出功率进行小信号扰动得到:

$$\Delta \omega^-(s) = s \Delta \theta^- \quad (14)$$

$$[1 - (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})k_x] \Delta V^-(s) = -(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s}) \Delta Q^-(s) \quad (15)$$

$$\Delta P^-(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \left(\frac{\Delta V^- V_g^- \sin \theta^- + \Delta \theta^- V^- V_g^- \cos \theta^-}{L_g} \right) \quad (16)$$

$$\Delta Q^-(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \left(\frac{\Delta V^- V_g^- \cos \theta^- - \Delta \theta^- V^- V_g^- \sin \theta^-}{L_g} \right) \quad (17)$$

$$\text{令 } k_{pe} = \frac{V_g^- \sin \theta^-}{L_g}, k_{pd} = \frac{V^- V_g^- \cos \theta^-}{L_g}, k_{qe} = \frac{V_g^- \cos \theta^-}{L_g},$$

$$k_{qd} = \frac{-V^- V_g^- \sin \theta^-}{L_g}。 \text{将式(14)~式(17)联立后可得到如下扰动方程:}$$

$$s \Delta \theta^- = -k_p^- \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (k_{pe} \Delta V^- + k_{pd} \Delta \theta^-) \quad (18)$$

$$[1 - (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})k_x] \Delta V^- = -(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s}) \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (k_{qe} \Delta V^- + k_{qd} \Delta \theta^-) \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)中,整理后得到的小信号模型为一个4阶的特征方程:

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (20)$$

其中

$$A = 1 - k_{pq} k_x$$

$$\begin{aligned}
B &= 2\omega_c - 2k_x k_{pq} \omega_c + k_{pq} k_{qe} \omega_c - k_x k_{iq} \\
C &= \omega_c^2 + k_{pq} k_{qe} \omega_c^2 - k_{pq} k_x \omega_c^2 + k_{iq} k_{qe} \omega_c - \\
&\quad 2k_x k_{iq} \omega_c - k_{pp} k_{pd} k_{pq} k_x \omega_c \\
D &= k_{iq} k_{qe} \omega_c^2 - k_{iq} k_x \omega_c^2 + k_{pp} k_{pd} \omega_c^2 + k_{pp} k_{pd} k_{pq} k_{qe} \omega_c^2 - \\
&\quad k_{pp} k_{pe} k_{pq} k_x \omega_c^2 - k_{iq} k_x k_{pp} k_{pd} \omega_c \\
E &= k_{pp} k_{iq} \omega_c^2 (k_{pd} k_{qe} - k_{qd})
\end{aligned}$$

对负序补偿回路小信号扰动模型的分析表明,当不平衡补偿系数 k_x 较大,电压不平衡补偿效果明显。根据自动控制理论,考虑到PI控制系统下,过大的 k_x 会输出数值较大的负序无功功率参考,可能会影响不平衡补偿过程的动态特性。这里选取 $k_x=0.1, 0.5, 1.5, 3$ 来调查特征方程的零极点变化趋势。图6为不同的不平衡补偿系数 k_x 下方程的零极点分布,可以观察到,在 k_x 逐渐增大时,特征根向复平面右半边移动,并在 $k_x=3$ 时,特征根 λ_2 和 λ_3 产生了正实部,意味着系统到达了不稳定区域,系统在该参数下无法保持稳定。而当 $k_x=0.1, 0.5$ 和 1.5 时,特征根都在复平面左半部分,说明系统是稳定的。因此在实际情况中,可以通过设置合适的参数 k_x 满足系统的稳定性要求。

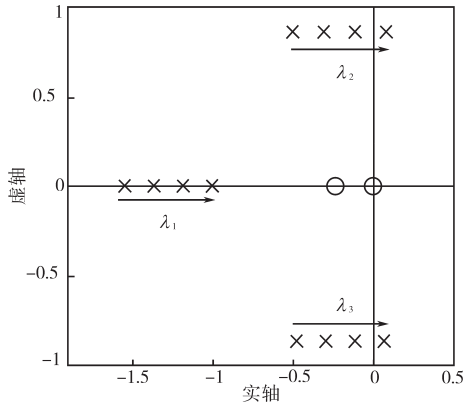


图6 根轨迹图

Fig.6 Root locus figure

3 仿真研究

为验证本文所提不平衡电网电压下改进补偿控制策略的可行性,在Matlab/Simulink仿真环境下搭建了仿真平台进行验证。控制系统和微电网主电路的仿真参数如下所示:交流侧额定电压幅值 $u_{abc}=311$ V;直流侧微源额定电压幅值 $u_{dc}=800$ V;电网电压不平衡度 $VUF=6\%$;滤波电容 $C=30$ μ F;滤波电感 $L=2$ mH;线路电感 $L_g=4$ mH;有功下垂系数 $k_{pp}=2\times 10^{-5}$;无功下垂系数 $k_{pq}=1.5\times 10^{-4}$;补偿系数 $k_x=1.5$;电压环PR参数 $k_{ucp}=0.05$,

$k_{ucr}=20$;电流环PR参数 $k_{icp}=3$, $k_{ier}=200$;比例积分PI参数 $k_{ip}=0.0001$, $k_{iq}=0.001$ 。

微网系统中大量本地负荷挂载于公共母线,若某相负载发生故障或者负载本身就存在分配不平衡的问题,将会导致PCC点的电压不平衡,为了模拟该种不平衡工况,设定电网电压幅值为311 V,在0.3 s时出现三相电压不平衡现象,即a相电压从311 V跌落至291 V,此时网侧电压不平衡度约为6%。在用改进的不平衡补偿控制策略前,采用传统的下垂控制方法对并网逆变器进行控制。图7a为传统下垂控制下的PCC点电压波形,此时的VUF约为4.9%。图7b为采用本文所提的控制策略时的仿真结果。PCC电压在0.5~0.6 s基本稳定维持在310 V,不平衡系数降低至0.3%,系统运行稳定。

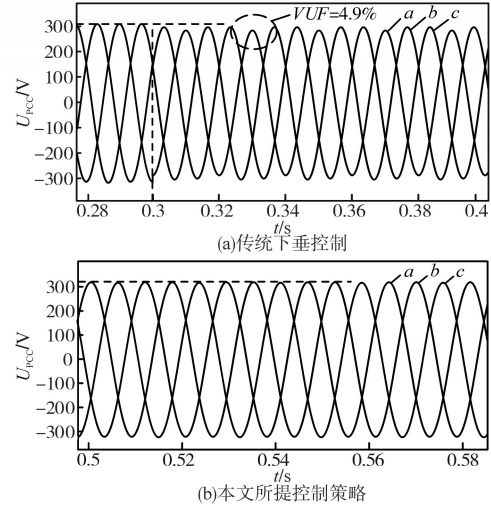


图7 PCC点电压仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of PCC voltage

补偿过程中的电压不平衡度仿真结果如图8所示,在加入电压不平衡补偿环节后,电压不平衡度有了明显的下降,表明了该方案可以有效地补偿PCC的不平衡电压。

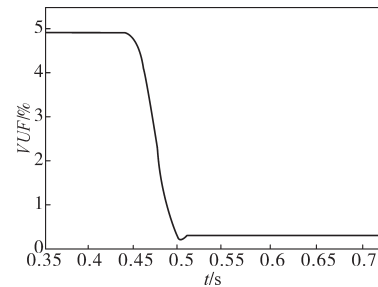


图8 电压不平衡度

Fig.8 Voltage unbalance factor

不平衡补偿前后的并网电流波形如图9所示。由于a相电压跌落,因此b相与c相的电流基