

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.06.001

能源互联网不平衡及谐波补偿控制策略

黄博南, 周建国, 孙秋野, 张化光
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 能源互联网概念的提出为解决日益严重的世界能源危机提供了一种潜在可行方案. 解决好电能质量问题是能源互联网技术能否得以充分发展的关键之一. 针对能源互联网中大量存在的非线性负荷及不平衡负荷引起的电能质量问题, 提出一种基于能源路由器的能源互联网三相不平衡及谐波补偿控制策略, 并设计了不平衡及谐波补偿控制器. 在 MATLAB/SIMULINK 环境下搭建了相关仿真模型, 对提出的谐波补偿方法进行仿真实验, 所得结果验证了所提方法的正确性和有效性.

关 键 词: 能源互联网; 三相不平衡; 谐波; 能源路由器; 电能质量

中图分类号: TP 18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)06-0761-06

Control Strategy for the Compensation of Imbalance and Harmonic in Energy Internet

HUANG Bo-nan, ZHOU Jian-guo, SUN Qiu-ye, ZHANG Hua-guang
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HUANG Bo-nan, E-mail: huangbonan@ise.neu.edu.cn)

Abstract: The energy internet proposed recently provides a potential solution to address the increasingly serious world energy issues. Solving the power quality problem properly is one of the key problems of the energy internet to be developed adequately in the future. Considering the power quality issue caused by the nonlinear and imbalance loads widely existing in the energy internet, an imbalance and harmonic compensation strategy is proposed based on the energy router in this paper. The imbalance and harmonic compensation controllers are also developed in detail. Simulation results from MATLAB/SIMULINK are provided to demonstrate the validity and efficiency of the proposed method.

Key words: energy internet; three-phase unbalance; harmonic; energy router; power quality

能源互联网中,随着分布式能源系统的发展,作为集成可再生能源、储能和本地电负荷的微电网技术得到了越来越多的关注^[1].微电网中,各类电源设备通过基于电压源的电力电子变换器接入到公用网络中,这类电力电子装置对网络起着重要的作用^[2].随着分布式发电系统(其中不乏大量单相分布式发电系统的存在)的广泛渗透与互联及网络中非线性负荷、不平衡负荷,能源互联网的电能质量问题受到了相关学者的密切关注^[3].同时,考虑到能源互联网需为客户提供绿色、灵活、可靠的高质量能源,电能作为网络中不可缺少的必要能源,其质量直接关系到系统的稳定与经济运行^[4].考虑到未来能源市场呈现能源按质定价、优质优价的趋势,能源互联网 PCC 点处电能质量的优劣将直接影响到能源互联网的经济稳定运行.因此,研究相关电能质量问题具有理论研究价值与现实意义.

能源互联网中影响电能质量的主要问题为影响稳定性的电压骤降骤升及频率波动,以及因不平衡负载等造成的三相电流电压不平衡及网络谐波^[3].这里主要讨论三相电压不平衡和谐波的补偿及抑制方法.

1 文献综述

能源互联网中,电力变换器可为负荷在基波上提供有功和无功功率支撑,同时也可通过对其施加恰当的控制策略,改善网络中电压电流的不平衡和谐波^[3].

目前,科技工作者主要集中于对能源子网(微电网)中的电能质量问题作分析,并提出了多种解决方案.文献[5]为克服系统中非线性和不平衡负荷的影响,针对并联逆变器,提出了基于比例多谐振控制器的相关控制方法.文献[6-8]针对分布式发电接口逆变器的三相不平衡和谐波问题,提出了相关补偿和抑制策略. Majumder 等希望完成 DG 对负荷提供基波有功和无功功率的同时,能补偿本地非线性和不平衡负荷,在文献[9]中提出了下垂控制的分布式发电逆变器控制策略.文献[10]在原有下垂控制的基础上,加入了电压补偿控制环,针对孤岛微电网,提出了一种下垂控制的三相电压不平衡补偿方法.文献[6-10]主要针对改善 DG 输出端口的电压质量而提出相关方法,但在能源互联网中,最关键问题为对电压较为灵敏的负荷母线处的电能质量的保证.针对此问题,文献[11-12]针对微网的电能质量问题,分别就单母线和多母线提出了相关控制策略.文献[13-14]通过分层控制方法中的一次控制和二次控制,为保证微电网中灵敏负荷母线电能质量,应用低带宽通信技术提出了一种并联逆变器控制方法,方法实现复杂且耗资较大.

能源互联网的兴起促使能源路由器成为其核心装备,ABB、GE、ALSTOM、ETH、KTH、西门子等研发机构正投入大量资金在能源路由器的研究中. Huang 等^[1]提出了能源互联网中能源路由器的概念,明确了能源路由器在能源互联网中的核心地位.该能源路由器以固态变压器为基本拓扑构成.目前,能源路由器的研究主要集中于拓扑与电气参数优化设计、暂态分析、调制策略、试验样机试制等方面.对能源路由器的具体应用及其路由控制策略的研究还比较少.目前,所研究的控制策略主要集中在能源路由器内部固态变压器的控制中.

对基于能源路由器应用的交直流微电网构成的能源互联网的电能质量问题,目前还未见报道.为了改善能源互联网的电能质量,本文针对三相三线系统,依据就地补偿原则,提出了能源互联网互联节点(PCC)电压三相不平衡补偿及其谐波

抑制策略,保证 PCC 处三相电压电能质量.

2 基于能源路由器的能源互联网三相不平衡及谐波补偿策略

2.1 系统结构及运行原理

图 1 为本文研究的能源互联网网系统结构示意图.所研究的互联网中包含了直流发电系统、单相 DG 以及三相 DG,为图 1 中的虚线框部分.直流系统和交流系统通过能源路由器^[15]进行链接,接入到配电网中,形成能源互联网.系统中包括不平衡负荷和非线性负荷.考虑到能源互联网中负荷不平衡与谐波的特性以及公共连接点(PCC)电压质量的重要性,本文主要利用能源路由器对能源互联网与低压配电网相连接的公共连接点(PCC)这一环节的电压进行不平衡和谐波补偿.

从图 1 中可以看出,PCC 处的电压电能质量严重下降的原因,主要是不平衡负荷、单相分布式发电和非线性负荷,这些设备造成了 PCC 处的电压严重不平衡且含有大量谐波的现象.这会对负荷的正常运行造成严重影响,尤其,若对电压质量要求较高且较为灵敏的负荷接入公共连接点母线时,低劣的电压质量会引起负荷的保护动作,自我切除.这类负荷有可能是重要负荷,若不能保证不间断连续供电,会对生产、经济等造成严重后果.

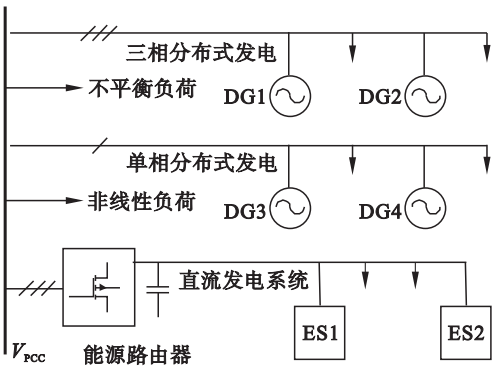


图 1 能源互联网系统结构
Fig. 1 Energy internet structure

能源路由器主要由电力变换器、信息通信与智能决策控制部分构成,不仅能够提供电能变换传输,还具有提供灵活多样化接口和通讯决策的能力以及电能质量治理、电能交易等辅助服务功能^[16].

为保证公共连接点处有良好的电压质量,实现对负荷的高效可靠供电,本文提出利用能源路由器对公共连接点处电压进行三相不平衡和谐波补偿控制,在保证公共连接点电压质量的同时可以避免交流发电系统中 DG 输出电压质量变差.

该方法能够被整合到传统下垂控制方法中,使得能源路由器在提供功率传输的同时能够进行电能质量补偿. 应用灵活,适用于多个交流、直流互联的能源互联网系统. 本文所提方法的基本原理是,在带有虚拟阻抗环的下垂控制的基础上引入基波负序电压和谐波电压分量来修改能源路由器输出电压参考值,通过内部控制环调节能源路由器输出电压使其与能源路由器输出阻抗上的负序电压和谐波电压尽可能相匹配,从而达到降低 PCC 点不平衡及谐波电压的效果.

2.2 控制系统设计

图2为本文控制系统的组成结构框图,该控制方法依托 $\alpha-\beta$ 静止坐标系. 如图所示,控制系统包括:电压基波负序及主要谐波正序、负序分量补偿控制器,基波正序有功功率和无功功率下垂控制,电压、电流内环控制器,主要谐波正序、负序

分量检测和虚拟输出阻抗环及基波电压模块. 其中,电压控制器的参考量信号由电压不平衡及谐波补偿器、基波有功无功下垂控制器和虚拟输出阻抗环的输出共同决定,电压(电流)内环控制器采用经典 PI(P) 控制器. 滤波电容电压作为电压控制器的反馈控制信号,电感电流作为电流控制器的反馈控制信号. 由于能源路由器紧挨着公共连接点,所以 PCC 上的电压基波正序、负序分量及各次主要谐波正序、负序分量检测后,检测量直接输出给电压谐波及不平衡补偿控制器和下垂控制器,这样便可省去低带宽通信(LBC). 且直流电压 V_{dc} 往往在一定范围内波动,故将直流侧电压信号为一个直流电压前馈控制环. 图中的“+”,“-”,“1”和“h”分别表示正序、负序、基波和 h 次谐波分量.

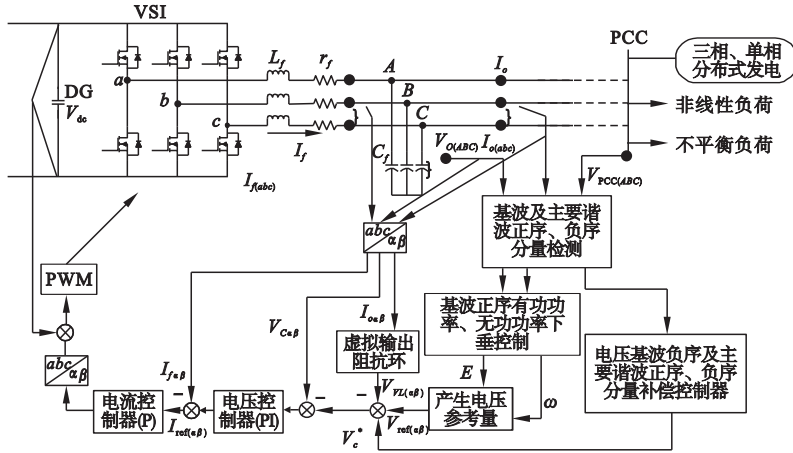


图2 控制系统组成结构框图

Fig. 2 Structure diagram of the control system

对于良好的电压不平衡和谐波补偿效果来说,序分量的准确检测和跟踪是非常重要的. 采用基于二阶广义积分器和 $d-q$ 变换方法,本文分别检测 PCC 的电压基波正序、负序分量和各次主要谐波正序、负序分量,以及输出电压、电流的基波正序、负序分量.

各分量经 Clark 变换后,可得 $\alpha-\beta$ 坐标系下的正序、负序分量:

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta}^+ = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \mathbf{x}_{abc}^+ = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \mathbf{T}_+ \mathbf{T}_{\alpha\beta}^T \mathbf{x}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{\alpha\beta}^+, \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta}^- = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \mathbf{x}_{abc}^- = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \mathbf{T}_- \mathbf{T}_{\alpha\beta}^T \mathbf{x}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{\alpha\beta}^-. \quad (2)$$

$$\text{其中: } q = e^{-j\frac{\pi}{2}}, \mathbf{T}_+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix},$$

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

由式(1)和式(2)可以看出, q 是一个移相滞后 90° 的移相器,为获得对应的正交分量,利用 q 对 $\alpha-\beta$ 轴分量分别移相,便获得 $\alpha-\beta$ 轴系下的正序、负序分量,再通过二阶广义积分器,可获得基波正序、负序分量:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{\alpha\beta}^{1+} &= \mathbf{x}_{\alpha\beta}^+ \\ \mathbf{x}_{\alpha\beta}^{1-} &= \mathbf{x}_{\alpha\beta}^- \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里,通过锁相环技术获得基波旋转角频率,

结合 $abc - dq$ 坐标轴变换和二阶低通滤波器 (5 Hz), 获得 $d - q$ 坐标系下的公共连接点处电压的各次主要谐波分量 (本文取 3, 5, 7 次谐波) 的正序和负序分量. 为了使能源路由器在补偿电压不平衡及谐波的同时, 能够在必要时传输基波有功和无功功率, 文中控制器外环仍采用下垂控制器, 控制输出基波正序有功和无功功率:

$$\omega = \omega^* - m(P_{\text{comp_DG}}^{1+*} - P_{\text{comp_DG}}^{1+}), \quad (4)$$

$$E = E^* - n(Q_{\text{comp_DG}}^{1+*} - Q_{\text{comp_DG}}^{1+}). \quad (5)$$

式中: m 为基波正序有功功率下垂控制器的下垂系数; n 为基波正序无功功率下垂控制器的下垂系数. 基波正序有功功率和无功功率的计算方法如下:

$$P_{\text{comp_DG}}^{1+} = v_{\alpha\alpha}^{1+} i_{\alpha\alpha}^{1+} + v_{\alpha\beta}^{1+} i_{\alpha\beta}^{1+}. \quad (6)$$

$$Q_{\text{comp_DG}}^{1+} = v_{\alpha\alpha}^{1+} i_{\alpha\beta}^{1+} - v_{\alpha\beta}^{1+} i_{\alpha\alpha}^{1+}. \quad (7)$$

图 3 为 PCC 处电压不平衡及谐波补偿控制器结构框图. 将得到的电压不平衡度系数和描述各次谐波畸变程度的畸变系数 UF, HD^{h+}, HD^{h-} 和相应的参考量 $UF_{\text{ref}}, HD_{\text{ref}}^{h+}, HD_{\text{ref}}^{h-}$ 进行比较做差, 从而获得 PI 控制器的输入. 将各个控制器的输出和相应的电压基波负序分量和谐波正序、负序分量 ($v_{\text{PCCdq}}^{1-}, v_{\text{PCCdq}}^{h+}, v_{\text{PCCdq}}^{h-}$) 分别相乘, 得 $c_{dq}^{1-}, c_{dq}^{h+}, c_{dq}^{h-}$. 经过下垂控制器, 输出角频率 ω 便可获得. 通过坐标变换, 将 $c_{dq}^{1-}, c_{dq}^{h+}, c_{dq}^{h-}$ 换到 $\alpha - \beta$ 参考下, 电压不平衡及谐波补偿参考量 $v_{\text{comp_DG}}^*$ 可通过求和结果获得.

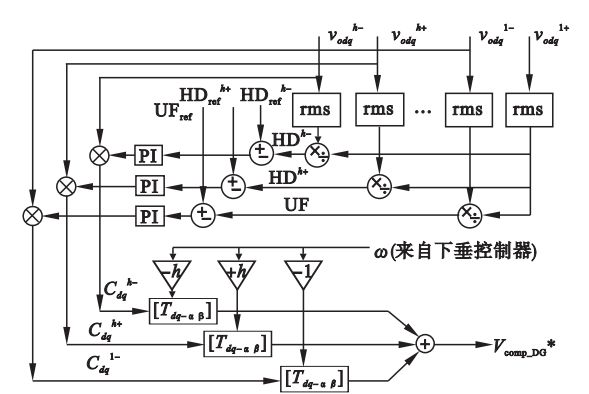


图 3 电压不平衡及谐波补偿控制器结构图
Fig. 3 Diagram of the controller for voltage unbalance and harmonic compensation

为改善下垂控制器的性能, 控制器往往引入虚拟电感, 其对有功和无功功率的解耦起到了良好效果, 利于有功和无功功率更准确分配, 同时在一定程度上增强了系统的稳定性. 基于以上考虑, 本文扩展了虚拟电感, 在原有虚拟电感环中, 加入了基波负序和主要谐波正序、负序对应的虚拟电阻, 从而增强了控制器对谐波分量的补偿控制

效果.

2.3 仿真实验及其分析

为了验证所提出的能源互联网在公共连接点处的谐波补偿及电压不平衡控制策略的有效性及正确性, 在 MATLAB/SIMULINK 软件平台下, 搭建了相关仿真模型, 对提出的补偿方法进行仿真, 并给出了相关结果分析.

图 4 为仿真测试系统结构图. 设置了三台分布式发电系统 (DG1, DG2 和 DG3); 同时, 在 PCC 处设置非线性负荷以及线性三相不平衡负荷. 这里需要指出的是, 各分布式发电单元及能源路由器变换器的直流侧均采用直流电源供电.

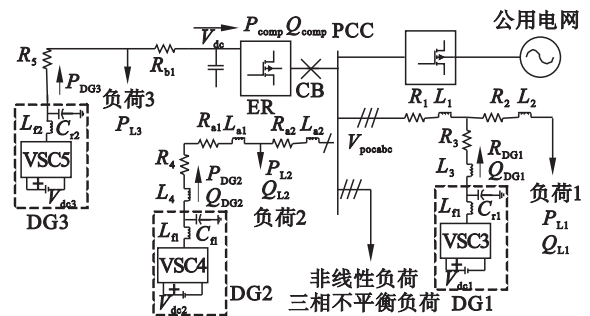


图 4 仿真测试系统结构图
Fig. 4 Diagram of the test system

图 5 和图 6 分别为补偿前后互联连接点 PCC 处的三相电压波形. 图 5 中, 因单相分布式发电系统、不平衡负荷及非线性负荷的存在, PCC 处的电压波形不平衡且发生了畸变; 图 6 中, 加入谐波

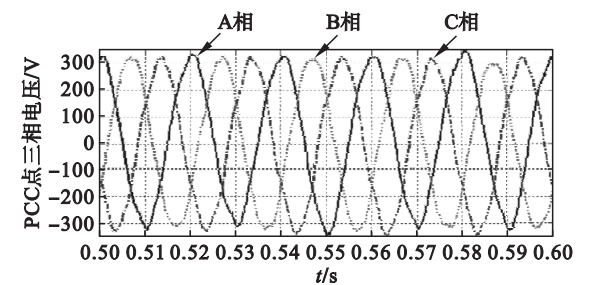


图 5 补偿之前的公共连接点电压波形
Fig. 5 Voltage waves of PCC point before compensation

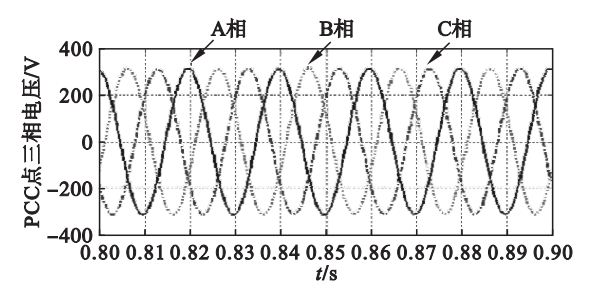


图 6 补偿后的公共连接点电压波形
Fig. 6 Voltage waves of PCC point after compensation

补偿及三相不平衡控制器后,改善了公共连接点处的电压波形,通过计算,可知电压不平衡度及其 3 次谐波畸变率分别降低了 3.8% (从 4% 降到 0.2%) 和 3.59% (从 3.8% 改善到 0.21%)。

图 7 为补偿前能源路由器的 ER 的输出电压波形图,图 8 为补偿后能源路由器的 ER 的输出电压波形图. 从这两张图中发现,补偿后较补偿前,ER 的电压质量反而下降了,补偿后电压不平衡并发生畸变,而补偿前三相电压平衡且谐波含量小. 这一结果说明,为改善 PCC 处的电压波形质量,方法牺牲了 ER 的输出电压波形质量. 这一缺点在文献 [13] 中也得到了体现. Savaghebi 等^[13]为使每个 DG 都能补偿电压的不平衡和谐波,引入低带宽通讯,将控制信号分发至各个 DG 单元控制器中. 为保证公共连接点的电压质量,每个分布式电源的输出电压波形都会被影响,是这种方法的明显缺点. 这无法满足 DG 的输出端接有本地三相平衡的非线性或线性负荷的情况,因本地负荷的安全稳定运行会被低电压质量影响. 为此,在同一仿真测试系统上也做了相关仿真并与所提出补偿策略做比较,其仿真结果与分析如下:图 9 为采用文献 [13] 所提出的方法得到的 DG1 的输出电压波形,发现电压三相不平衡且发生了畸变(其中,谐波畸变率为 4.37%,电压不平衡度为 7.26%)。图 10 为采用本文的补偿策略得到的 DG1 的输出电压电流波形(其中,谐波畸变

率为 0.86%,电压不平衡度为 1.02%),由此,三相电压质量良好。

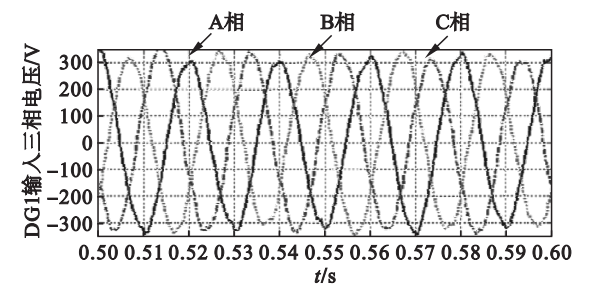


图 9 采用文献[13]的方法补偿后的 DG1 的输出电压波形
Fig. 9 Output voltage waves of DG1 after the compensation method adopted in Ref. [13]

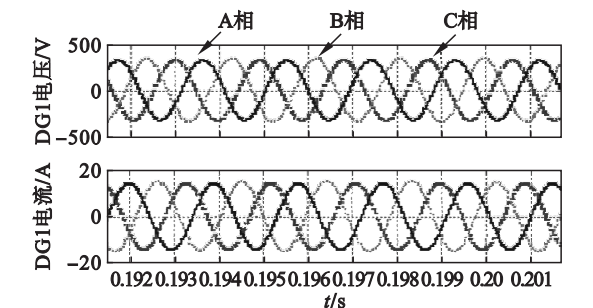


图 10 采用本文方法补偿后的 DG1 的输出电压电流波形
Fig. 10 Output voltage waves of DG1 after the compensation method presented in this paper

3 结 语

本文主要讨论了能源路由器在解决能源互联网电能质量问题方面的应用,针对其三相不平衡及谐波问题,省去低带宽通信连线和不损害其他 DG 的输出电压质量,提出了一种利用能源路由器对 PCC 处的三相不平衡及谐波补偿策略。

参考文献:

[1] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the Energy Internet[J]. *Proceedings of IEEE*, 2011, 99(1): 133 – 148.

[2] 杨方,白翠粉,张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3495 – 3502. (Yang Fang, Bai Cui-fen, Zhang Yi-bin. Research on the value and implementation framework of Energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3495 – 3502.)

[3] Guerrero J M, Chandorkar M, Lee T, et al. Advance control architectures for intelligent microgrids —part I: decentralized and hierarchical control. part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids [J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1254 – 1270.

(下转第 788 页)

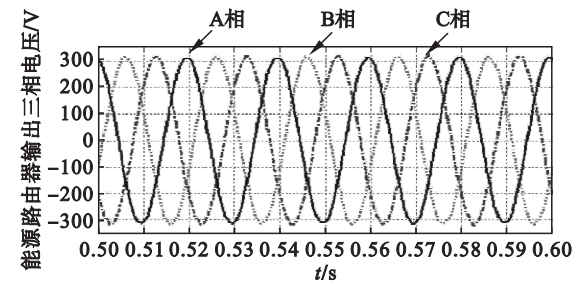


图 7 补偿前的能源路由器 VSC2 的输出电压波形
Fig. 7 Output voltage waves of energy router VSC2 before compensation

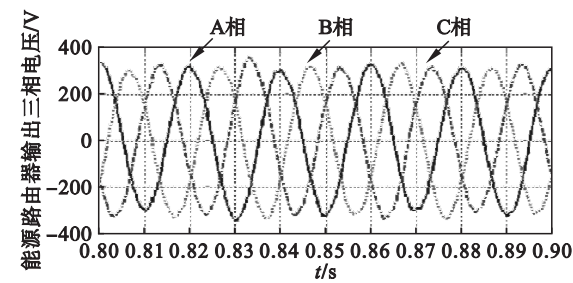


图 8 补偿后的能源路由器 VSC2 的输出电压波形
Fig. 8 Output voltage waves of energy router VSC2 after compensation