

用并网逆变器实现有源滤波与无功补偿功能的研究

刘 聪, 戴 珂, 张树全, 段科威, 康 勇

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 对用分布式发电系统中的并网逆变器实现有源滤波与无功补偿功能进行了研究, 提出一种基于负载电流检测的实现方案。检测到的三相负载电流经 abc/dq 变换至同步旋转坐标下, 对其 d 、 q 轴分量分别进行高通和低通滤波并提取出负载电流的谐波与无功电流分量, 然后与基波有功电流指令合成, 得到逆变器的输出电流指令。电流跟踪控制采用“PI+重复控制”策略, 保证了对输出电流指令的准确与快速跟踪。仿真结果表明, 并网逆变器可以在输送有功电流的同时进行无功和谐波补偿, 有助于电网电能质量的改善。

关键词: 并网逆变器; 有源滤波; 无功补偿; 分布式发电

中图分类号: TM714.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)06-0034-05

Research on the Implementation of Active Filtering and Reactive Compensation Functions with Grid-connected Inverter

LIU Cong ,DAI Ke ,ZHANG Shu-quan ,DUAN Ke-wei ,KANG Yong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of

Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: It researches on the implementation of active filtering and reactive compensation with grid-connected inverter in distributed generation system, and proposes a solution based on load current detection. The detected three phase load currents are transformed to the synchronous coordinate frame through abc/dq transformation, the harmonic and reactive components are extracted by a high-pass or low-pass filter from the d -axis and q -axis components. Then the output current references of the inverter are obtained by synthesizing the extracted currents with the fundamental active current. Output current control is realized by PI+RP compound control algorithm, which ensures the accurate and quick following to the reference. Simulation results show that the inverter could compensate reactive and harmonic currents and transfer the active power at the mean time, which is helpful to power quality improvement.

Key words: grid-connected inverter; active filtering; reactive compensation; distributed generation

0 引言

以风能、太阳能等为代表的可再生能源为解决传统能源困境提供了一条切实可行的途径^[1], 其分布式发电技术近年来得到了广泛的关注与应用^[2-6]。传统的分布式发电技术主要关注有功功率的高效管理以及并网

逆变器高品质有功电流输出的实现^[2,6-7]; 而风能与太阳能等可再生能源随机性与间歇性强, 在容量因子较低的情况下(太阳能光伏发电的容量因子仅为21%~26%, 风力发电的容量因子约为35%~45%^[1]), 并网变换器不能运行在额定输出工况, 输出容量利用率低, 同时系统整体效率随着输出功率的降低而显著下降^[2]。增加储能装置可以在一定程度上实现能量与功率的平衡, 但会受到诸如功率密度、成本、地理位置等因素的制约^[6,8], 因此, 探索能充分利用并网变换器剩余容量的方法具有较大的现实意义。

收稿日期: 2011-05-10

作者简介: 刘聪(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为谐波抑制及无功补偿。

基金项目: 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》(DREG2010009)

随着各种电力电子非线性负载在电网中的广泛应用,由此引发的无功和谐波问题得到了广泛重视。传统的解决方法是采用无源或有源补偿装置,如无源电力滤波器^[9]、有源电力滤波器(APF)^[10]、静止无功补偿器(STATCOM)^[11]等,但成本较高,一般仅用于功率较大的负载或对电能质量要求特别高的应用场合。随着分布式发电在电网中渗透率的提高,开发并网逆变器的剩余容量用于实现电能质量调节功能开始得到人们的关注^[5,12]。文献[5]探讨了分布式光伏逆变器发送无功功率的相关问题,文献[12]对分布式发电系统中单相逆变器的谐波与无功补偿功能进行了初步研究。

本文对三相三线系统中的分布式发电并网逆变器进行研究,分析用其实现有源滤波与无功补偿功能的可行性,提出了一种基于负载电流检测的实现方案。

1 并网分布式发电系统

典型的并网分布式发电系统如图1所示,能量提取单元(如风机、光伏电池)将可再生能源转化为电能,通过能量管理与转换单元进行最大功率点跟踪,并将未经处理的较低的直流电压或不稳定的交流电压变换为恒定的直流母线电压 V_{dc} ,最后经并网逆变器转化为频率恒定的交流电压,将电能输送给电网或直接供给本地负载。

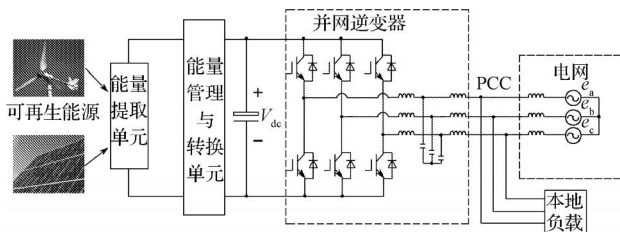


图1 并网分布式发电系统示意图

Fig. 1 Configuration diagram of the grid-connected distributed generation system

作为可再生能源与电网的接口,并网逆变器是能量传输的关键环节,在分布式发电系统中起着重要的作用。逆变器主电路一般采用全控型三相全桥结构,直流侧与直流母线相连接,交流侧通过LCL滤波器(滤除开关纹波)接入电网。并网逆变器(图1)与并联型APF主电路结构一致,不同之处在于一般分布式发电系统中并网逆变器只负责输送基波有功电流,而APF只进行负载谐波和无功电流的补偿。本文的研究目标是使并网逆变器在传输有功电流的同时实现无功与谐波补偿,即将电能输送与电能质量调节功能集于一体。

2 实现方案

2.1 实现方案

为了使分布式发电并网逆变器同时具备有功传输能力及无功与谐波补偿功能,本文提出一种基于负载电流检测的实现方案(图2)。除并网分布式发电系统外,图2还包括电网和本地负载两部分:电网用理想电压源 V_s 串联等效阻抗 L_s 来表示,电网电流在等效阻抗上形成的压降会反映在PCC点电压 u 的变动上;本地负载采用谐波源与无功源组合的形式,谐波源为三相不控整流桥接阻感性负载,无功源为纯电感,二者共同消耗的电流合成负载电流 i_L 。并网逆变器通过检测 i_L 提取谐波与无功电流指令,同时检测电压 u 以实现锁相,逆变器输出电流 i_o 反馈至控制系统以实现电流闭环控制。分布式发电系统的能量采集与管理部分通过功率平衡关系为并网逆变器提供输出有功电流指令,同时维持 V_{dc} 的稳定。

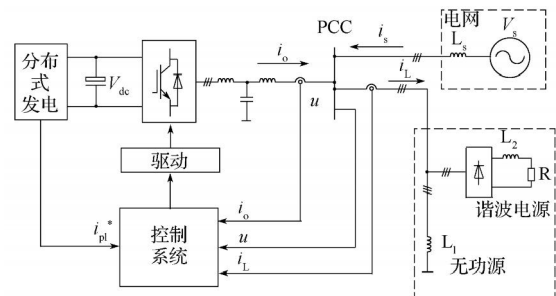


图2 基于负载电流检测的实现方案

Fig. 2 Scheme based on load current detection

2.2 控制系统

图3示出并网逆变器的控制系统。三相负载电流 i_L 经abc/dq同步坐标旋转变换得到d轴分量和q轴分量,基波电流经abc/dq变换后成为直流量,经低通滤波器LPF提取, i_L 减去这一直流量即得到谐波成分 i_{Lhd}^* 和 i_{Lhq}^* 。q轴分量的低通滤波支路也可以断开,这时检测到q轴分量中除了谐波外还包含基波无功电流成分。逆变器输出电流 i_o 经abc/dq变换实现dq轴下的电流闭环控制,其有功成分 i_{od1} 用于跟踪控制基波有功电流指令。

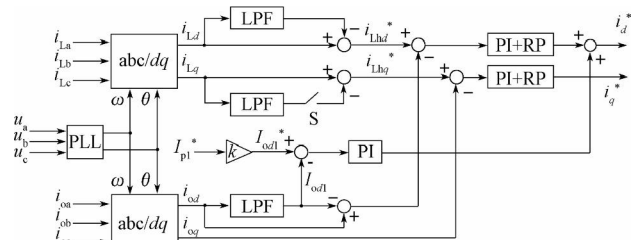


图3 控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of the control system

由于在 dq 坐标系下基波电流为直流量,因此进行简单的PI调节即可实现无静差控制。谐波电流经基波同步旋转坐标变换后仍为交流量,故单纯采用PI调节无法实现无静差控制。

重复控制为周期信号的跟踪控制提供了有效的解决途径,其基本思想源于控制理论中的内模原理:假定前一基波周期中出现的畸变将在下一基波周期的同一时间重复出现,控制器根据每个开关周期给定与反馈信号的误差来确定所需的校正信号,然后在下一基波周期同一时间将此信号叠加在原控制信号上,以消除以后各周期中将出现的重复性畸变^[10]。重复控制具有非常好的稳态性能,其主要弱点是动态性能差,在干扰出现后的一个参考周期内,系统对干扰不产生任何调节作用,此时系统近乎处于开环控制状态,消除干扰对输出的影响至少需要一个参考周期。

文献[10]利用PI控制器与重复控制器相结合对APF输出电流性能进行了改进,取得良好的效果。本文对于逆变器输出谐波电流的指令跟踪也采用“PI+重复控制”的策略,PI控制器和重复控制器并联作用在控制系统的前向通道中,共同对系统的输出产生影响:当系统处于稳定运行状态,系统的跟踪误差小,PI控制器基本不起作用,主要由重复控制器控制系统运行;当输出电流指令出现大的波动时,PI控制器迅速感应到跟踪误差的突变并产生调节作用,而重复控制器在一个周期后才能产生调节作用使跟踪误差按衰减因子迅速减小。2种控制互相协调,取长补短,实现指令跟踪快速性与准确性的统一。

2.3 容量限制问题

并网逆变器的输出容量受开关器件的电流耐量限制,因而在应用时需要限制其输出电流。设并网逆变器的额定视在输出功率为 s ,某一时刻需要传输的基波有功功率为 p_g ,则此时所能传输的无功功率 q 应满足式(1)要求,容量限制关系如图4所示。

$$|q| \leq \sqrt{s^2 - p_g^2} \quad (1)$$

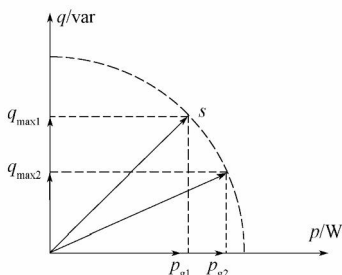


图4 容量限制算法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the capacity limitation algorithm

由图4可见,逆变器的输出视在功率为恒定值,当输出有功功率为 p_{g1} 时,其输出最大无功功率为 q_{max1} ;输出有功功率增大到 p_{g2} 时,输出最大无功功率减小为 q_{max2} 。注意,无功功率 $|q|$ 包含基波无功与谐波功率两部分,对应的电流关系为:

$$\sqrt{I_{q1}^2 + I_h^2} \leq \sqrt{I^2 - I_{p1}^2} \quad (2)$$

式中: I_{q1} ——基波无功电流有效值; I_h ——谐波有效值; I ——输出电流有效值; I_{p1} ——基波有功电流有效值。

实际应用时,可根据式(2)限制输出电流。比如,分布式发电输出有功功率较大时,及时减小无功与谐波电流指令,保护并网逆变器以免过流损坏;输出有功功率较小时,增加其无功与谐波补偿能力,以充分利用并网逆变器的容量。根据并网逆变器的容量不同以及开关频率的差异,灵活调整容量限制策略和补偿策略,以实现最优化的电能质量调节效果。本文的主要目标是实现有源滤波与无功补偿功能,因而仿真时对逆变器的输出容量不作限制。

3 仿真结果

为了验证所提出的方案,利用Matlab/Simulink构建仿真电路模型(图2)。电网采用380 V/50 Hz三相三线对称电源,系统等效阻抗 $L_s=200 \mu\text{H}$ 。本地负载由谐波源和无功源组成,谐波源为三相不控整流桥带阻感性负载, $L_2=4 \text{ mH}$, $R=4 \Omega$;无功源为纯电感, $L_1=30 \text{ mH}$ 。为了达到较好的谐波滤除效果,并网逆变器直流侧电压 V_{dc} 设定为700 V,IGBT开关频率设为9.6 kHz。光伏发电实际应用时, V_{dc} 可能难以达到700 V,故需要预先进行升压变换。此外,功率较大的并网变换器开关频率可能达不到9.6 kHz水平,这对于谐波滤除的效果会有一定的影响,但是可以选择性地对含量较大的较低次特征谐波进行滤除。

图5示出A相负载电流 i_{La} 的波形,其基波有效值为126.2 A,相角为 -38.7° , $\text{THD}_i=22.88\%$ 。通过计算可知:基波有功电流为98.5 A,基波无功电流为78.9 A。PCC处相电压的基波有效值为214.2 V,比空载时有效值(219.4 V)跌落2.37%。

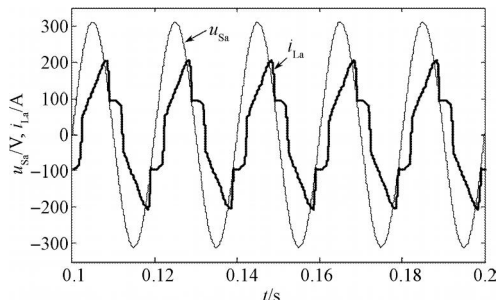


图5 负载电流与电网电压波形

Fig. 5 Waveforms of load current and grid voltage

通过改变并网逆变器输出电流指令的构成,使其工作在不同的电流输出模式,通过分析不同输出模式下电网电流(A相)以及PCC点电压的变化,以检验并网逆变器是否达到设定的电能质量调节功能。

3.1 仅输出有功电流

设定并网逆变器仅输出有功电流,并设置有功电流指令为40 A,其仿真波形如图6所示。图6(a)中,电网电流 i_{sa} 基波有效值为98.82 A,相角为 -56.7° ,总谐波失真率THD为25.01%,通过计算得出基波有功电流为54.25 A。可见使用并网逆变器后,电网所需传输的有功电流大为减小,但由于谐波电流并未得到补偿,电网电流THD反而有所上升;无功电流也未得到补偿,故PCC点电压基波有效值仍为214.2 V,与并网逆变器未工作时相比未得到改善。图6(b)中,逆变器输出电流 i_{oa} 基波有效值为40.14 A,相角为 0.1° ,THD为2.9%,实现了对有功电流指令的精确跟踪。

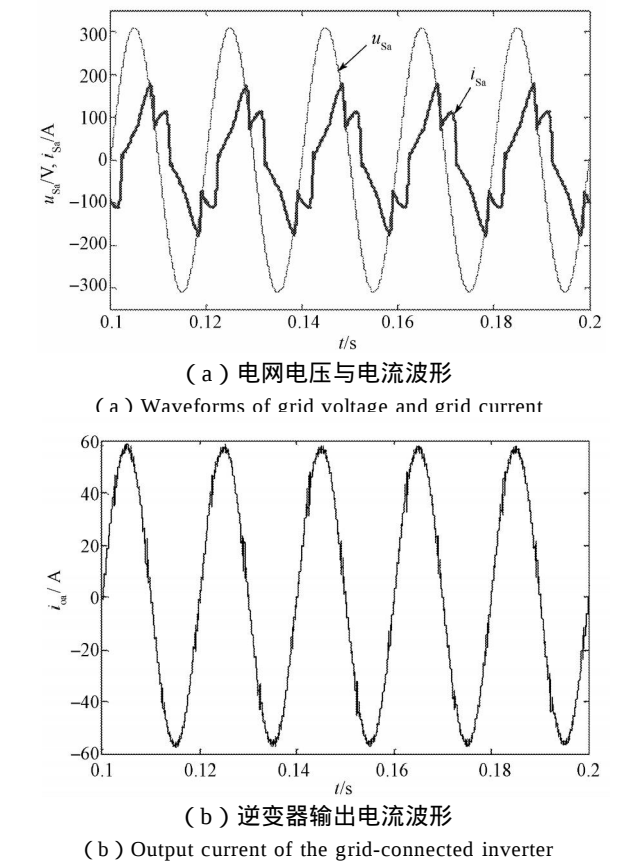


图6 仅输送有功电流情况下的仿真结果
Fig. 6 Simulation results while active current is transferred only

3.2 输出有功电流并进行谐波补偿

设定并网逆变器输出有功电流并同时谐波补偿,有功电流指令仍设置为40 A,其仿真结果如图7所示。图7(a)中,谐波补偿后电网电流 i_{sa} 基波有效值为95.91 A,相角为 -53.9° ,THD为4.16%,PCC点电压基波有效值为214.6 V。电网电流谐波含量虽明显下降,但仍

含有无功电流,对PCC点电压跌落的改善不大。图7(b)示出逆变器输出电流 i_{oa} 波形,可以看出,输出电流含有大量的谐波成分。

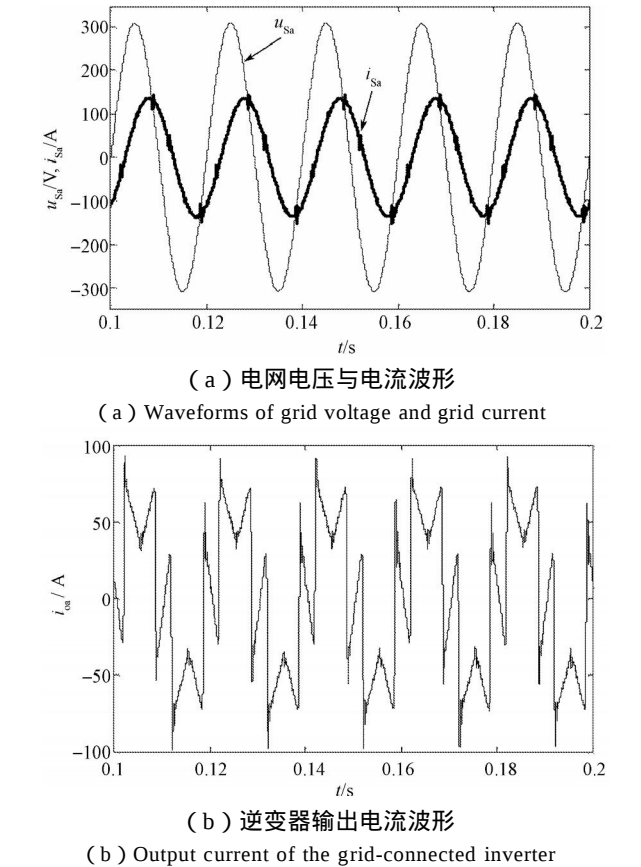
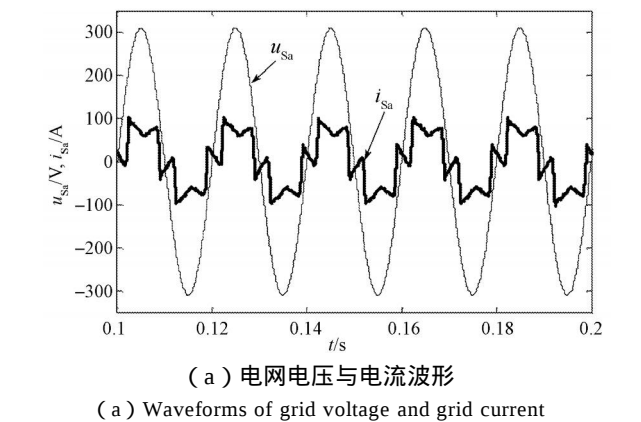
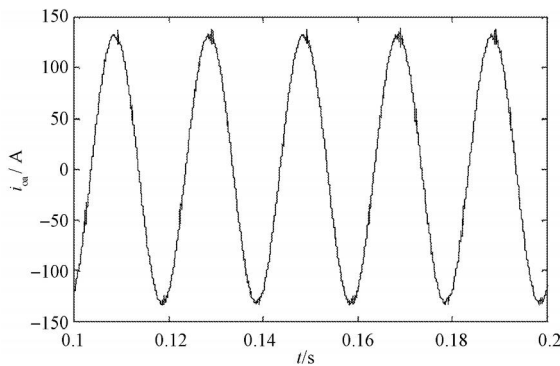


图7 同时进行有功输出与谐波补偿时的仿真结果
Fig.7 Simulation results while active current is transferred and harmonic current is compensated

3.3 输出有功电流并进行无功补偿

设定并网逆变器输出有功电流并同时无功补偿,有功电流指令设置为40 A。图8(a)示出无功补偿后仿真结果,电网电流 i_{sa} 基波有效值为56.54 A;相角为 0° ;PCC点电压基波有效值为219.4 V,抑制PCC点电压跌落效果明显;电网电流THD为44.72%,达到最大值。图8(b)中,逆变器输出电流 i_{oa} 基波有效值为93.54 A,相角为 -64.6° ,THD为1.44%,输出波形质量较好。





(b) 逆变器输出电流波形

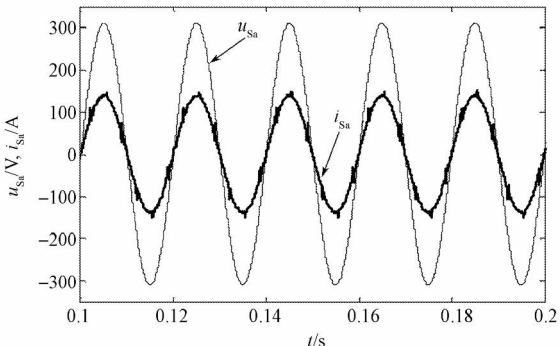
(b) Output current of the grid-connected inverter

图 8 同时进行有功输出与补偿无功时的仿真波形

Fig.8 Simulation results while active current is transferred and reactive current is compensated

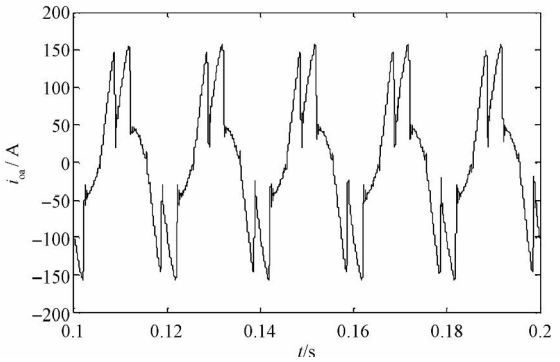
3.4 仅补偿谐波与无功

设定并网逆变器有功电流指令为0且同时进行谐波补偿与无功补偿,此时并网逆变器仅相当于并联型APF,仿真结果如图9所示。图9(a)中,补偿后电网电流 i_{sa} 基波有效值为97.76 A,相角为 0° ,THD为4.49%,PCC点电压基波有效值为219.5 V。可见采用这种工作模式,电网电流谐波含量低,抑制PCC电压跌落效果较好。图9(b)中,逆变器输出电流 i_{oa} 基波有效值为80.33 A,相位为 -90° ,THD为36.3%。



(a) 电网电压与电流波形

(a) Waveforms of grid voltage and grid current



(b) 逆变器输出电流波形

(b) Output current of the grid-connected inverter

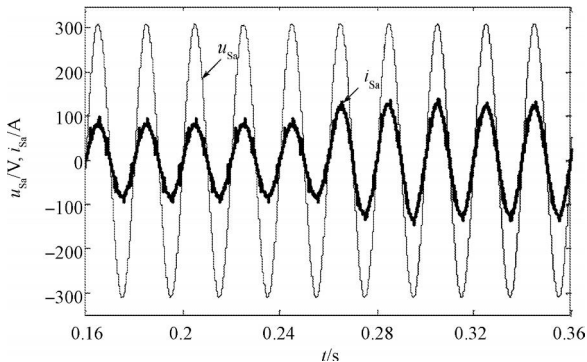
图 9 同时补偿谐波与无功情况下的仿真结果

Fig.9 Simulation waveforms while harmonic current and reactive current are compensated

3.5 瞬态过程仿真结果

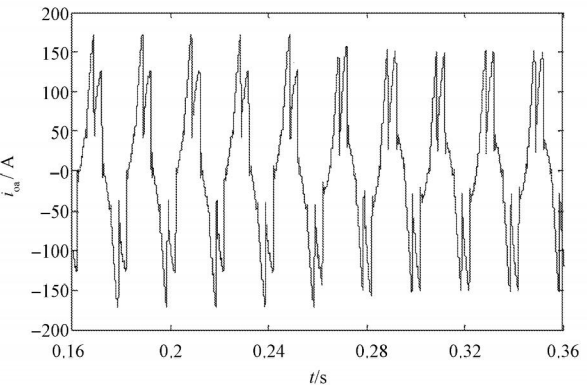
瞬态过程仿真主要针对有功电流指令突变进行,模拟分布式发电系统的功率波动状况,如风力发电装置中风速变化引起风机输出功率的变化,光伏发电装置中太阳光照强度的变化引起功率的波动等。

并网逆变器设定在输送有功功率并同时补偿无功与谐波的工作模式,图10示出有功电流指令由40 A突变至10 A的瞬态过程。开始,有功电流指令为40 A,电网电流基波有效值为58.52 A,THD为7.43%;0.26 s时刻,有功电流指令突变为10 A,稳定后电网电流基波有效值变为88.34 A,THD为4.25%。指令变化前后,PCC点电压基波有效值均稳定在219.5 V。由图10可以看出,逆变器对指令跟踪的响应速度较快,指令突变后系统很快便达到了稳定状态。



(a) 电网电压与电流波形

(a) Waveforms of grid voltage and grid current



(b) 逆变器输出电流波形

(b) Output current of the grid-connected inverter

图 10 瞬态过程仿真结果

Fig.10 Simulation result in the transient process

4 结语

本文利用分布式发电系统中的并网逆变器实现有源滤波与无功补偿功能,采用基于负载电流检测方案,通过同步旋转坐标变换获得谐波与无功电流指

(下转第57页)

[9] 肖湘宁,徐永海,刘昊.混合型有源电力补偿技术与实验研究[J].电力系统自动化,2002,26(3):39-44.

[10] 陆海峰,谭瑞民,瞿文龙.减小死区影响的准单极性PWM调制方法[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(10):1297-1300.

[11] 刘魏宏,朱建林,邓文浪,等.基于交—直—交型矩阵变换器的多驱动系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2006,26(6):111-115.

[12] 唐卓尧,任震.并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J].中国电机工程学报,2000,20(5):25-29.

[13] 郭有贵,朱建林,喻寿益.新型拓扑结构的交—交矩阵变换器建模法浅析[J].系统仿真学报,2005,17(7):1573-1576.

[14] Dirk D,Joep J,Rik W D.A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment[J]. IEEE Trans. on Power Electronics,2001,16(6):821-827.

[15] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社.1998.

[16] 陈峻岭,姜新建,朱东起,等.基于遗传算法混合有源滤波器参数的多目标优化[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(1):5-8.



(上接第38页)

与基波有功电流指令合成控制逆变器的输出电流指令。输出电流控制采用“PI+重复控制”方式,保证了对输出电流指令的准确快速跟踪。仿真模拟了逆变器各种输出电流工作模式,结果表明,具备无功和谐波补偿功能的逆变器可以较好地改善电网电能质量,无功补偿可以稳定PCC电压,减小电压波动,而谐波补偿可以减小注入电网的谐波含量。受分布式发电并网现有标准的限制,注入谐波与无功电流的并网逆变器在现阶段并不能投入实际应用,但随着可再生能源的大量应用和智能电网的进一步发展,该技术将有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] U.S. Department of Energy. 2009 Renewable Energy Data Book [EB/OL]. 2010-08 [2011-05-10]. http://www1.eere.energy.gov/maps_data/pdfs/eere_databook.pdf.

[2] Haibing H, Wisam A, Nasser H, et al. Efficiency Improvement of Grid-Tied Inverters at Low Input Power Using Pulse-Skipping Control Strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12):3129-3138.

[3] Zhigang L, Rong G, Jun L, et al. A High-Efficiency PV Module-Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):897-909.

[4] Bo Y, Wuhua L, Yi Z, et al. Design and Analysis of a Grid-

Connected Photovoltaic Power System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4):992-1000.

[5] Konstantin T, Petr S, Scott B, et al. Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6):1063-1073.

[6] Haihua Z, Tanmoy B, Duong T, et al. Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):923-930.

[7] Xuehua W, Xinbo R, Shangwei L, et al. Full Feedforward of Grid Voltage for Grid-Connected Inverter With LCL Filter to Suppress Current Distortion Due to Grid Voltage Harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12):3119-3127.

[8] Bradford P, Chet S. The Role of Energy Storage in Development of Smart Grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6):1139-1144.

[9] Das J. Passive Filters-Potentialities and Limitations [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2004, 40(1):232-241.

[10] 魏学良,戴珂,方昕,等.三相并联型有源电力滤波器补偿电流性能分析与改进[J].中国电机工程学报,2007,27(28):113-119.

[11] Mohamed S, Birgitte B, Mansour H. Novel STATCOM Controller for Mitigating SSR and Damping Power System Oscillations in a Series Compensated Wind Park[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):429-441.

[12] Radu I, Leonardo R, Daniel R, et al. Enhanced Power Quality Control Strategy for Single-Phase Inverters in Distributed Generation System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):798-806.