

光伏并网逆变器电流控制技术研究

张彦¹, 赵义术¹, 余蜜², 熊健²

(1.山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2.华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对在光伏并网系统中采用单纯 PI 控制的缺点,提出了增加电网电压前馈控制来改善并网电流波形。分析了引入电网电压前馈控制会减小并网电流与电网电压之间相位差并降低并网电流总谐波畸变系数的原理。仿真和实验结果证实,电网电压前馈补偿可有效改善并网电流波形,同时保证逆变器的并网电流与电网电压同频同相。

关键词:逆变器; 控制 / 光伏系统; 电压前馈

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2009)05-0029-03

Research on Current Control of Photovoltaic Grid-connected Inverter

ZHANG Yan¹, ZHAO Yi-shu¹, YU Mi², XIONG Jian²

(1.Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;

2.Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In photovoltaic grid-connected system, the method of adding voltage feed-forward to improve the shape of grid-connected current wave is presented, the reason for the introduction of the net voltage feed-forward decreasing the phasic difference between grid-connected current and net voltage and reducing the THD of grid-connected current is analyzed. It is confirmed that the net voltage feed-forward compensation can improve grid-connected current available by the results of simulations and experiments, keep the current frequency and phase synchronous to the grid.

Keywords: inverter; control / photovoltaic system; voltage feed-forward

Foundation Project: Supported by the Science and Technology Program of Shandong Electric Power Corporation (No. 2008A-03-1)(No.2009A-06-1)

1 引言

在能源日益紧缺和环境严重污染的今天,太阳能的利用备受重视,光伏并网发电也因此得到了快速的发展。并网逆变器作为光伏发电系统与电网接口设备,其控制技术成为研究的热点之一。由于光伏并网逆变器受到多种非线性因素的影响,它输出的并网电流波形畸变比较严重。为了使并网逆变器具有良好的动、静态性能,并且能够输出高质量的电流以降低对电网的影响,就必须消除这些不利因素。其中电网电压周期性扰动是导致光伏并网逆变器并网电流畸变的一个重要因素,而采用电网电压前馈补偿控制^[1]则可以解决该问题。

在介绍光伏并网逆变器结构及其数学模型的基础上,分析了并网电流控制方法,并给出控制器的设计方法和步骤;详细分析了引入电网电压前馈来改善系统抗扰性能的原理;最后通过仿真和实验对分析进行了验证。

2 单相光伏并网逆变器原理

2.1 逆变器结构

单相光伏发电系统的拓扑结构如图 1 所示。系统

采用双级式拓扑^[2-3],由太阳能光伏阵列经过 DC/DC 升压变换器得到逆变器直流侧额定电压为 380 V。

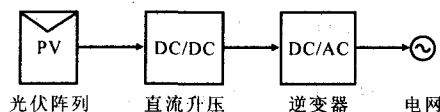


图 1 单相光伏发电系统拓扑结构

图 2 示出逆变器并网控制框图。逆变器输出端经过 LC 滤波接到电网上,通过合适的控制技术使并网电流成为与电网电压同频同相的正弦波,系统控制算法由 TMS320LF2406 型 DSP 实现。将并网电流给定的幅值基准乘以由锁相环控制得到的电网电压相位单位信号后,作为并网电流基准给定 i_{ref} ,再通过电流环 PI 控制和电网电压前馈控制,生成触发脉冲信号来驱动开关管。

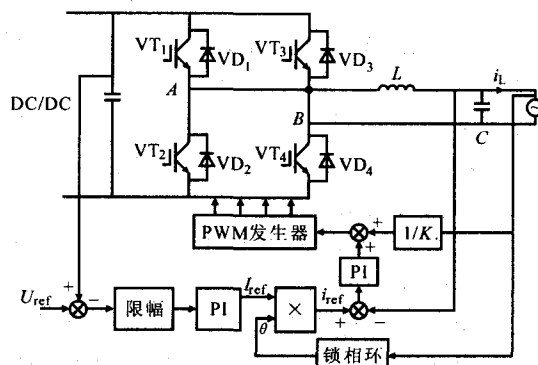


图 2 逆变器并网控制框图

基金项目: 山东电力集团公司科技项目(2008A-03-1)(2009A-06-1)

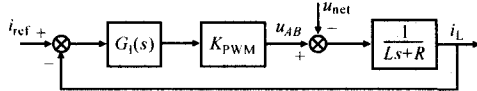
定稿日期: 2008-12-29

作者简介: 张彦(1985-),女,山东人,工程师,研究方向为新能源并网发电。

系统采用 LC 并网滤波器结构, 将负载接到 A 点。独立运行时即采用常规的 LC 滤波方式, 进行并网时, 由于电网含有电感, 实际上是相当于 LCL 滤波, 且电感的值很小(主要用来滤除高频分量), 所以在逆变器并网控制器设计过程中可以忽略。由于是与电网并联, 所以电容作用也可暂时忽略。

2.2 模型分析及控制器设计

因逆变器开关频率为 20 kHz, 远远高于电网频率, 为了便于分析, 可忽略开关频率对系统的影响, 将 PWM 逆变单元近似为一个增益环节 K_{PWM} 。图 3 示出并网电流闭环控制框图。



R 为电感 L 的等效串联电阻; u_{net} 为电网电压
 $G_1(s)$ 为 PI 控制器的传递函数; i_L 为闭环并网电流

图 3 并网电流闭环控制框图

PI 控制器的传递函数^[4]为:

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

根据图 3 可得逆变器在 i_{ref} 和 u_{net} (视为扰动) 共同作用下 i_L 的传递函数为:

$$I_L(s) = \frac{K_{PWM}(K_i + K_p s)}{s^2 L + (R + K_{PWM} K_p) s + K_{PWM} K_i} I_{ref}(s) - \frac{s}{s^2 L + (R + K_{PWM} K_p) s + K_{PWM} K_i} U_{net}(s) \quad (2)$$

电网电压扰动下并网电流的误差量为:

$$I'(s) = \frac{s}{s^2 L + (R + K_{PWM} K_p) s + K_{PWM} K_i} U_{net}(s) \quad (3)$$

把滤波电感 $L=2\text{ mH}$, $C=4.4\text{ }\mu\text{F}$, $K_{PWM}=380$, $R=0.1\text{ }\Omega$ 代入式(2), 并利用常用的极点配置方法可求得 PI 参数: $K_p=0.03$, $K_i=84.21$ 。根据该参数给出并网电流与给定电流标准值的传递函数及并网电流与电网电压的传递函数波特图。

可知, 并网电流在 $1\sim 1000\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 频段内, 幅值增益基本为 1, 相角基本为 0。在该频段内, 并网电流可完全跟随给定电流。在角频率为 $314\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 并网电流相对电网电压的增益为 -40 dB , 由相频曲线可见此时相位角为 83.5° , 相对于交流基波电压 220 V 将产生 2.2 A 的无功电流, 从而影响并网电流的功率因数。

在 $1\sim 4000\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 并网电流对电网电压的增益逐渐增大, 即随着频率的提高, 电网电压谐波将产生较大的电网电流谐波, 而实际电网中并非只有基波, 而是含有多次谐波, 因此并网电流会受电网电压谐波的影响使其 THD 升高。

为了减小 i_L 与电网电压之间的相位差, 使电流更好地跟踪电网电压, 并且改善 i_L 的 THD , 考虑在控制器中加入电网电压前馈补偿, 控制框图如图 4 所示。

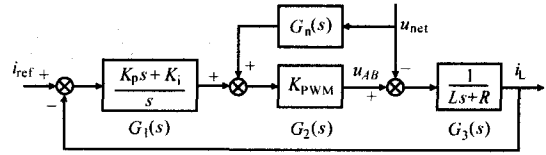


图 4 电网电压前馈控制框图

加入电网电压的前馈控制后, u_{net} 作用下的误差可表示为:

$$I'_e(s) = \frac{G_3(s)[G_2(s)G_n(s)-1]}{1+G(s)} U_{net}(s) \quad (4)$$

如取 $G_n(s)=1/G_2(s)=1/K_{PWM}$, 则有 $I'_e(s)=0$ 。由此可见, 通过电网电压的前馈控制, 可使电网电压对并网电流的影响为零, 从而在理论上达到了全补偿的要求。此时 i_L 的传递函数变为:

$$I_L(s) = \frac{K_{PWM}(K_i + K_p s)}{s^2 L + (R + K_{PWM} K_p) s + K_{PWM} K_i} I_{ref}(s) \quad (5)$$

比较式(2), (5)并计算可知, 加入电网电压前馈后消除了因电网扰动给并网电流带来的扰动量 $I'(s)$, 从而大大减小了并网电流与电网之间的相位差。假设电网电压只有基波, 由式(2), (5)可知, 采用电网电压前馈对并网电流的 THD 将无影响。但实际电网中存在较多的谐波, 加入电网电压前馈后能大大降低电流的 THD , 从而改善了电流质量^[5]。

3 仿真和实验结果

3.1 仿真结果

基于电流闭环 PI 控制和电网电压前馈控制采用 Matlab 进行仿真, 仿真参数为: 输入电压 380 V , 电网电压有效值 220 V , 电网电压频率 50 Hz , 滤波电感 $L=2\text{ mH}$, 滤波电容 $C=4.4\text{ }\mu\text{F}$, 给定电流峰值 17 A , PI 控制器参数 $K_p=0.03$, $K_i=84.21$ 。假设电网电压无谐波, 加入电网电压前馈前后进行仿真。可知, 并网电流滞后电网电压一个相位角, 与上述分析基本一致。加入电网电压前馈后, 并网电流与电网电压之间的相位差明显减小, 提高了并网电流的功率因数, 使电流能更好地跟踪市电。

由于实际电网电压中存在较多的谐波, 因此仿真中通过 150 Hz , 250 Hz , 350 Hz 3 种频率正弦电压源的叠加来模拟电网中的 3, 5, 7 次低频谐波成分, 选择不同的畸变系数, 从而得到不同的电压总谐波系数, 通过仿真波形来观察电压前馈控制对并网电流 THD 的影响。当电网电压总谐波畸变率为 4.55% (其中 3, 5, 7 次谐波畸变率分别占 1.93% , 2.57% , 3.22%) 时, 未加电压前馈时并网电流的 $THD=5.65\%$, 加入电压前馈后的 $THD=1.22\%$ 。

随着电网电压 THD 的增大, 并网电流受其影响, 其 THD 值也同样变大。通过比较可知, 加入电网电压前馈后并网电流 THD 的值减小了。由于电网电压前馈的引入, 使得系统动态性能变好, 能够抵消电

网扰动对并网电流的影响,同时,引入的电网电压也可在一定程度上抵消电网侧的谐波电压,使并网电流质量变好。

3.2 实验结果

针对上述方案,采用 TMS320LF2406 型 DSP 作为主控芯片的光伏并网发电系统单模块(额定输出功率 2.5 kW)进行了相关实验。实验时,光伏并网发电系统输出功率为 2.508 kW,此时测得电网电压为 227 V,通过上位机(监控系统)给 DSP 发送指令来决定并网控制时是否加电网电压前馈,从而得到对比实验波形,如图 5 所示。

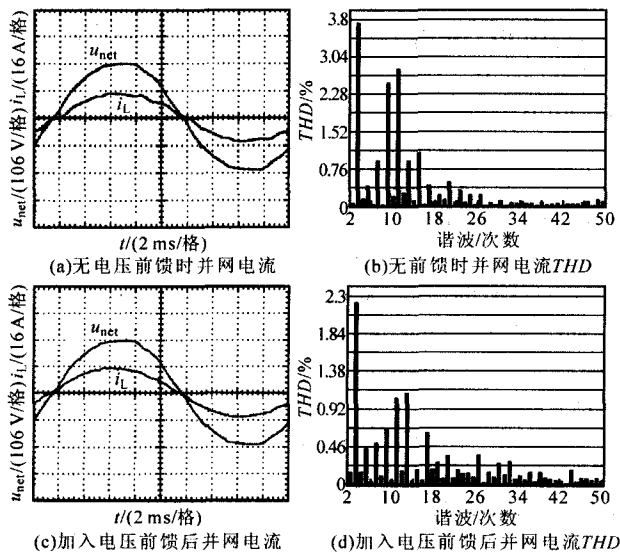


图 5 实验结果

(上接第 6 页)

分析表明,电网电压基波有效值 $U_s=83.5\text{ V}$,相对于 110 V 的额定电压跌落了 25%, $THD=3.78\%$;经 DVR 补偿后,负载端电压基波有效值 $U_L=110.1\text{ V}$, $THD=2.97\%$ 。说明通过 i_L 的直接控制,能过补偿电网电压跌落,改善了电网的波形质量。

图 3 示出 DVR 补偿 u_s 波动的动态性能。由图中可见,提出的 DVR 控制方法能够较好克服电网的暂态波动,使 u_L 保持平稳,具有良好的动态性能。这是因为控制指令是不随 u_s 的波动而变化的。必须指出的是,当 u_s 陡升的时候,有部分能量回馈到直流侧,由于实验中采用的蓄电池组可吸收这部分能量,所以在短时间内直流侧电压可保持稳定。

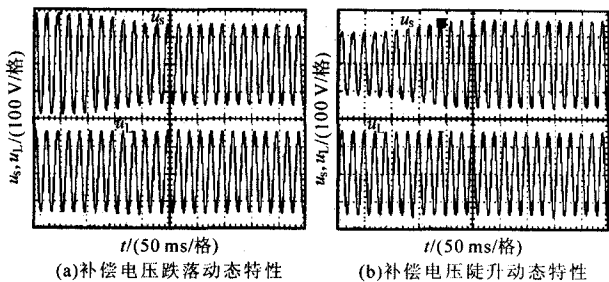


图 3 DVR 补偿电网电压波动的动态特性

由图可见,无电压前馈时并网电流 THD 达到 5.657%,不符合并网要求;引入电网电压前馈后,系统可有效抑制电网电压波动,对于受电网电压谐波影响的并网电流谐波也有较好的抑制效果,此时并网电流的 $THD=3.089\%$,较未加电网前馈时明显降低,达到了并网要求,更好地做到电压电流同相位。

4 结论

采用电流 PI 控制和电网电压前馈控制的方法来控制光伏并网逆变器的并网电流与电网电压同步。详细分析了电网电压前馈补偿的优点,从中可以看出,光伏并网发电系统的并网电流质量可以通过加电网电压前馈的方法来改善。

参考文献

- [1] 赵清林,郭小强,郭伟扬.单相逆变器并网控制技术[J].中国电机工程学报,2007,27(16):60-64.
- [2] Martina Calais, Johanna Myrzik, Ted Spooner, et al. Inverters for Single-phase Grid connected Photovoltaic Systems-an overview[A]. IEEE 33rd Annual Conference[C]. 2002, 4: 1995-2000.
- [3] Johanna M A Myrzik. Novel Inverter Topologies for Single-Phase Stand-Alone or Grid-Connected Photovoltaic Systems[A]. IEEE International Conference[C]. 2001, 1: 103-108.
- [4] 原慧军,王效华,徐进,等.基于 TMS320LF2407 的光伏并网逆变器的研究[J].电源技术应用,2006,9(12):18-21.
- [5] 张彦.单相光伏并网系统电路结构及逆变器控制技术[D].武汉:华中科技大学,2008.

5 结论

传统的 DVR 补偿电压控制方法是将变换器控制成非正弦电压源,在系统中容易引入谐波,且系统补偿性能又受串联变压器高频特性的影响。研究了一种新的 DVR 负载电流直接控制策略,将变换器控制成正弦电流源。实验结果证明该方法可有效稳定负载侧电压,使其不受电网电压波动的影响,且串联变压器中流过正弦电流可以有效隔离电网谐波。

参考文献

- [1] 吴振兴,邹云屏,张允,等.单相 PWM 整流器输入电流波形的改善技术[J].高电压技术,2008,3(34):603-608.
- [2] 张允,邹云屏,吴振兴,等.励磁电流补偿方法的电流控制型单相动态电压恢复器的仿真研究[J].中国电机工程学报,2008,22(28):152-158.
- [3] 周雪松,张智勇,马幼捷,等.动态电压恢复器检测方法补偿策略的研究[J].电力电子技术,2006,40(3):123-125.
- [4] Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection[J]. IEEE Trans. on IA, 2000, 15(1):51-57.
- [5] Ghosh A, Ledwich G. Compensation of Distribution System Voltage using DVR[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 1(74):1030-1036.