

太阳能光伏发电并网系统相关技术研究

闫士职, 尹梅, 李庆, 张伟鹏

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 光伏并网发电系统是光伏发电系统的发展趋势。文章分析了太阳能光伏并网发电系统的组成, 阐述了对最大功率点进行跟踪的控制方法, 详细分析了作为系统核心部分的逆变器的工作原理, 给出了逆变环节的控制策略和产生SPWM波的软件设计方法。

关键字: 光伏并网发电; 最大功率点跟踪; 逆变器; 控制方法

0 引言

随着全球经济的迅速发展和人口的不断增加, 以及石油、天然气和煤炭等化石能源的逐步消耗, 能源危机已成为世界各国共同面临的课题。与此同时, 化石能源造成的环境污染和生态失衡等一系列问题, 也成为制约社会经济发展的瓶颈。新能源应用正成为全球的热点。太阳能资源作为最丰富的可再生能源之一, 它分布广泛, 且污染环境, 因而是理想的替代能源。

光伏并网发电是太阳能利用的一种形式, 它可将光伏电池组件转换的直流电经逆变器逆变后向电网输送能量, 可在一定程度上能缓解能源紧张的问题。目前, 我国的光伏产业还处于起步阶段, 还有很多问题需要解决。我国政府也高度重视光伏并网发电, 并逐步推广“屋顶计划”。太阳能光伏并网发电正在由补充能源向替代能源方向迈进。

1 光伏发电并网系统的组成

并网光伏逆变系统一般由光伏阵列、变换器和控制器组成, 图1所示是其系统组成, 其中变换器可将光伏电池发出的电能逆变成正弦电流并入电网, 控制器主要控制光伏电池最大功率点的跟踪、以及逆变器并网电流的波形和功率, 以便向电网转送的功率与光伏阵列所发的最大功率电能相匹配。

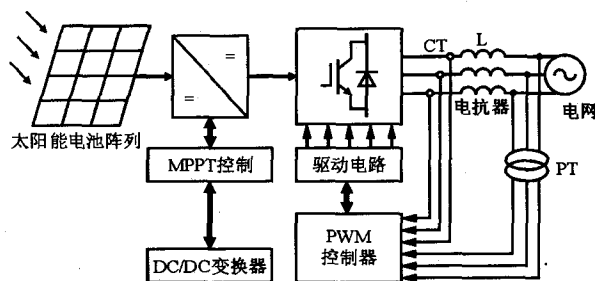


图1 并网型光伏发电系统组成

2 最大功率点跟踪控制方法

最大功率点跟踪技术是光伏发电的关键技术。由于太阳能电池的输出电压与输出电流成非线性关系, 而且输出功率会随着日照与温度的变化而改变, 输出功率受环境因素的影响也不可忽略, 因此, 必须根据太阳能电池所能产生的最大功率来调节其输出, 才能达到最大的功率转换效率。

扰动观察法是借以周期性的改变负载大小来改变太阳能电池的输出电压及功率, 也就是改变太阳能电池的工作点, 它通过观察比较和变动前后两次的输出功率和输出电压的大小, 来决定下个周期负载的变动是增加还是减少。

该方法的具体操作是给输出电压一个扰动值 $a(k)$, 其方向可正 ($a(k) = +\Delta U$) 可负 ($a(k) = -\Delta U$), 然后根据测出的电压电流值计算出电池的输出功率 $P(k)$, 然后将其与上一个测量值 $P(k-1)$ 进行比较。若输出功率增大, 说明扰动所加的方向有利于输出功率的提高, 此后继续向这个方向

施加扰动 ($a(k) = a(k-1)$), 并继续观察; 若施加的扰动使太阳能电池的输出功率减小, 说明扰动的方向错误, 则在下一轮的扰动中使方向相反 ($a(k) = -a(k-1)$), 如此不停的观察调整, 以使太阳能电池工作在最大功率点附近。其操作程序方框图如图2所示。

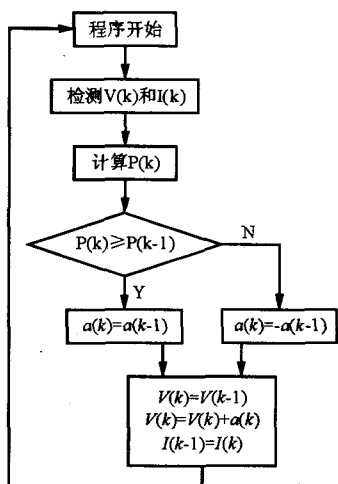


图2 最大功率点跟踪控制操作程序图

扰动观察法的实现原理较为简单, 容易实现, 其控制精度也较电压控制法精确, 但是这种方法会使系统总是在电池的最大功率点附近振荡工作, 且其扰动的初始值和扰动步长对控制精度和速度有较大的影响。

3 单级光伏并网逆变器的工作原理

单级式光伏并网逆变器的电路原理如图3所示, 图中, T1-T4是功率器件, 用于组成逆变桥, D1-D4是对应的反并联二极管, D是防反二极管。U_d为太阳能电池的输出电压, U_{ab}、U_L和U_N分别为逆变器输出电压、电感L端电压和电网电压的有效值。电感L除用于滤除高频谐波外, 还兼有平衡逆变器和电网之间电压差的作用。桥式逆变电路的驱动信号采用单极性脉宽调制方式 (SPWM, sinusoidal Pulse Width Modulation), 利用该方式可以获得低失真、低谐波和高品质的正弦输出电流波形。

图3中的单级式单相光伏并网逆变电路中使用的功率器件共有四种开关模式。若以图中并网电流I的方向为正方向, 那么, 在并网电流的正半周, 其不同的开关模式下, 各功率器件具有不

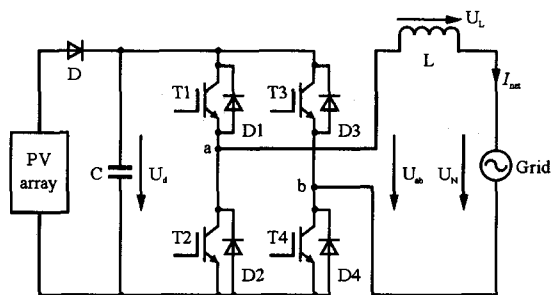


图3 单级式光伏并网逆变器电路

同的工作状态。

当功率器件T1, T4导通时, 光伏电池阵列直流侧能量反馈入电网, 并网电流增大, 电感储能增加。

当功率器件T1, T3导通时, 光伏电池阵列能量对直流侧电容进行充电, 交流侧电感储存能量通过T1及D3组成的回路反馈入电网, 并网电流减小, 电感储能减小。

当功率器件T2, T3导通时, 电感的储能除了通过反并联二极管D2和D3组成的回路反馈入电网外, 还通过D2, D3与光伏电池阵列一起对直流侧电容进行充电, 此时并网电流减小, 电感储能减小。

当功率器件T2, T4导通时, 光伏电池阵列对直流侧电容进行充电, 电感储能通过D2及T4组成回路反馈入电网, 并网电流减小, 同时电感储能亦减小。

对于并网电流的负半周, 也可以进行相同的分析。

这四种开关状态经过SPWM调制, 并通过交流滤波器滤除载波高频分量后, 即可使送入电网的电流波形为正弦波。

对于逆变器的输出端电路, 取电网电流为状态变量, 则有:

$$L \frac{dI_{net}}{dt} = U_a - U_{net} - I_{net} R_L$$

式中, U₀是未经滤波的逆变器输出电压, 其复数域形式为:

$$I_{net}(s) = \frac{1}{Ls + R_L} (U_a(s) - U_{net}(s)) = G(s) (U_a(s) - U_{net}(s))$$

4 单级光伏并网逆变器的控制策略

本文采用电压电流双环瞬时值控制方案的逆

变器，因为其输出电压波形质量好、控制简单及动态响应好，目前采用较多的瞬时值控制一般都采用双环反馈，其外环为输出电压反馈；而电压调节器一般采用比例积分 (PI) 形式，其输出作为内环的给定，内环为瞬时值电流反馈。双闭环控制方案中的电流内环可以加大逆变器控制系统的带宽，并使逆变器动态响应加快，输出电压的谐波含量减少，非线性负载适应能力增强。

图4所示是具有电压外环和电流内环的电压源型全桥逆变电路，图5为其电路方框图。由图4可见，主电路与前面介绍的电路相同，虚线框内为控制电路，电压外环采用瞬时值反馈方式来对输出电压的瞬时误差给出调节信号，该信号经PI调节后可作为电流控制给定 i_{r} 。电流内环由电感电流或电容电流瞬时值与电流给定 i_r 来比较以产生误差信号，再经PI调节，所得信号再与三角形载波比较后产生SPWM信号，以控制功率管的开通。实际应用中，在电流内环之外还设置电压外的目的在于可对不同负载实现给定电流幅值的自动控制，以使电压瞬时值外环能及时、快速地校正输出电压波形，从而使系统在各种负载情况下均具有良好的电压输出波形。

对于逆变器的电压电流双闭环控制系统，根据采样电流的不同，可以将其分为两类：一类是滤波电容电流内环输出电压外环控制，另一类是滤波电感电流内环输出电压外环控制。

5 产生SPWM的软件设计

系统中的SPWM波可通过DSP的脉宽调制电路产生，并借助于DSP的T3定时器和比较单元CMPR5来完成。根据产生对称波形的原理，T3工作在连续增/减计数模式。操作时可由T3定时器的周期中断触发A/D转换，并在A/D转换结束后，触发ADC中断，然后在中断服务程序中进行A/D结果的读取，再对结果进行线性校正、数字滤波、有效值计算等操作，同时实时更新比较单元CMPR5的值。在中断处理中，程序除了要完成控制任务之外，还应具备许多快速故障检测与保护功能，如独立运行时，中断程序应具备过流检测和保护功能，并网运行时，则应具备对电网电压峰值、电网频率、孤岛状态的故障检测与保护功能。

为了充分发挥TMS320LF2407A DSP器件运算能力强，实时处理速度快的特点，本系统控制部

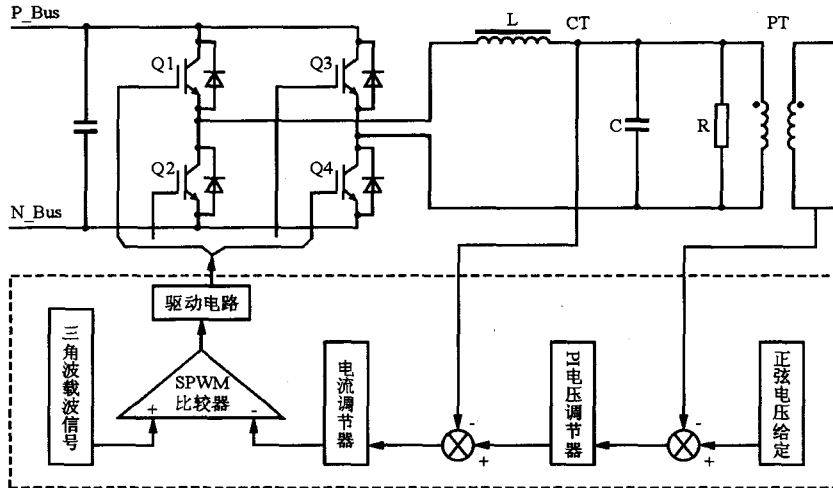


图4 电压电流双闭环反馈控制结构

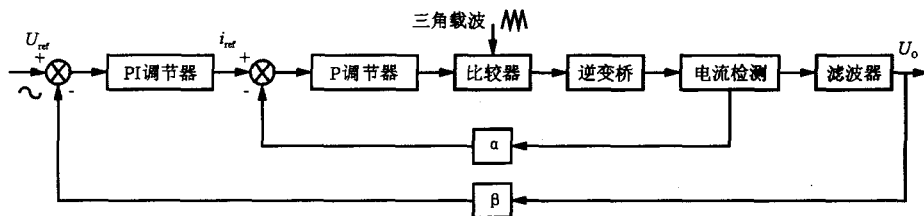


图5 电压电流双闭环控制系统框图

分的中断处理程序采用汇编语言编写，主要完成A/D采样、查正弦表、产生SPWM波、直流与交流的PID控制等功能。其具体的程序流程图如图6所示。

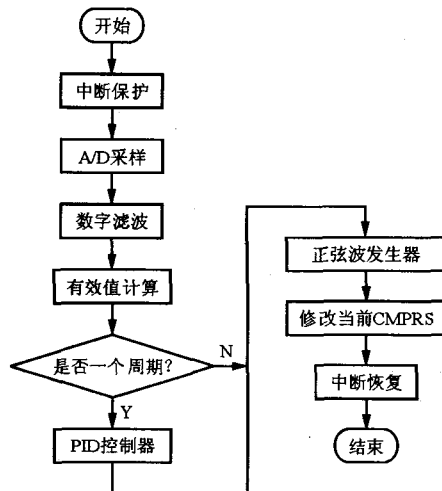


图6 SPWM产生中断服务程序

6 结束语

本课题进行实验可得，其PWM控制波形的输出可以达到控制目的。但是，其波形质量与仿真控制波形还有不足，PWM驱动波形的上升沿与仿真结果有一定的差距，这与实验所用的硬件器件有关，器件的取值可能会影响到实验结果，从而使输出电压波形中有毛刺，存在高频分量，不够平滑等，故应加入滤波器滤除。而电流输出波形正弦度不好、存在波动、畸变的原因主要是由于

电流跟踪控制环节PI调节器参数计算和调节地不够准确，在软件中没能实现快速的跟踪和控制，不能达到单周期调节所致。另外，在系统建模的过程中，由于对一些传递函数环节进行了简化，这些因素也会使得控制参数的计算不够精确，从而导致系统仿真结果和实际系统之间形成一定的偏差。

参考文献

- [1] 张志强, 马琴, 程大章. 太阳能光伏发电系统中的控制技术[J]. 低压电器, 2007, (11): 55~58.
- [2] 姜子晴, 陈照章, 徐晓斌. 基于MATLAB光伏并网逆变系统的仿真研究[J]. 通信电源技术, 2007, (7): 18~20.
- [3] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, (10): 97~101.
- [4] 李进国, 金新民. 小功率光伏并网逆变器控制系统的设计[J]. 北方交通大学学报, 2003, (2): 57~61.
- [5] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓璞. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 焦在强, 许洪华. 单级式并网光伏逆变器[J]. 可再生能源, 2004, (5): 34~36.
- [7] 郑诗程, 丁明. 户用光伏并网发电系统的研究与设计[J]. 电力电子技术, 2005, (10): 55~57.
- [8] 宁锋, 高继春. 发展太阳能光伏发电的意义及前景[J]. 西北轻工业学院学报, 2002, 20(1): 82~83.
- [9] 毕磊. 分布式光伏发电并网技术的研究[J]. 电气传动, 2001, (3): 38~41.
- [10] 张洪亮. 并网型单向光伏逆变器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 61~64.

(上接第76页)

- and Adaptive Delay Compensation for DVS Applications. Solid-State Circuits, IEEE Journal of Volume 43, Issue 4, April 2008 Page(s): 815 - 822.
- [4] Pe, Z.M.; Jain, P.K.; Sen, P.C.; Robust controller design for high frequency resonant inverter system with voltage mode control Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE Volume 1, 2-6 Nov. 2004 Page(s): 41 - 46 Vol. 1.
 - [5] Chava, C.K.; Silva-Martinez, J.; A frequency compensation scheme for LDO voltage regulators Circuits and Systems, 2002. ISCAS 2002. IEEE International Symposium on Volume 5, 26-29 May 2002 Page(s): V-825 - V-828 vol.5.
 - [6] Nishio, T.; Yuanxun Wang; Itoh, T.; A frequency-con-

- trolled beam-steering array with mixing frequency compensation for multichannel applications Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Volume 52, Issue 4, April 2004 Page(s): 1039 - 1048.
- [7] Grasso, A. D.; Marano, D.; Palumbo, G.; Pennisi, S.; Improved Reversed Nested Miller Frequency Compensation Technique With Voltage Buffer and Resistor Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on Volume 54, Issue 5, May 2007 Page(s): 382 - 386.
 - [8] Joao Ramos; Steyaert, M.S.J.; Positive feedback frequency compensation for low-voltage low-power three-stage amplifier Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on Volume 51, Issue 10, Oct. 2004 Page(s): 1967 - 1974.