

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H02J 3/18 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03150908.8

[45] 授权公告日 2008 年 4 月 2 日

[11] 授权公告号 CN 100379113C

[22] 申请日 2003.9.11 [21] 申请号 03150908.8

[73] 专利权人 上海交通大学

地址 200030 上海市华山路 1954 号

[72] 发明人 禹华军 潘俊民

[56] 参考文献

WO9618937A1 1996.6.20

US5187427A 1993.2.16

US5225712A 1993.7.6

审查员 周胡亮

[74] 专利代理机构 上海交达专利事务所

代理人 王锡麟 王桂忠

权利要求书 1 页 说明书 6 页

[54] 发明名称

同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法

[57] 摘要

一种同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法。属于太阳能发电与电力电子技术领域。本发明方法基于瞬时无功功率理论，采用 park 变换将三相逆变器输出电流变换到旋转 dq 坐标上，实现对有功电流和无功电流的分离，通过分别控制有功电流和无功电流的大小和方向即实现将光伏电池的直流电变换成交流电，同时对本地电网进行无功功率补偿，当光伏电池有足够能量输出时，光伏并网发电和无功补偿同时实现，当光伏电池停止输出时，逆变器单独对电网进行无功补偿。本发明能够将光伏阵列输出的直流电通过逆变器变送到三相 380V 交流电网上，同时还能够对本地电网上其他的无功负载实现一定量的无功补偿，改善电网电能质量。

1、一种同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法，其特征在于，采用 park 变换将三相并网光伏逆变器输出电流变换到旋转 dq 坐标上，实现对有功电流和无功电流的分离，通过 PI 调节分别控制有功电流和无功电流的大小和方向，实现光伏电池的并网发电，同时对本地电网进行无功功率补偿，当光伏电池停止输出时，三相并网光伏逆变器单独对电网进行无功补偿，当光伏电池有足够能量输出时，光伏并网发电和无功补偿同时实现。

2、根据权利要求 1 所述的同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法，其特征是，所述的光伏电池的并网发电，具体如下：

用电压互感器实时采样三相电网相电压，通过矢量变换得到电网电压的频率和相位，作为对三相并网光伏逆变器电流控制的频率和相位基准，三相并网光伏逆变器采用全桥正弦脉宽调制技术，以经过 PI 调节和 dp 反变换的逆变电流波形作为调制波，对逆变电流进行瞬时控制，数学变换和控制算法由数字控制器编程实现，数字控制器的输入为电压和电流采样值或参考值，其输出为控制三相并网光伏逆变器工作的六路 PWM 脉冲波。

3、根据权利要求 1 所述的同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法，其特征是，所述的无功功率补偿，具体如下：

将三相并网光伏逆变器通过电抗器并联在电网上，调节逆变器交流侧输出电压的幅值，控制其吸收无功功率的性质和大小，以直流侧电压闭环控制形成的电流信号作为三相并网光伏逆变器输出电流参考值，采用跟踪型 PWM 控制方法，对三相并网光伏逆变器输出电流波形的瞬时有功和无功值进行反馈控制。

4、根据权利要求 1 所述的同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法，其特征是，所述的并网发电与无功补偿的同步实现，具体如下：

利用直流侧检测电压与直流侧参考电压的误差经过 PI 调节后作为有功电流分量的参考值，同时通过检测本地电网负载电流的无功分量，将其作为三相并网光伏逆变器补偿无功电流的参考值，通过 PI 调节和 dq 反变换将有功和无功电流耦合调节三相并网光伏逆变器的输出电压，即实现光伏并网发电和无功补偿的同步控制。

同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法

技术领域

本发明涉及一种同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法，具体是一种能同时实现光伏电池并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法。属于太阳能发电与电力电子技术领域。

背景技术

目前光伏特特的应用主要在三个方面：直流供电，独立逆变交流供电和并网供电。考虑到目前大多数用电设备都是交流供电，因此将光伏阵列输出的直流电转换成交流电已经成为了该领域的一个研究重点。针对独立的小功率光伏系统，逆变器作为电流变换装置实现了 PV 阵列对交流设备的供电，从而使得光伏电池利用价值增大，且使用方便。随着光伏电池质量的提高，其发电功率和转换效率也大大提高，这就为大规模并网发电提供了可能。并网发电的关键在于将 PV 阵列产生的能量最大限度地变送到电网上，相关的方法已在不少论文中加以报道。但光伏并网发电存在一个重大的缺憾，即当日照强度很低或者是夜晚时，光伏电池实际上丧失了输出能力，这时整个系统就必须从电网上撤下来，只有等光伏电池输出能力达到一定值时，系统再与电网并列。这样一来，不仅在系统关闭时整套设备处于闲置状态，而且频繁的并列与解列动作造成系统控制困难，部分设备损耗增加且使用寿命变短。

经文献检索发现，Multi-function photovoltaic power supply system with grid-connection and power factor correction features. Source: PESCC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, v 3, 2000, p 1185-1190 (“具有功率因数校正特征的多功能光伏并网发电系统”，IEEE 电力电子专题年会 2000 年论文集)，T.-F. Wu 等人提出一种将光伏并网发电与三相整流技术相结合的方法，即在逆变器直流侧并联直流负载，当光伏电池发电时，系统工作在逆变状态，直流侧负载通过继电器与系统分离；当光伏电池停止输出时，附加继电器吸合，逆变器作为整流器对直流负载供电，该方法在一定程度上提高了系统的利用率。但是，该并网系统在逆变器直流侧并联直流负载，无疑降低了整个系统应用

的灵活性。而且该方法在两种功能之间要通过大量继电器来进行切换,使得整个系统的控制变得复杂,可靠性降低。

发明内容

本发明的目的是针对上述的背景技术中的不足,提供一种同时实现并网发电和电网无功功率补偿的一体化方法,使其能够将光伏阵列输出的直流电通过逆变器变送到三相 380V 交流电网上,同时还能够对本地电网上其他的无功负载实现一定量的无功补偿,改善电网电能质量。本发明在不增加硬件设备的前提下,当光伏电池发电时,能同时用于并网发电和电网无功补偿;当光伏电池不发电时(如夜晚),仍能进行电网的无功补偿,从而解决传统光伏并网发电系统利用率低的问题,并达到系统结构简单可靠、转换效率高和使用灵活的效果。

本发明是通过以下技术方案实现的,本发明基于瞬时无功功率理论,利用 park 变换将三相逆变器输出电流变换到旋转 dq 坐标上,从而实现有功电流和无功电流的分离。分别控制有功电流和无功电流的大小和方向即实现将光伏电池的直流电变换成交流电,同时对本地电网进行无功功率补偿。当光伏电池有足够能量输出时,光伏并网发电和无功补偿同时实现。当光伏电池停止输出(输出功率低于某一值)时,逆变器单独对电网进行无功补偿,无功补偿功能不受光伏输出能力的影响。由于系统始终并在电网上保持工作状态,光伏电池输出能量能随时变送出去,这就省去了重复的并列与解列动作,提高了光伏系统工作的可靠性。

本发明方法的实现具体包括光伏电池的并网发电、无功功率补偿、并网发电与无功补偿的同步实现等 3 个部分,其中光伏电池的并网发电和无功功率补偿的同步实现是本发明的核心技术。以下对本发明方法的各部分作详细说明:

1、光伏电池的并网发电

利用电压互感器实时采样三相电网相电压,通过矢量变换得到电网电压的频率和相位,作为对逆变器电流控制的频率和相位基准。逆变器采用全桥正弦脉宽调制技术(SPWM),对逆变电流进行瞬时控制。所有的数学变换和控制算法由数字控制器编程实现,数字控制器的输入为电压和电流采样值或参考值,其输出为控制逆变器工作的六路 PWM 脉冲波。

为了维持直流侧的电压稳定,本方法引入了对直流侧电压的闭环控制,即将直流侧电压与参考电压的误差经过 PI 调节器后作为逆变器输出有功电流的参考值。这种控制方法可以保证当光伏电池有足够能量输出时,逆变器能将这部分能量最大限

度地变送到电网上,因为当直流侧电压维持不变时,流过直流侧电容的电流就很小,所有从光伏电池输出的电流都由逆变器输送到电网上。同时,当光伏电池停止输出功率时,通过直流侧电压的闭环控制,逆变器从电网吸收一部分有功电流,维持直流侧电压恒定以满足后面无功补偿的需要。本发明对于直流侧电压控制的特点在于:与传统的误差比较不一样,本方法中直流侧电压参考值作为误差比较器的负端输入,而其正端输入则为直流侧电压反馈信号。当直流侧电压高于参考电压时,误差信号为正,逆变器输出有功电流参考值正向增加,即向电网提供有功能量;反之,当直流侧电压低于参考电压时,逆变器开关管的旁路二极管组成一个整流桥,从电网吸收有功能量以维持直流侧电压恒定。由于直流侧电容本身并不消耗有功能量,这部分能量只是用来补偿逆变器开关管的损耗,所以从电网吸收的有功电流很小。这种策略合理利用了能量的传输方向,控制自由度大且实现起来简单可靠。

由于此处所说的并网发电主要是指将太阳能转变为有功能量并输送到电网上,其实质就是对逆变器有功电流的控制。而逆变器输出的电流是有功分量和无功分量的矢量和,要单独实现对有功电流的控制,就必须实现有功分量和无功分量的解耦。H. Akagi 等人提出了 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的瞬时无功功率理论,该理论的目的虽然是为了说明瞬时无功功率的概念,但是经过坐标变换后的电流分量恰好实现了有功电流和无功电流的分离。本发明正是基于这样一种方法,分别对有功电流和无功电流进行控制,实现了逆变器的有功功率输出和电网无功补偿双重功能。考虑到有功分量和无功分量是通过 park 变换同时得到的,具体的检测和控制方法一并在后面的文字中给出。

2、无功功率补偿

将三相逆变桥电路通过电抗器并联在电网上,适当地调节桥式电路交流侧输出电压的幅值,在电抗器两端形成一定的电压降,使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流,实现动态无功补偿的目的。其实质是利用逆变器输出电压与电网电压在逆变器输出电抗器上的压差形成所需的无功补偿电流,通过控制逆变器输出电压的幅值,即可控制其吸收无功功率的性质和大小。本方法采用跟踪型 PWM 控制技术,对逆变器输出电流波形的瞬时值进行反馈控制,其响应速度和控制精度比控制逆变器电压基波的幅值和相位的间接控制法都有很大的提高。

将 abc 三相系统电压、电流转换为 $\alpha\beta 0$ 坐标系上的矢量,将电压、电流矢量的点积定义为瞬时有功功率,电压、电流矢量的叉积定义为瞬时无功功率,并由此得

到瞬时无功功率和瞬时无功电流。设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为 e_a, e_b, e_c 和 i_a, i_b, i_c ，通过 park 变换，可以将它们变换到旋转的 dq 坐标系上，其变换关系可用下式表示：

$$i_{dq0} = C i_{abc}, i_{abc} = C^{-1} i_{dq0}$$

其中， $i_{dq0} = [i_d, i_q, i_0]^T$, $i_{abc} = [i_a, i_b, i_c]^T$ ， C 为 park 变换矩阵，即

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

由于 C 为正交矩阵，有 $C^{-1} = C^T$ ，所以

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

此处， ω 即为电网电压的频率。取 dq 坐标的旋转速度与 ω 一致，根据瞬时无功理论，此时的 i_d, i_q 即为旋转坐标系下的瞬时有功电流和瞬时无功电流。

3、并网发电与无功补偿的同步实现

本发明通过 dq 变换实现有功电流和无功电流的分离，利用直流侧检测电压与直流侧参考电压的误差经过 PI 调节后作为有功电流分量的参考值；同时通过检测本地电网负载电流的无功分量，将其作为逆变器补偿无功电流的参考值，即实现光伏并网发电和无功补偿的同步控制。通过控制逆变器输出滤波电感上的电压大小和方向，即控制电感电流的方向，该方法既可以补偿感性无功也可以补偿容性无功。当逆变器输出电压高于电网电压时，逆变器输出感性的无功功率；当逆变器输出电压低于电网电压时，逆变器输出容性的无功功率。而当逆变器向电网发送有功功率时，逆变器输出电压相位超前电网电压相位；当逆变器从电网吸收有功功率时，逆变器输出电压相位滞后电网电压相位。需要说明的是，负载无功功率需求（如 1 KVar）较小的情况下，其无功电流分量可直接作为逆变器输出的无功电流参考值。如果实际负载的无功需求较大，而逆变器的补偿容量有限，则可以考虑将检测到的无功电流分量按比例缩小再作为逆变器的无功电流参考值，余下部分将由电网其他补偿装置提供。另外，还可以不检测负载的无功电流，而根据自身的容量直接给定一个参考值，而余下部分仍由电网其他补偿装置提供。这样不仅减少了检测点数量，而且可

以完全不考虑负载的工作情况,使得系统的使用和维护都变得方便。逆变系统需要检测的变量包括:直流侧电压 U_{dc} , 电网电压 u_{abc} , 逆变器电流 i_{abc} 和负载电流 i_{Labc} 。而锁相环控制、信号误差比较、PI 调节、park 变换与反变换以及 PWM 的生成均由数字信号处理器编程实现, PWM 的输出可直接驱动逆变器开关。

本发明具有实质性特点和显著进步,能够将光伏阵列输出的直流电通过逆变器变送到三相 380V 交流电网上,同时还能够对本地电网上其他的无功负载实现一定量的无功补偿,改善电网电能质量。分析结果表明,该方法使得逆变器有功电流的输出跟随光伏电池的输出,当光伏电池处于最大功率输出时,逆变器的有功电流也输出最大;当光伏电池输出能力降低甚至消失时,逆变器的有功电流输出逐渐变小并出现一定的负值,这个负值代表逆变器从电网吸收有功能量以维持直流侧电压恒定。而无功电流分量则不受光伏输出能力的影响,在容量允许范围内,无功电流分量始终跟随负载电流的无功分量。

另外,为了提高光伏并网发电的效率,本发明采用了基于导纳增量法的最大功率点跟踪技术,使得光伏电池的输出功率最大。即在光伏电池输出端与逆变器之间增加 BOOST 变换电路,实时检测光伏电池输出电压和电流值,根据这两个采样值以及前一周期的采样值判断光伏电池当前工作状态。若工作点偏离光伏电池输出的最大功率点,则改变 BOOST 电路开关占空比,使得光伏电池工作点向最大功率点靠近,直到最终稳定在最大功率点运行。这项措施可以大大提高了从太阳能到电网电能的转换效率。

具体实施方式

结合本发明方法的内容提供以下实施例:

建立一光伏并网发电系统,该系统依次由光伏阵列、BOOST 变换电路、三相全桥逆变器、电压电流检测装置以及数字控制器等部分构成。光伏电池短路电流为 $3.4A$, 开路电压 $360V$, 输出最大功率 $1.2KW$; 光伏电池输出电压和电流采样周期为 $2ms$, MPPT 算法实现模块的扫描时间为 $0.2ms$, 占空比参考电压增量为 $0.01V$, BOOST 开关频率 $40KHz$, 逆变器直流侧电压 $800V$; 电网负载为感性负载,其吸收无功功率设定为 $1KVar$; 逆变器输出容量为 $5KVA$, 载波频率 $20KHz$ 。

具体实施步骤如下: 1) 检测光伏电池输出电压 u_{pv} 和电流 i_{pv} , 采样值输入到数字信号处理器,程序按照 MPPT 算法对采样数据进行处理,计算得到下一采样周期中

的 BOOST 电路占空比参考值；2) 检测电网电压 u_{abc} ，经过矢量变换得到 dq 变换所需的基准频率和相位值；3) 检测逆变器电流检测 i_{abc} ，做 park 变换后分别得到当前逆变器电流的有功分量和无功分量；4) 检测直流侧电压 U_{dc} ，并和参考电压 U_{dc}^* 相比较，其误差经过内部数字 PI 调节后作为逆变器有功电流的参考值；5) 检测电网流入负载的电流 i_{Labc} ，经 dq 变换后作为逆变器无功电流的参考值；6) 逆变器有功电流和无功电流参考值与当前实际值分别进行比较，其误差经过 PI 调节后作为 dq 反变换的输入值；7) dq 反变换的输出作为 SPWM 发生器的输入，也即调制波，最终形成六路 PWM 脉冲波作为数字信号处理器的输出；8) 六路 PWM 脉冲波分别控制三相逆变器的六个开关管的导通与截止，以调节逆变器的输出电流。

本实施例中，当光伏电池输出最大功率时，BOOST 电路开关占空比约为 75%。光伏电池输出稳定后基本维持在最大功率点（1.2 KW）附近，向下波动约 30 W。此时，逆变器输出电流有功分量约 2.1 A，无功分量约 2.5 A，电网上的无功分量接近于零，系统的无功补偿效果明显。当日照强度减弱导致光伏电池输出功率为零时，逆变器输出电流有功分量约为 -0.6 A，而无功补偿效果不变。