

光伏并网逆变器的分析与研究

马幼捷,程德树,陈岚,郭润睿,周雪松

(天津理工大学 自动化学院,天津 300191)

摘要:光伏阵列产生的是直流电能,需要通过逆变器把直流电转换成交流电才能并到电网。并网逆变器作为光伏阵列与电网的接口装置,起着关键的作用。随着光伏发电系统的发展,并网发电系统中使用的逆变器得到了越来越多的关注。从并网逆变器的技术要求出发,对工作原理、拓扑结构、控制策略等方面进行了详细阐述,比较了不同类型逆变器的优劣及控制效果;并对光伏阵列输出的最大功率点跟踪功能作了简单的介绍。指出了并网逆变器正朝着高效率、智能化、数字化的方向发展。

关键词:并网逆变器;拓扑结构;最大功率点跟踪

中图分类号:TP23

文献标识码:A

Analysis and Research on Photovoltaic Grid-connected Inverter

MA You-jie, CHENG De-shu, CHEN Lan, GUO Run-wei, ZHOU Xue-song

(Automation Institute, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: Photovoltaic battery generates direct current, and inverter transforms direct current to alternating current by photovoltaic battery into electricity grid. Grid-connected inverter is a kind of interface device between photovoltaic battery and electricity grid, which plays a crucial role. As the developing of photovoltaic system, the grid inverter has got more and more attention. The technical requirements as starting point, the principle, topology structure and control policy of inverter were mainly illuminated, and compared quality and control effect between different kinds of inverter. It simply introduced function of maximum power point tracking (MPPT) of the photovoltaic battery. In a word, grid-connected inverter will become more high efficiency, intelligent and digital.

Key words: grid-connected inverter; topology structure; maximum power point tracking (MPPT)

1 引言

在当今的世界经济发展格局下,人类对能源的需求在不断增长,能源的可持续发展越来越得到人们的重视,逆变技术作为开发新能源的关键技术,它将太阳能电池的电能转换成交流电能与电网并网发电。并网逆变器作为太阳能电池与电网的接口装置,在新能源的开发和利用中有着至关重要的作用,光伏产业将在 21 世纪有着强劲的发展势头。现代逆变技术为光伏逆变提供了强有力的理论支持,半导体器件技术、现代控制技术、现代电力电子技术、脉宽调制(PWM)技术为并网逆变的研究提供了技术支持。目前光伏发电系统中的逆变器大多采用工作在 SPWM 状态的全桥式逆变方案。如何提高逆变器的性能,提高开关

频率,提高逆变器的功率密度,同时满足电能质量要求成为近年研究的热点,逆变器正朝着高功率密度,高变换效率,高可靠性,智能化的方向发展。

本文从性能技术指标、工作原理和控制手段几方面对光伏并网逆变器进行了详细阐述,并对逆变器的发展、拓扑结构进行了分析。在对并网的控制策略以及现今存在的问题作出了归纳,展望了光伏并网发电系统中的逆变器朝着高性能、高效率、智能化的方向发展的趋势。

2 逆变器的技术要求

2.1 一般性指标

并网逆变器作为光伏发电系统的专用部件,兼有逆变器的一般性技术指标。首先,由于光伏电池输出电压受光照强度的影响而出现较大范围

的波动,对逆变器直流侧要求有一定的输入电压范围,它取决于功率开关管工作时所能承受的最高电压和逆变器的输出电压范围。其次,要求有比较高的变换效率,它直接影响着整个光伏发电系统的效率,效率的高低对光伏发电系统提高有效发电量和降低发电成本有重要影响,所以要尽量降低自身功率损耗,不宜采取过多的开关管和损耗高的开关管。再次,要有一定的额定输出容量和输出电压稳定度,提高向负载供电的能力,使系统保持较高的可靠性。最后,需要较强的抑制谐波能力,减少对电力系统的配电网的影响,一般体现在总谐波畸变度(THD)和畸变因数(DF)上,这对输出电压波形的质量非常重要。

2.2 电网对逆变器的要求

1)必须保证逆变器输出的电量和电网电量保持同步,在相位、频率上严格一致,输出逆变器所能提供的最大输出功率,功率因数逼近于1;2)满足电网电能质量的要求,逆变器应输出失真度小的正弦波;3)具有对孤岛检测的功能,防止孤岛效应的发生,避免对用电设备和人身造成危害;4)为了保证电网和逆变器安全可靠运行,二者之间的有效隔离及接地技术也非常重要,电气隔离一般采用变压器^[1]。

此外,整个逆变环节要有较好的动态响应特性,保持输出电压、频率的精度,及时跟踪电网变化,同时具有最大功率跟踪功能和各种保护功能。

3 工作原理

逆变器由 IGBT 等功率开关器件构成,控制电路使开关元件有一定规律的连续开通或关断,使输出电压极性正负交替,将直流输入转换为交流输出。光伏发电系统中逆变器一般使用脉冲宽度调制 PWM 方式来实现,将矩形波的交流电转换为正弦波交流电。图 1 为并网逆变器的主电路拓扑结构,由于太阳能电池一般是电压源,因此逆变器的主电路采用电压型,在与外电网相联时,为电压型电流控制方式。系统通常是两级功率结构:直流变换环节、逆变环节构成。前级是 DC-DC 变换器(升压斩波器),根据电网电压的大小用来提升光伏阵列的电压以达到一个合适的水平,将光伏阵列输出的直流电压变为适用于逆变环节的直流形式,同时实现光伏电池输出最大功率点跟踪功能,使光伏模块稳定地工作在最大功率点;MPPT 采用 BUCK BOOST 组合电路。后

级是 DC-AC 逆变环节,通常采用桥式电路结构,其输出经过电感滤波,通过工频隔离变压器产生 220 V/50 Hz 的工频交流电,送入电网^[2]。逆变环节的核心是通过电力电子开关的导通与关断,来完成逆变的功能,它需要控制回路来完成,通常采取电压外环,电流内环的双环控制模式^[3],控制信号经过单片机或数字信号处理芯片来完成对主电路的控制。逆变环节输出和电网之间的电感起 PWM 波形的平滑电抗器的作用,用于滤除高次谐波电流,平衡逆变器和电网之间的电压差^[4]。

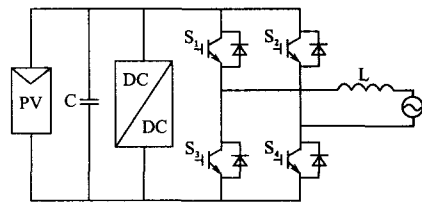


图 1 并网逆变器主电路拓扑图
Fig. 1 Topological diagram of grid-connected inverter

4 逆变器的发展

根据采用隔离变压器的类型,并网逆变可分为低频环节、高频环节以及非隔离型并网逆变^[5]。低频环节并网逆变器采用工频变压器作为与电网的接口,因此存在体积和重量大、音频噪音大的缺点;而非隔离型并网在一些国家禁止使用,因此现在普遍采用直接挂在电网上运行的高频环节并网逆变器^[6]。

4.1 低频链逆变器

比较早期的光伏发电系统采用低频链逆变器,如图 2 所示,是一个单级逆变系统,它首先把直流电逆变成工频低压交流电;再通过工频变压器升压成 220 V,50 Hz 的交流电并入电网或供负载使用。按输出波形可以分为方波型、梯形波合成型、PWM 调制型^[5]。为获得正弦波的输出电压,低频链逆变器一般选用 PWM 调制型,它综合了前两种形式的优点,克服了两者的不足,既电路

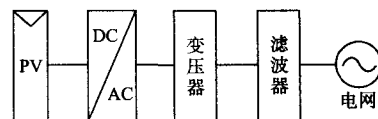


图 2 低频逆变器结构图
Fig. 2 Structural diagram of low frequency inverter

结构简单,输出电压又有较小的 THD 。变压器为工频变压器,给定了电压比来调节符合电网要求的电压增益,并使输入与输出绝缘,其工作频率等于输出电压频率。

它的优点是,电路结构紧凑,所用元器件少,使得损耗减小,转换效率得到了提升,控制也就更容易。但是也存在着一些缺陷,系统需要较高的直流输入,提高了系统成本;对于最大功率点的跟踪没有设立独立的控制操作,使得系统可靠性降低;工频变压器体积大、重量重、效率低、音频噪音大。

由于电路拓扑简单、技术成熟,目前仍有广泛的应用,但是低频链逆变器的体积大、重量重、成本高、音频噪声很大,注定被高频逆变器所取代。

4.2 高频链逆变器^[5,7,8]

图3是高频链逆变器结构拓扑,采用高频升压变换,向着更高功率密度逆变。采用高频变压器使输入和输出绝缘,体积小、重量轻;主电路分为高频逆变和工频逆变,系统比较复杂。按功率变换器的类型可分为电压源型和电流源型,按功率的传输方向可分为单向型和双向型,并网中广泛采用单向电压源型电流控制高频逆变器。电压源型逆变器中储能元件电容与电流型逆变器中储能元件电感相比,储能效率和储能器件体积、价格等都具有明显的优势,从而制约了电流型并网逆变器的应用和研究。它的直流侧并上大电容,相当于一个恒压源,具有单向或双向功率流,可以做到大功率输出,输出电压波纹小,效率高。逆变器的输出电流波形在电感滤波的情形下按正弦规律变化,从而易于实现电流控制。系统由高频逆变器、高频变压器、高频整流滤波电路和 PWM 逆变器构成。直流电经过高频逆变后经过高频变压器变成高频交流电,经高频整流滤波电路得到高压直流电,再由工频电路实现逆变。从图3分析得出,主要包括两大部分:前级视为一个直流变换电路,后级是工频逆变环节。直流变换电路主要将光伏阵列输出的直流电压变换成较高直流电压,同时完成光伏电池输出最大功率点跟踪功能。工频逆变环节用来实现获得工频交流电的逆变,并入电网。该电路采用了高频变压器隔离方式,体积小,重量轻,除了将输入/输出隔离以外,通过变比调节电压增益,以达到网侧电压的要求,能够满足最大功率的跟踪和直流电压输入范围的要求,但有高频逆变和工频逆变两个逆变,电路比较复杂。



图3 高频逆变器结构图

Fig. 3 Structural diagram of high frequency inverter

5 控制策略

光伏并网发电系统中的逆变器需要对电流和功率进行控制,逆变器输出电流主要采用各种优化的 PWM 控制策略,对给定的电流波形进行跟踪;功率的控制则是通过对太阳能电池最大功率点的跟踪实现。

5.1 最大功率跟踪 MPPT^[1,7]

最大功率点跟踪是当前采用较为广泛的一种光伏阵列功率点控制方式。从对光伏电池的分析可以看出,光伏阵列输出特性具有非线性特征,并且其输出受环境温度、光照强度的影响。在一定的条件下,光伏电池可以工作在不同的输出电压,但只有在某一电压值下,输出功率才能达到最大值,这时光伏电池的工作点称之为最大功率点。为了充分发挥光伏电池的效能,提高系统的整体效率,对光伏电池的输出进行最大功率点跟踪就十分必要。MPPT 的实质是通过实时检测光伏阵列的输出功率,采用一定的控制算法,以跟踪光伏阵列最大功率工作点,实现系统的最大功率输出。它是一种自主寻优方式,动态性能较好,较传统的 CVT 控制策略可获得更大的功率,但稳定端电压能力较差。可以在 MPPT 控制的外环增加一个稳压控制环节,来改善这一缺陷,从而提高系统的稳定性。目前 MPPT 控制有很多的实现方式,如扰动观测法、导纳增量法、最优梯度法、模糊逻辑控制方法、神经网络控制法等,它们实现 MPPT 控制的基本原理都是类似的,但算法各有差异。

5.2 并网控制

逆变器并网运行的主要控制目标是逆变器输出正弦波电流与电网电压在频率、相位上同步,并且能实时跟踪电网参数的变化,且电流的总畸变失真要低,以减小对电网的谐波影响,使并网系统的有功功率输出达到最大,功率因数近似为 1。目前,逆变器交流输出的控制方法可分为:电压控制方法和电流控制方法。由于电压控制不能使系统同时保证响应速度和稳定性的要求,所以其控

制通常采取电流控制方式。电流控制方式又可分为间接电流控制和直接电流控制。

5.2.1 间接电流控制

间接电流控制以电压矢量图为基础,基波电压向量可由图4表示,它表示出了逆变器的输出电压 U_s 、输出电流 I_N 以及电网电压 U_N 之间的关系。利用控制手段使逆变器的输出电流 I_N 始终和电网电压 U_N 同向,使输出功率因数为1。对输出电流的控制包括幅值控制和相位控制,设逆变器输出功率为 P ,由图4的三角函数关系可知

$$\tan \beta = P\omega L / U_N^2 \quad (1)$$

可见在电感数值和电网电压确定的条件下,依据给定的功率,可以确定超前角度 β ,即可以确定逆变器控制信号的相位。输出电压满足

$$U_s = U_N / \cos \beta \quad (2)$$

对于 SPWM 逆变器来说,输出电压基波满足

$$U_s = mU_d / \sqrt{2} \quad (3)$$

从而调制比可得

$$m = \sqrt{2}U_N / U_d \cos \beta \quad (4)$$

通过实时改变调制比 m ,根据式(4)可以达到控制输出电压 U_s 幅值,并最终调整并网电流 i_N 的目的^[4]。

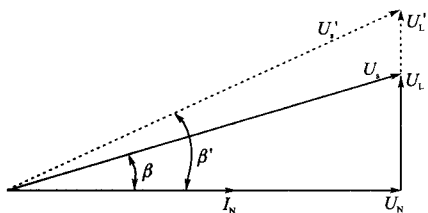


图4 电压矢量图

Fig. 4 Voltage vector graph

5.2.2 直接电流控制

直接电流控制是一种电流跟踪控制方式,通常采用电压外环、电流内环的双环控制模式,这类电流型控制技术是检测并将电感电流或功率开关电流作为电流内环的反馈信号与电压外环的输出信号(电流给定)经比较器比较后,去控制功率开关的占空比,使功率开关的峰值或谷值电流直接跟随电压反馈回路中误差放大器输出信号的变化。它具有电流波形好,动态响应速度快,稳定性好,调节性能好等优点。目前有多种控制方式,它们都是 PWM 非线性控制方法,主要有瞬时值滞环比较方式、定时比较方式和三角波比较方式^[7]。

图5所示的瞬时值滞环比较方式,把电流参考值与实际输出电流相比较,偏差经过滞环比较产生控制逆变桥各开关管通断的 PWM 信号,去触发或关断主电路功率开关器件,使输出电流围绕着给定的正弦波电流作锯齿形变化,从而控制电流的变化。这种方式硬件电路简单,具有电流跟踪精度高,响应速度快、鲁棒性强等优点。如果逆变器的开关器件有足够的开关频率,则逆变器的输出电流就能很快地调节其幅值和相位,使逆变器的输出电流得到高品质的动态控制。但是缺点也很明显,即电力半导体开关频率是变化的,使滤波器设计困难。尤其是当电流变化范围较大时,一方面,在电流值小的时候固定的滞环宽度会使电流相对误差过大;另一方面,在电流值大的时候,固定的滞环宽度会使跟踪误差增大或使器件的开关频率过高,甚至会超过器件允许的最高工作频率而导致器件损坏和逆变器工作失效。解决此问题可以采用滞环宽度跟踪电流增量的变化而自动调节,但会使电路结构变得复杂^[5]。滞环调制方式又分两态调制和三态调制两种。两态调制只有输入能量和回馈能量两个状态;而三态调制除了输入能量和回馈能量两个状态外,另有续流状态,在相同开关频率下电流脉动比两态调制时小^[9]。

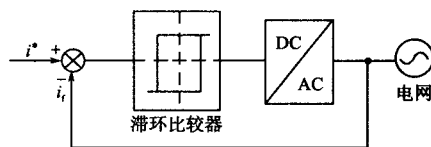


图5 电流滞环控制框图

Fig. 5 Control block diagram based on current hysteresis

定时比较方式是利用一个定时控制的比较器,每个时钟周期对电流误差判断一次,PWM 信号需要至少一个时钟周期才会变化一次,器件的开关频率最高不会超过时钟频率的一半^[7]。缺点是电流跟随误差是不固定的。

图6所示的三角波比较方式^[5],将指令信号与反馈信号比较后得到的电流误差,经过放大器 A 之后,与三角波进行比较,目的是将电流误差控制为最小。放大器经常采用 PI 调节器。这种方法可以视为 SPWM 法和瞬时值滞环比较法的组合,综合了二者的优点。但该方法跟踪误差较大,开关频率固定,跟踪速度较慢,输出含有与三角波相同频率的谐波,电路结构比较复杂。

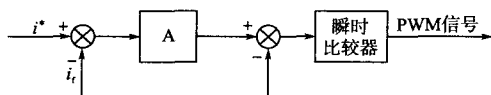


图6 三角波比较框图

Fig. 6 Block diagram of triangular wave comparison

目前,在逆变控制技术中,模拟控制技术还占有相当重要的地位。但是,随着微处理器和数字信号处理器的发展,数字电路硬件成本的不断降低,出现了许多新的控制方法,数字化 PWM 控制方式具有更加广泛的应用前景,相继出现了无拍差 PWM 技术,滑模变结构控制法,重复控制方式,瞬时值反馈控制技术^[7],它们在传统方法上有了很大进步,有着各自的优势,但同样有各自的局限性。

5.3 反孤岛控制^[10~12]

孤岛现象是指当电网由于电气故障或自然因素等原因中断供电时,光伏并网逆变器仍然向电网输送电能,从而形成一个电力公司无法控制的自给供电孤岛,称之为“孤岛效应”。光伏并网发电系统中孤岛的发生会产生严重的后果,对用户的用电设备和检修人员的安全造成重大危害。孤岛发生时,若孤岛中的电压和频率超出允许的范围,可能会对用户的设备造成损坏;电网的掉电可能使光伏发电系统过载运行,易被烧毁;与光伏发电系统相连的线路仍然带电,对检修人员造成危险。所以当电网停电后,必须立刻中止系统对电网的供电,防止孤岛效应的发生。

反孤岛效应的关键是电网断电的检测,且检测时间越短效果越好。一般采取被动检测法和主动检测法。被动检测法是实时检测电网电压的频率和相位,通过频率和相位的异常来判断电网是否失电。采用被动的孤岛检测方法不足以在负载匹配的情况下有效检测出孤岛现象,为此,必须采用主动式的检测方法。主动检测法是通过实时对电网参数发出干扰信号,通过检测反馈信号来判断电网是否失电。常见的方法有主动频率偏移法、滑模频率偏移法和输出功率扰动检测法等。

6 结束语

从能源短缺的现实状况和能源的可持续发展对现代经济社会的突出影响,可以看出光伏并网发电是解决此类问题的有效途径,将有着更加广阔的发展空间。并网逆变器作为光伏并网发电系

统中的关键部件越来越引起人们的重视,它的发展将对整个光伏系统起着不可估量的作用。目前,中国在小功率逆变器上与国外基本处于同一水平,但在大功率逆变器上还有很大差距,因此逆变器朝着智能化、数字化发展是必然趋势,从而对一些核心控制技术的改善和提高就变得越来越重要了。

参考文献

- [1] 董密,罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(20): 97-100.
- [2] 陈维,沈辉,邓幼俊,等. 光伏发电系统中逆变器技术应用及展望[J]. 电力电子技术,2006,40(4): 130-134.
- [3] 官二勇,宋平岗,叶满园. 基于最优梯度法 MPPT 的三相光伏并网逆变器[J]. 电力电子技术,2006,40(2): 33-34,75.
- [4] 周伟军,汪世平,陈辉明. 一种基于 TMS320LF2407 的并网逆变器控制策略[J]. 电源技术应用,2005, 8(3): 11-14.
- [5] 曲学基,曲敬凯,于明扬. 逆变技术基础与应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2007.
- [6] 陈潼,赵荣祥. 并网逆变器间接电流解耦控制策略的研究[J]. 电力电子技术,2006, 40(3): 8-16.
- [7] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社,2005.
- [8] 周志敏,周纪海,纪爱华. 逆变电源实用技术——设计与应用[M]. 北京: 中国电力出版社,2005.
- [9] 顾和荣,杨子龙,邹伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术[J]. 中国电机工程学报,2006, 26(9): 108-112.
- [10] 张东,吴俊娟,潘蕾. 光伏并网逆变器孤岛检测技术研究[J]. 中国测试技术,2007,33(4): 67-70.
- [11] 王志峰,段善旭,刘芙蓉. 光伏并网系统反孤岛控制策略仿真分析[J]. 通信电源技术,2007, 24(2): 29-31.
- [12] 鹿婷,段善旭,康勇. 逆变器并网的孤岛检测方法[J]. 通信电源技术,2006, 23(3): 38-41,52.
- [13] Ilserre M, Bluabjerg F, Hansen S. Design and Control of an LCL Filter-based Three-phase Active Rectifier[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(5): 128-129.
- [14] 杨海柱,金新民. 最大功率跟踪的光伏并网逆变器研究[J]. 北方交通大学学报,2004,28(2): 65-68.
- [15] Woyte A, Belmans R, Nijs J. Testing the Islanding Protection Function of Photovoltaic Inverters. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2003, 18(1): 157-162.
- [16] Yuvarajan S, Yu Dachuan, Xu Shanguang. A Novel Power Converter for Photovoltaic Applications[J]. Journal of Power Sources, 2004, 135(1-2): 327-331.
- [17] 廖华,许洪华,王环. 双支路光伏最大功率跟踪的并网逆变器的研制[J]. 太阳能学报,2006, 27(8): 824-827.
- [18] 张超,何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器[J]. 电力系统自动化,2005,29(19): 51-63.

收稿日期:2008-05-04

修改稿日期:2008-11-30