

光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法

董 密¹, 罗 安²

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南省长沙市 410083; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

摘要: 针对光伏并网发电系统中关键部件——逆变器的结构设计与控制方法研究进行了详细分析和阐述。从电网、光伏阵列以及用户对逆变器的要求出发, 分析了各种不同的逆变器拓扑结构与控制方法, 比较其运行效率和控制效果。对于目前国内外光伏发电系统中并网逆变器的研究现状、亟待解决的问题进行了阐述, 指出光伏发电系统中并网逆变器高效可靠运行的发展方向。

关键词: 光伏并网发电系统; 逆变器; 拓扑结构; 最大功率点跟踪; 孤岛效应

中图分类号: TM615; TM464

0 引言

由于传统能源的枯竭和人们对环境的重视, 电力系统正面临着巨大变革, 分布式发电将成为未来电力系统的发展方向^[1-3]。其中, 光伏发电以其独特的优点, 被公认为技术含量高、最有发展前途的技术之一^[4]。但是光伏发电系统存在着初期投资大、成本较高等缺点, 因而探索高性能、低造价的新型光电转换材料与器件是其主要研究方向之一。另一方面, 进一步减少光伏发电系统自身损耗、提高运行效率, 也是降低其发电成本的一个重要途径。逆变器效率的高低不仅影响其自身损耗, 还影响到光电转换器件以及系统其他设备的容量选择与合理配置。因此, 逆变器已成为影响光伏并网发电系统经济可靠运行的关键因素, 研究其结构与控制方法对于提高系统发电效率、降低成本具有极其重要的意义^[5]。

本文从电网、光伏阵列以及用户对于并网逆变器的要求出发, 分析了不同的逆变器拓扑结构与控制方法, 比较了其运行效率和控制效果。对于目前国内外光伏发电系统中并网逆变器的研究现状、亟待解决的技术问题进行了综合, 进一步指出了光伏发电系统中并网逆变器高效可靠运行的发展方向。

1 光伏发电系统对逆变器的要求

光伏并网发电系统一般由光伏阵列、逆变器和控制器 3 部分组成。逆变器是连接光伏阵列和电网的关键部件, 它完成控制光伏阵列最大功率点运行和向电网注入正弦电流两大主要任务。

1.1 电网对逆变器的要求

逆变器要与电网相连, 必须满足电网电能质量、防止孤岛效应和安全隔离接地 3 个要求。

为了避免光伏并网发电系统对公共电网的污染, 逆变器应输出失真度小的正弦波。影响波形失真度的主要因素之一是逆变器的开关频率。在数控逆变系统中采用高速 DSP 等新型处理器, 可明显提高并网逆变器的开关频率性能, 它已成为实际系统广泛采用的技术之一; 同时, 逆变器主功率元件的选择也至关重要。小容量低压系统较多地使用功率场效应管(MOSFET), 它具有较低的通态压降和较高的开关频率; 但 MOSFET 随着电压升高其通态电阻增大, 因而在高压大容量系统中一般采用绝缘栅双极晶体管(IGBT); 而在特大容量系统中, 一般采用可关断晶闸管(GTO)作为功率元件^[6]。

依据 IEEE 2000—929^[7] 和 UL1741^[8] 标准, 所有并网逆变器必须具有防孤岛效应的功能。孤岛效应是指当电网因电气故障、误操作或自然因素等原因中断供电时, 光伏并网发电系统未能及时检测出停电状态并切离电网, 使光伏并网发电系统与周围的负载形成一个电力公司无法掌握的自给供电孤岛^[9]。防孤岛效应的关键是对电网断电的检测。

为了保证电网和逆变器安全可靠运行, 逆变器与电网的有效隔离及逆变器接地技术也十分重要。电气隔离一般采用变压器。在三相输出光伏发电系统中, 其接地方式可参照国际电工委员会规定的非接地(I-T)方式、单个保护接地(T-T)方式和变压器中性线直接接地。而用电设备的外壳通过保护线(PE)与接地点金属性连接(T-N)^[10-11]。

1.2 光伏阵列对逆变器的要求

由于日照强度和环境温度都会影响光伏阵列的功率输出, 因此必须通过逆变器的调节使光伏阵列输出电压趋近于最大功率点输出电压, 以保证光伏阵列在最大功率点运行而获得最大能源。常用的最大功率点跟踪(MPPT)方法有: 定电压跟踪法、“上山”法、干扰观察法及增量电导法^[12]。

1.3 用户对逆变器的要求

从光伏发电系统的用户来说,成本低、效率与可靠性高、使用寿命长是其对逆变器的要求。因此,对逆变器的要求通常是^[13-14]:①具有合理的电路结构,严格筛选的元器件;具备输入直流极性反接、交流输出短路、过热过载等各种保护功能。②具有较宽的直流输入电压适应范围。由于光伏阵列的端电压随负载和日照强度而变化,因此逆变器必须能在较宽的直流输入电压范围内正常工作,且保证交流输出电压的稳定。③尽量减少中间环节(如蓄电池等)的使用,以节约成本、提高效率。

2 逆变器结构的发展

为了能够设计出尽量满足上述各项要求的并网逆变器,大多数研究人员一直集中于逆变器拓扑结构和控制方法 2 方面的研究。

早期光伏并网系统的逆变器结构见图 1(a)。它采用单级无变压器、电压型全桥逆变结构。其特点是结构简单、造价低、鲁棒性强;但受限于当时开关器件水平,使系统的输出功率因数只有 0.6~0.7,且输出电流谐波大^[15]。随着电子开关器件的发展,高频(频率>16 kHz)双极晶体管, MOSFET 或 IGBT 等逐渐取代了并网换相晶闸管。如图 1(b)所示,由于采用 PWM 全桥逆变电路和高频开关电子器件,能够很好地控制输出谐波;但 16 kHz~20 kHz 开关频率使得开关损耗增大,效率降低。

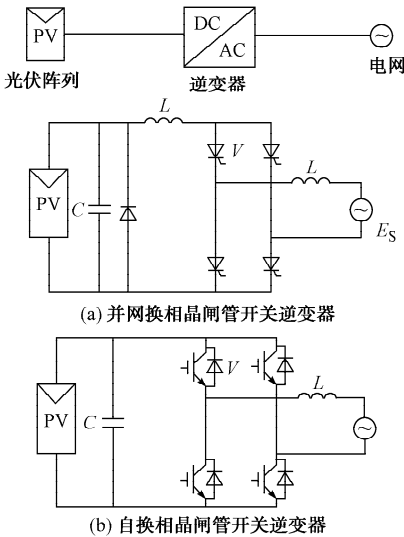


图 1 单级无变压器结构的光伏逆变器
Fig. 1 Single-stage transformerless PV inverter

图 1 单级逆变系统直接将直流转换为交流,它的主要缺点是:①需要较高的直流输入,使得成本提高,可靠性降低;②对于最大功率点的跟踪没有独立的控制操作,使得系统整体输出功率降低;③结构不

够灵活,无法扩展,不能满足光伏阵列直流输入的多变性。因此,在直流输入较低时,考虑采用交流变压器升压,以得到标准交流电压与频率,同时可使得输入输出之间电气隔离。

图 2 为带工频变压器结构的光伏逆变系统^[15]。其最大优点是逆变器在低压侧,因此逆变桥可以采用高频低压器件 MOSFET,节省了初期投资;而且逆变器的控制在低压侧实现,使得控制更易实现。此结构还适用于大电流光伏模块。

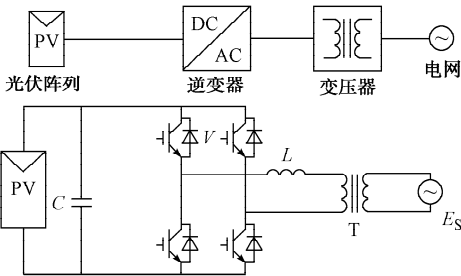


图 2 带工频变压器结构的光伏逆变器
Fig. 2 PV inverter with line frequency transformer

工频升压变压器体积大,效率低,价格也很昂贵,随着电力电子技术和微电子技术的进一步发展,采用高频升压变换能实现更高功率密度逆变。如图 3 所示,升压变压器采用高频磁芯材料,工作频率均在 20 kHz 以上。其体积小、重量轻,高频逆变后经过高频变压器变成高频交流电,又经高频整流滤波电路得到高压直流电(通常在 300 V 以上),再由工频逆变电路实现逆变^[6,16]。

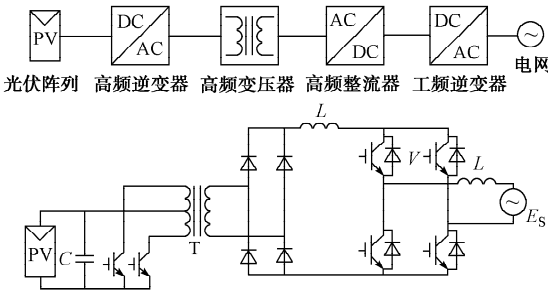


图 3 多级带高频变压器结构的光伏逆变器
Fig. 3 Multi-stage PV inverter with high frequency transformer

多转换级带高频变压器的逆变结构相比带工频变压器的逆变结构,功率密度大大提高,逆变器空载损耗也相应降低,从而效率得到提高,但也导致了逆变器的电路结构复杂,可靠性降低。

光伏逆变器由单级到多级的发展,使电能转换级数增加,能够便于满足最大功率点跟踪和直流电压输入范围的要求;但是单级逆变器结构紧凑,元件少,损耗更低,逆变器转换效率更高,更易控制。

因此,在结合两者优点的前提下,尽可能提高直流输入电压,就能提高逆变器的转换效率。早期采用了集中式技术提高输入电压,如图 4(a)所示。将光伏模块串/并联连接,产生直流高电压和电流,以增加转换效率。该结构方式不够灵活,会产生许多电能质量问题。现阶段的光伏并网逆变器大多采用串级型,其结构如图 4(b)所示。把光伏模块串联输入,同时尽量采用模块化设计,减少中间环节,导致如图 4(c)所示结构。该设计更灵活,适应性更强,可即插即用。图 4(d)所示为多串级逆变器结构,它融合了串级的设计灵活、高能量输出与集中型低成本的优点,是今后光伏并网逆变结构的一种发展趋势^[17]。

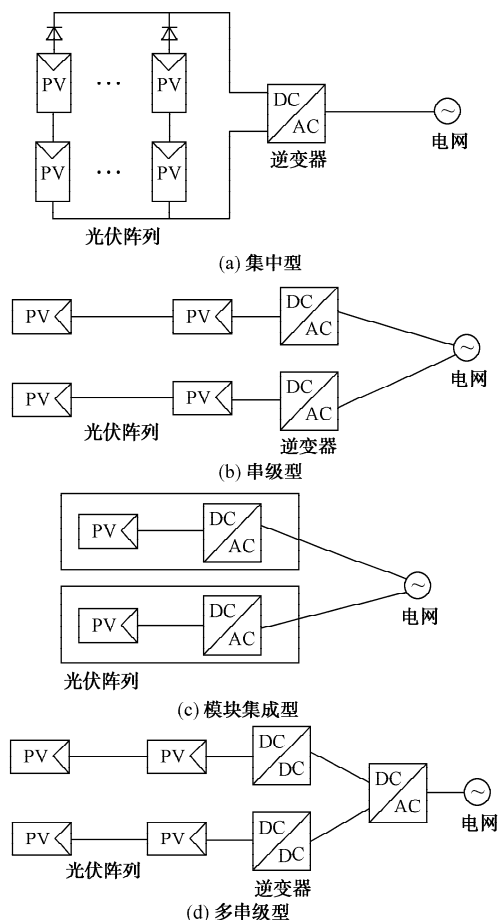


图 4 光伏并网逆变器结构

Fig. 4 Grid-connected PV inverter structure

最近,一些新型的逆变器拓扑结构和连接概念被提出来,如主从连接概念、队连接概念等^[17]。其研究不再仅仅局限于单个逆变器效率的提高,而是多个逆变器连接的效率即整个系统效率的提高。

3 逆变器的控制策略

光伏逆变器实现并网运行必须满足:其输出电

压与电网电压同频同相同幅值,输出电流与电网电压同频同相(功率因数为 1),而且其输出还应满足电网的电能质量要求。这些都依赖于逆变器的有效控制策略。光伏并网逆变器的控制一般分为 2 个环节:第 1 个环节得到系统功率点,即光伏阵列工作点;第 2 个环节完成光伏逆变系统对电网的跟踪。同时,为保证光伏逆变器安全有效地直接工作于并网状态,系统必须具备一定的保护功能和防孤岛效应的检测与控制功能。

3.1 光伏阵列工作点跟踪控制

光伏阵列工作点的控制主要有恒电压控制(CVT)和 MPPT 这 2 种方式。

CVT 是通过将光伏阵列端电压稳定于某个值的方法,确定系统功率点。其优点是控制简单,系统稳定性好。但当温度变化较大时, CVT 方式下的光伏阵列工作点将偏离最大功率点^[12,18]。

MPPT 是当前较广泛采用的光伏阵列功率点控制策略。它通过实时改变系统的工作状态,跟踪阵列的最大工作点,从而实现系统的最大功率输出^[12,18]。它是一种自主寻优方式,动态性能较好,但稳定性不如 CVT。其常用方法有“上山”法、干扰观察法、电导增量法等,具体实现见文献[12]。

现在对 MPPT 的研究集中在简单、高稳定性的控制算法实现上,如最优梯度法^[19]、模糊逻辑控制法^[20]、神经网络控制法^[21]等,也都取得了较显著的跟踪控制效果。

3.2 逆变器跟踪电网控制

对电网的跟踪控制是整个逆变系统控制的核心,直接关系到系统的输出电能质量和运行效率。由于光伏并网逆变器是基于 PWM 逆变实现的,所以其控制属于逆变器 PWM 电流控制方式^[12]。

较早出现的 PWM 非线性控制方法有瞬时比较方式和三角波比较方式^[12,22]。

图 5 所示的瞬时比较方式,电流误差的补偿和 PWM 信号的产生同时也在同一控制单元完成,并且构成了闭环反馈,使得控制器实现简单,具有良好的动态响应和内在的电流保护功能。但是它具有控制延时、开关频率不固定、无法产生零电压矢量等不足,因此输出电流波动、谐波畸变率都很大。为避免器件开关频率过高,可采用滞环宽度根据输出电流而自动调节的滞环比较器;或采用定时控制的瞬时值比较方式,但此方法的补偿电流误差不固定^[22]。

三角波比较方式的原理如图 6 所示,放大器 A 常采用比例或比例积分放大器。与瞬时值比较方式相比,该方法的优点是输出电压中所含谐波较少(含有与三角波相同频率的谐波),器件的开关频率固定

(等于三角波的频率);但该方法硬件较为复杂,跟随误差较大,放大器的增益有限,电流响应比瞬时值比较方式的慢^[22]。

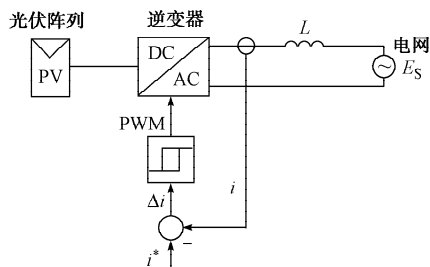


图 5 滞环电流瞬时比较控制框图

Fig. 5 Block diagram of hysteresis current control strategy

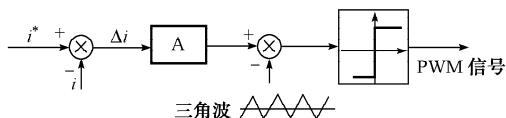


图 6 三角波比较方式原理

Fig. 6 Principle of triangle wave comparison manner

目前更好的闭环电流控制方法是基于载波周期的一些控制方法,例如无差拍 PWM 技术。它是将目标误差在下一个控制周期内消除,实现稳态无静差效果。此方法计算量较大,但其开关频率固定、动态响应快,适宜于光伏并网的数字控制实现^[12]。

随着微处理器技术,尤其是数字信号处理器的发展,现代控制理论中许多先进算法也被应用到光伏逆变系统的控制中,如人工神经网络^[23-24]、自适应^[25]、滑模变结构^[26]、模糊控制^[27-28]等,它们在各自领域解决了某些控制问题,但同样具有各种相应的局限性。例如:人工神经网络控制的精度依赖于模型训练样本;自适应控制要求在线辨识对象模型,算法复杂、计算量大;滑模变结构控制存在系统抖振问题;模糊控制依赖于隶属函数的选取,控制精度有待提高等。

三相并网系统中,较多地采用将交流变量转换为直流变量,将三相变换为两相的控制策略,并提出在 $d-q$ 同步参考坐标系下基于空间矢量 PWM (SVPWM) 的线性电流控制器^[29-32]。SVPWM 控制在解耦的 d 轴和 q 轴形成电流控制环,具有固定的开关频率,很好地输出谐波频谱,优化了开关控制方案和直流电压利用率。但它输出的电流质量一般,并且不具备内在的过电流保护能力。

近几年,光伏并网系统的综合控制成为其研究发展的新趋势。文献^[33]研究了基于瞬时无功理论的无功与谐波电流补偿控制,使得光伏并网系统既可以向电网提供有功功率,又可实现电网无功和谐波电流补偿。这对逆变器跟踪电网控制的实时性、

动态特性要求更高。研究适合于这类逆变器的控制方法对电网电能质量的提高具有重大意义。

3.3 逆变器对于孤岛效应的检测及控制

逆变器直接并网时,除了应具有基本的保护功能外,还应具备防孤岛效应的特殊功能。从用电安全与电能质量考虑,孤岛效应是不允许出现的;孤岛发生时必须快速、准确地切除并网逆变器^[34],由此引出了对于孤岛效应进行检测控制的研究。

孤岛效应的检测一般分成被动式与主动式。被动式检测是利用电网监测状态(如电压、频率、相位等)作为判断电网是否故障的依据^[9]。如果电网中负载正好与逆变器输出匹配,被动法将无法检测到孤岛的发生。主动检测法则是通过电力逆变器定时产生干扰信号,以观察电网是否受到影响作为判断依据^[9],如脉冲电流注入法^[35]、输出功率变化检测法^[36-37]、主动频率偏移法和滑模频率偏移法^[38]等。它们在实际并网逆变器中都有所应用,但也存在着各自的不足。当电压幅值和频率变化范围小于某一值时,频率偏移法无法检测到孤岛效应,即存在“检测盲区”^[39]。输出功率变化检测法虽不存在“检测盲区”,然而光伏并网系统受到光照强度等影响,其光伏输出功率随时在波动,对逆变器加入有功功率扰动,将会降低光伏阵列和逆变系统的效率。为了解决这个问题,光伏并网的有功和无功综合控制方法经常被提出来^[40-41]。

随着光伏并网发电系统进一步的广泛应用,当多个逆变器同时并网时,不同逆变器输出的变化非常大,从而导致上述方法可能失效。因此,研究多逆变器的并网通信、协同控制已成为其孤岛效应检测与控制的研究趋势^[42]。

4 结语

无论是从社会经济发展,还是从环境的角度来考虑,光伏发电技术的研究均具有重大现实意义,而且近年来已得到了飞速发展。本文从提高光伏发电系统效率的角度,针对其主要部件——逆变器的相关研究发展进行了论述。根据电网、光伏阵列和用户对于逆变器的不同要求,从并网逆变器的拓扑结构与控制方法 2 方面对其研究现状、待解决的技术问题进行了分析。由目前来看,高集成度的模块化设计、减少中间转换环节、采用即插即用的形式是逆变器结构的发展方向;而研究适合于非线性、强耦合、多变量及分布式的综合控制策略是光伏发电系统中并网逆变器控制方法的研究重点。

参考文献

- [1] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
- LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and

- its impact on power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(12): 53-56.
- [2] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述. *电力系统自动化*, 2005, 29(24): 90-97.
WANG Jian, LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(24): 90-97.
- [3] Energy Information Administration. *International Energy Outlook*. 2004.
- [4] BENNER J P, KAZMERSKI L. Photovoltaics gaining greater visibility. *IEEE Spectrum*, 1999, 29(9): 34-42.
- [5] MARKVART T. *Solar electricity*. New York, NY, USA: Wiley, 1994.
- [6] 曹仁贤. 光伏发电系统中逆变电源的原理与实现. *太阳能*, 1998, 2: 17-19.
CAO Renxian. The principle and realization of inverter in photovoltaic power system. *Solar Energy*, 1998, 2: 17-19.
- [7] IEEE Std 929—2000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) system. 2000.
- [8] UL 1741 Static inverter and charge controllers for use in photovoltaic systems. 1999.
- [9] STEVENS J, BONN R, GANN J, et al. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems. Albuquerque, NM, USA: Photovoltaic System Applications Department, Sandia National Laboratories, 2000: 1932-1939.
- [10] 廖成虎,周跃忠,姚晓峰,等. 发电厂 10 kV 及以下供电系统接地保护应用. *电力系统自动化*, 2003, 27(23): 83-85.
LIAO Chenghu, ZHOU Yuezhong, YAO Xiaofeng, et al. Ground protection for 10 kV and below auxiliary power supply system of power plants. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(23): 83-85.
- [11] 曹仁贤. 光伏系统的可靠性分析. *太阳能*, 2001(1): 30-31.
CAO Renxian. The reliability analysis of photovoltaic system. *Solar Energy*, 2001(1): 30-31.
- [12] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHAO Zhengming, LIU Jianzheng, SUN Xiaoying, et al. *Solar energy generator and its applications*. Beijing: Science Press, 2005.
- [13] BLAABJERG F, CHEN Z, KJAER S B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [14] BONN R H. Developing a “next generation” PV inverter// Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 19-24, 2002, New Orleans, LA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1352-1355.
- [15] MYRZIK J M A, CALAIS M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems — a review// Proceedings of IEEE Power Tech Conference, Jun 23-26, 2003, Bologna, Italy. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 2-8.
- [16] 张超,何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器. *电力系统自动化*, 2005, 29(19): 51-53.
ZHANG Chao, HE Xiangning. A novel high-frequency DC link inverter for grid-connected photovoltaic system. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(19): 51-53.
- [17] MEINHARDT M, CRAMER G. Past, present and future of grid connected photovoltaic and hybrid power systems// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 2, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1283-1288.
- [18] 杨海柱,金新民. 最大功率跟踪的光伏并网逆变器研究. *北方交通大学学报*, 2004, 28(2): 65-68.
YANG Haizhu, JING Xinmin. Research on grid-connected photovoltaic inverter of maximum power point tracking. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2004, 28(2): 65-68.
- [19] DAG H, ALVARADO F L. Toward improved uses of the conjugate gradient method for power system applications. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(3): 1306-1314.
- [20] WU T F, CHANG C H, CHEN Y H. A fuzzy-logic-controlled single-stage converter for PV-powered lighting system applications. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2000, 47(2): 287-296.
- [21] SAMANGKOOL K, PREMRUDEEPREECHACHARN S. Maximum power point tracking using neural networks for grid-connected photovoltaic system// Proceedings of International Conference on Future Power Systems, Nov 16-18, 2005, Amsterdam, Netherlands. 2005: 4p.
- [22] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿. 北京: 机械工业出版社, 2004.
WANG Zhao'an, YANG Jun, LIU Jinjun. *Harmonic and constraint and reactive power compensation*. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [23] KYOUNGSOO R, RAHMAN S. Two-loop controller for maximizing performance of a grid-connected photovoltaic-fuel cell hybrid power plant. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1998, 13(3): 276-281.
- [24] TORRES A F. A three-phase grid-connected PV system// Proceedings of 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society: Vol 1, Oct 22-28, 2000, Nagoya, Japan. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2000: 723-728.
- [25] MARTINS D C, DEMONTI R. Grid connected PV system using two energy processing stages// Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 19-24, 2002, New Orleans, LA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1649-1652.
- [26] MEZA C, BIEL D, MARTINEZ J, et al. Boost-buck inverter variable structure control for grid-connected photovoltaic systems// Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 23-16, 2005, Kobe, Japan. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1318-1321.
- [27] PREMRUDEEPREECHACHARN S, POAPORNSAWAN T. Fuzzy logic control of predictive current control for grid-connected single phase inverter// Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Sep 15-22, 2000, Anchorage, AK, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1715-1718.
- [28] DAVIS A J, SALAMEH Z M. Fuzzy logic modeling of a grid-connected mind/photovoltaic system with battery storage// Proceedings of Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Jul 28-30, 2004, Nova Scotian, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 129-135.
- [29] ZENG Q, CHANG L. Study of advanced current control strategies for three-phase grid-connected PWM inverters for distributed generation// Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, Aug 28-31, 2005, Toronto, Canada.

- Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2005; 1311-1316.
- [30] ZENG Q, CHANG L, SONG P. SVPWM-based current controller with grid harmonic compensation for three-phase grid-connected VSI// Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC'04); Vol 4, Jun 20-25, 2004, Arohea, Germany. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2004; 2494-2500.
- [31] PRODANOVIC M, GREEN T C. Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 1(18): 373-380.
- [32] SVENSSON J, LINDGREN M. Vector current controlled grid connected voltage source converter-influence of nonlinearities on the performance// Proceedings of IEEE 29th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC98); Vol 1, May 17-22, 1998, Fukuoka, Japan. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1998; 531-537.
- [33] 王健. 三相光伏并网系统设计及其控制算法研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
- WANG Jian. Research on three-phase grid-connected photovoltaic power system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [34] TSUKAMOTO O, OKAYASU T, YAMAGISHI K. Study on islanding of dispersed photovoltaic power systems connected to a utility power grid. Solar Energy, 2001, 70(6): 505-511.
- [35] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 光伏并网发电系统的孤岛效应与防止策略. 太阳能学报, 2003, 24(增刊): 94-97.
- ZHAO Wei, YU Shijie, SHEN Yuliang, et al. Islanding of PV Grid-connected System and Preventing Method. Acta Energise Solaris Sinica, 2003, 24 (Supplement): 94-97.
- [36] GHALI F M A. A combined technique for elimination of islanding phenomenon// Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 13-17, 1996, Washington, DC, USA. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1996; 1473-1476.
- [37] KITAMURA A, DKAMOTO M, HOTTA K, et al. Islanding prevention measures: demonstration testing at Rokko test center for advanced energy systems// Record of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 10-14, 1993, Louisville, KY, USA. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1993; 1063-1067.
- [38] SMITH G A, ONIONS P A, INFELD D G. Predicting islanding operation of grid connected PV inverters. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 2000, 147(1): 1-6.
- [39] ROPP M E, BEGOVIC M, ROHATGI A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(3): 810-816.
- [40] WOYTE A, BELMANS R, NIJS J. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18 (1): 157-162.
- [41] JUNG Y, SOL J, YU G, et al. Modelling and analysis of active islanding detection methods for photovoltaic power conditioning systems// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering; Vol 2, May 2-5, 2004, Ontario, Canada. 2004; 979-982.
- [42] KOTSOPOULOS A, DUARTE J L, HENDRIX M A M, et al. Islanding behaviour of grid-connected PV inverters operating under different control schemes// IEEE 33rd Annual of Power Electronics Specialists Conference, Jun 23-29, 2002, Cairns, Australia. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2002; 1506-1511.

董 密(1976—),女,博士研究生,研究领域为柔性交流输电、分布式光伏发电及电力系统自动化。E-mail: dm1221@163.com

罗 安(1957—),男,教授,博士生导师,研究领域为柔性输配电控制技术、分布式发电技术、有源滤波和无功补偿理论研究及工程应用。

Design and Control Strategies of Inverters for a Grid-connected Photovoltaic Power System

DONG Mi¹, LUO An²

(1. Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With energy, zoology and environments being paid increasing attention, a photovoltaic (PV) system supplying power directly to a power grid becomes more popular available. This paper focuses on the structure design and control strategies of inverters for the grid-connected PV system. It starts with an examination of the demands requested by the power grid, the PV array and the users for the inverters. Then follows a review to see how these demands are achieved with all sorts of topologies and control strategies of inverters and accordingly the working efficiency and control effect are compared. Also, the background, the fundamentals, the approaches and the main results of evolutionary grid-connected PV inverters are outlined. In the end, several open questions and the state-of-arts of the grid-connected PV inverters are discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60474041).

Key words: grid-connected photovoltaic (PV) power system; inverter; topological structure; maximum power point tracking (MPPT); islanding