

# 摘要

全球高污染严重的大环境下太阳能作为一种高效无污染且可持续发展的新能源，受到了世界各国的广泛重视。能源危机和环境问题的不断加剧，推动了清洁能源的发展进程。太阳能作为一种清洁无污染且可大规模开发利用的可再生能源，具有广阔应用前景。并且伴随“智能电网”理论的兴起，分布式电力系统正日益受到关注，光伏逆变系统作为分布式电力系统的一种重要形式，使得对该领域的研究具有重要的理论与现实意义。光伏并网逆变器是太阳能电站系统当中的光伏并网发电系统(GCPS,grid-connected PV generation system)的核心部件。

论文在分析光伏逆变系统发展现状与研究热点的基础上，探讨了光伏逆变系统的主要关键技术，对直接影响光伏逆变系统的工作效率以及工作状态的最大功率点跟踪控制、光伏逆变器控制等技术进行了详细研究。

控制器的硬件结构主要由单片机或数字信号处理芯片作为核心器件构成；通过直流-直流升压斩波变换器，可以在变换器和逆变器之间建立直流环、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，同时直流-直流变换器也作为最大功率点跟踪，增大光伏系统的经济性能，逆变器用来向交流系统提供功率；继电保护系统可以保护光伏系统和电力网络的安全，并且本文给出了软件方面的流程图。结果表明本装置的软硬件设计合理，系统运行可靠，达到了预期的效果。

**关键词** 太阳能；光伏并网技术；逆变器



# 第1章 绪论

太阳能作为一种高效无污染且可持续发展的新能源，受到了世界各国的广泛重视。太阳能的能量是来自于太阳内部连续不断的核聚变。在地球表面上太阳光的辐射强度为 $1367\text{km}/\text{m}^2$ 。我们生活的这个地球的赤道周长为 $40000\text{km}$ ，所以我们大概可以计算出，地球可以获得 $173000\text{TW}$ 的能量。人类维持生存需要这些能量。

太阳能的一种重要利用形式就是太阳能光伏发电，我们利用太阳电池把能量从光能变为电能，伴随着现代科技的进步，光伏发电在我国以致于全世界内有很大的发展前途。太阳能电池工作的原理是利用半导体具有的光伏效应，就是在太阳光的照射下会产生光电压的现象。1954年美国的贝尔实验室首先发明出了以PN结为基本结构具有使用价值的晶体硅太阳电池，从此以后太阳电池在太空领域技术中就得到了应用，现在在地面也逐渐得到推广应用。

## 1.1 课题研究的背景

世界大部分国家能源短缺，无法满足经济发展的需求；而且煤、石油等化石能源的利用会产生严重的温室效应，污染环境。这一系列问题都促使可再生能源在全球范围内的发展。从目前世界各国的能源战略决策来看，大规模的开发利用可再生能源已成为未来世界各国能源战略的重要组成部分<sup>1</sup>。

根据欧洲、日本等能源机构预测，2020年，光伏发电将占到全球发电量的1%，2040年将占到全球发电量的21%，2050年左右，太阳能将成为全球主力替代能源<sup>(1)</sup>。

同核能、风能、化石能源等发电技术相比，光伏发电具有其自身的优势，可归纳为如下几点：

1) 先进性的发电原理：直接由光子转化为电子，中间没有其他过程和机械运动，具有简洁的发电形式。

2) 太阳能资源的无限性和分布特性：太阳能取之不尽、用之不竭，可以再生和洁净环保；太阳光无处不在，不需运输，最最重要的是没有任何国家能过将其垄断和控制。

3) 太阳能没有资源短缺跟耗尽问题：用到的主要的硅材料储存丰富，在地壳

上出了氧元素之外的第二多的元素，多达26%。

4) 光伏发电同大自然的关系：无燃烧的过程，无温室气体、废气和废水的放出，环境友好，可以称作真正的绿色发电。

5) 使用性能和寿命的问题：已经经过应用和实践了十几年：光伏发电有比较稳定的性能，还有较长的使用寿命。

6) 维护和管理问题：可实现无人化且维护成本低。

## 1.2 课题研究的意义

光伏并网发电系统一般由光伏阵列逆变器和控制器部分组成。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。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三个要求。首先，电网对逆变器的要求；①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。而影响波形失真度的主要因素之一就是逆变器的开关频率。②依据IEEE—929和UL1741标准，所有并网逆变器必须具有防孤岛效应的功能。③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。其次，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。最后，用户对逆变器的要求；成本低、效率与可靠性高、使用寿命长。因此，对逆变器的要求通常是：①具有合理的电路结构，严格筛选的元器件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。

## 1.3 本课题的研究内容

(1) 了解光伏并网发电系统的基本结构：包括光伏阵列及一体化框架、直流配电单元、逆变单元VSR、交流配电单元和计量单元、安全和保护系统。在光伏阵列的输出端和电网侧三相四线制市电输入端，装设了避雷装置，以确保系统的安全可靠运行。

(2) 阐述光伏并网逆变器的原理和作用：

原理：光伏并网逆变器具有将太阳能电池发出的直流电转化为和电网电压同频同的相交流电的功能，光伏并网系统常常被设计成电压源输入、电流源输出的控制方式，并网系统实际上就是一个交流电流源和电压源的并联，通过控制并网电流与电网电压的相位同步，同时也可通过调整并网系统输出电流的大小及相位来控制系统的有功输出和无功输出<sup>5</sup>。

作用：①实现高质量的电能转换；将太阳能光电转换组件阵列产生的直流电转换成220 V、50 Hz的单相、正弦波交流电；其电流和电压的畸变率均小于5%。②实现系统的安全保护要求；如输出过载保护、输出短路保护、输入接反保护、直流过压保护、交流过压和欠压保护、“孤岛”保护及装置自身保护；自身保护有功率模块保护和过热保护。“孤岛”保护是当逆变电源并网运行时，若电网突然断开，在某一负荷下逆变器输出发生自激振荡“孤岛”效应产生，逆变电源将自动关闭，并显示相关故障信息<sup>4</sup>。

(3) 分析并网逆变器的分类、拓扑结构及其控制方式；

分类和拓扑结构：①低频环节并网逆变器；低频环节并网逆变器是早期光伏发电系统采用的逆变器它由工频或高频逆变器工频变压器以及输入、输出滤波器构成；其拓扑结构包括推挽式、推挽正激式、半桥式、全桥式、多重叠加式等电路。②高频环节并网逆变器；高频环节并网逆变器由高频逆变器、高频变压器整流器、极性反转逆变桥以及输入、输出滤波器组成；其拓扑结构包括单管并联交错单管正激式、正激式、推挽式、双管正激式、推挽正激式、并联交错双管正激式、半桥式、全桥式等<sup>3</sup>。

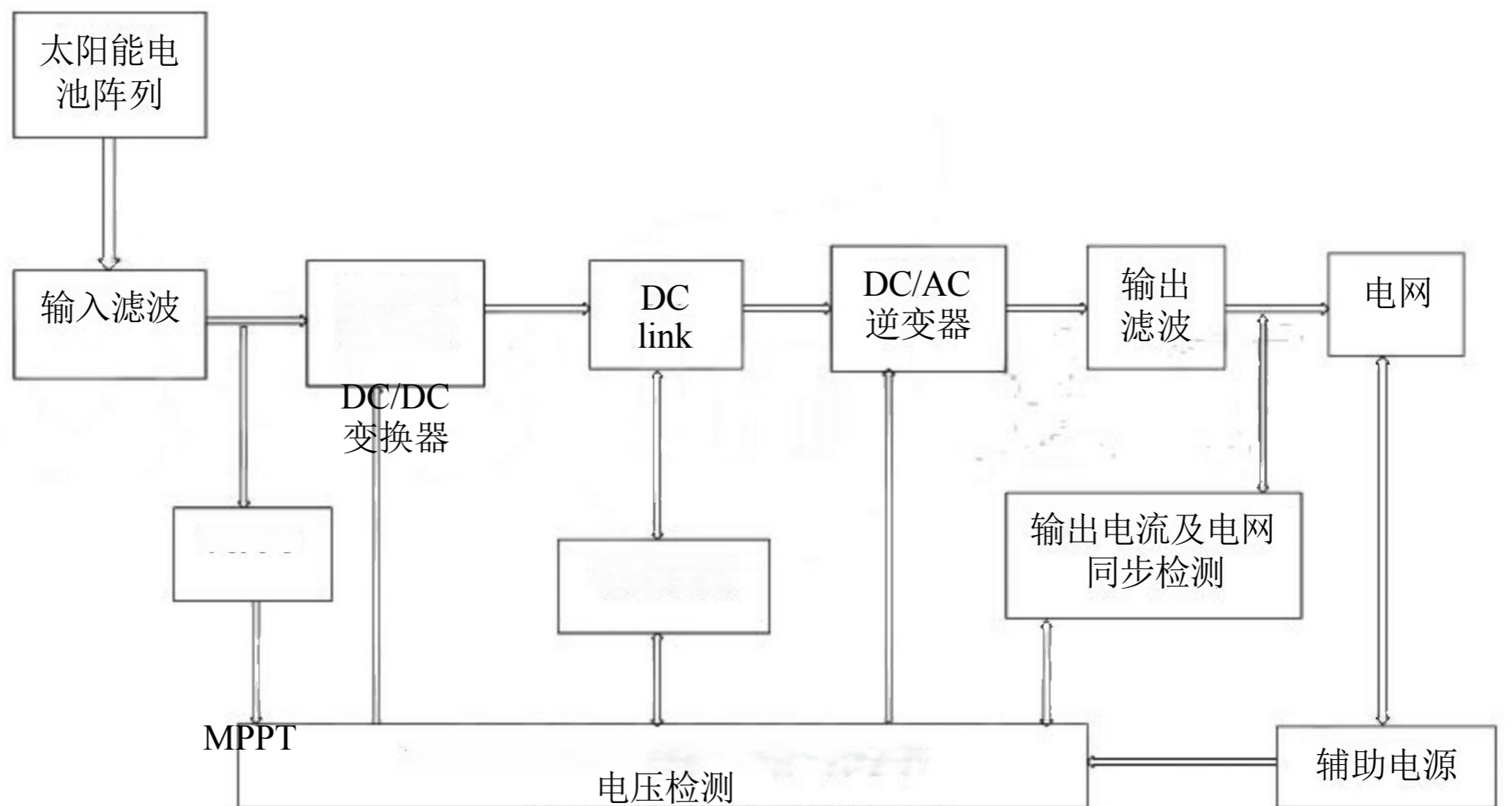
控制方式：为了实现控制光伏阵列最大功率点运行及将太阳能电池产生的直流电转换成交流电并输入公共电网，就需要对电流及功率进行控制，电流的控制通常采用各种优化的 PWM 控制策略，而功率的控制则主要通过最大功率点跟踪来实现<sup>13</sup>。

(4) 选取多转换级带高频变压器的逆变器结构和最大功率控制方法进行仿真验证，并对波形进行分析和研究。

## 第2章 光伏并网逆变器概述

### 2.1 光伏并网系统

率跟踪的DC-DC 变换器及DC-AC 交直流逆变器组成，完成了将太阳能电池阵列输出的直流电变换为交流电，经过交流滤波后把正弦波电流送入电网的工作过程。光伏并网系统结构图如图2-1。



系统采用两级式设计，二者相对独立，由直流母线电压产生联系：前级DC-DC 变换器为升压斩波器，采用Boost 结构，将光伏电池(PV)电压变换到稳定的直流母线电压，并通过MPPT 控制调节DC-DC 变换器的占空比来调节光伏阵列的输出功率，实现最大功率点的跟踪。后级DC-AC 逆变器的主电路结构为单相全桥逆变电路，为输出电流受控的电压型有源逆变器，逆变器的输出侧呈现受控电流源特性，其中开关器件采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)，开关管的栅极驱动信号来源于TMS320LF2407 产生的SPWM 波经驱动电路后的信号。DC /AC 逆变主电路维持DC link 中间电压稳定并将电能转换成220V,50Hz 的正弦交流电。最终通过交流LC 滤波电路滤除高频分量，把与电网电压同频和同相的并网逆变器输出的正弦电流

并入电网。当系统检测到外部故障时，可立即将DC/DC变换器与DC/AC逆变器从电路中切除，实现逆变器的可靠隔离和保护。

## 2.2 光伏并网逆变器的原理

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。

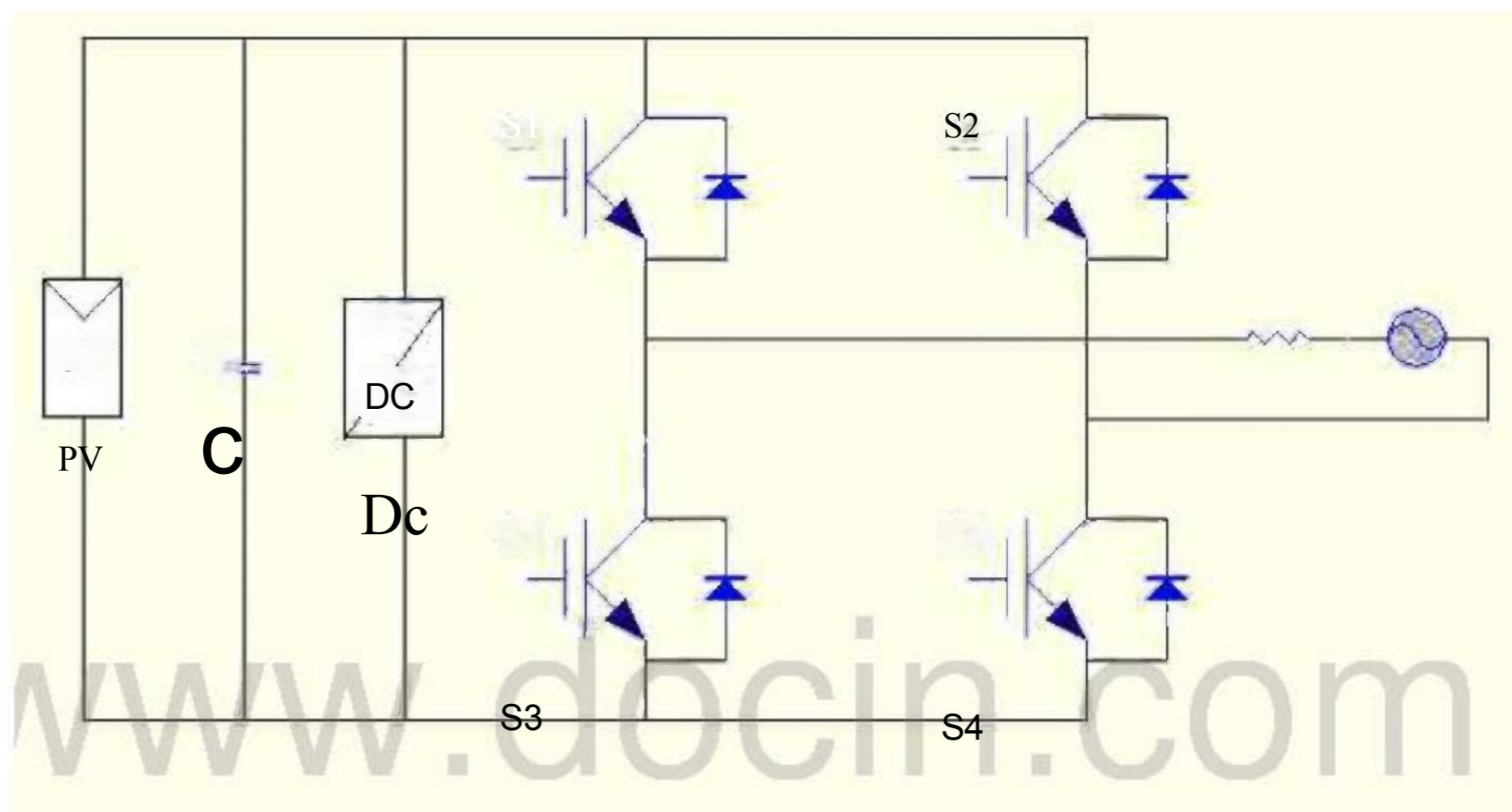


图2-2 并网逆变器主电路拓扑图

## 2.3 光伏并网逆变器的分类及拓扑结构

为了能设计出符合上述要求的并网逆变器，多数人都集中于研究逆变器的拓扑结构及控制方法。逆变器的拓扑结构有很多种，常用的是全桥结构。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。

### (1) 低频环节并网逆变器

低频环节并网逆变器是早期光伏发电系统采用的逆变器。它由工频或高频逆变器、工频变压器以及输入、输出滤波器构成，其电路结构见图2-3。

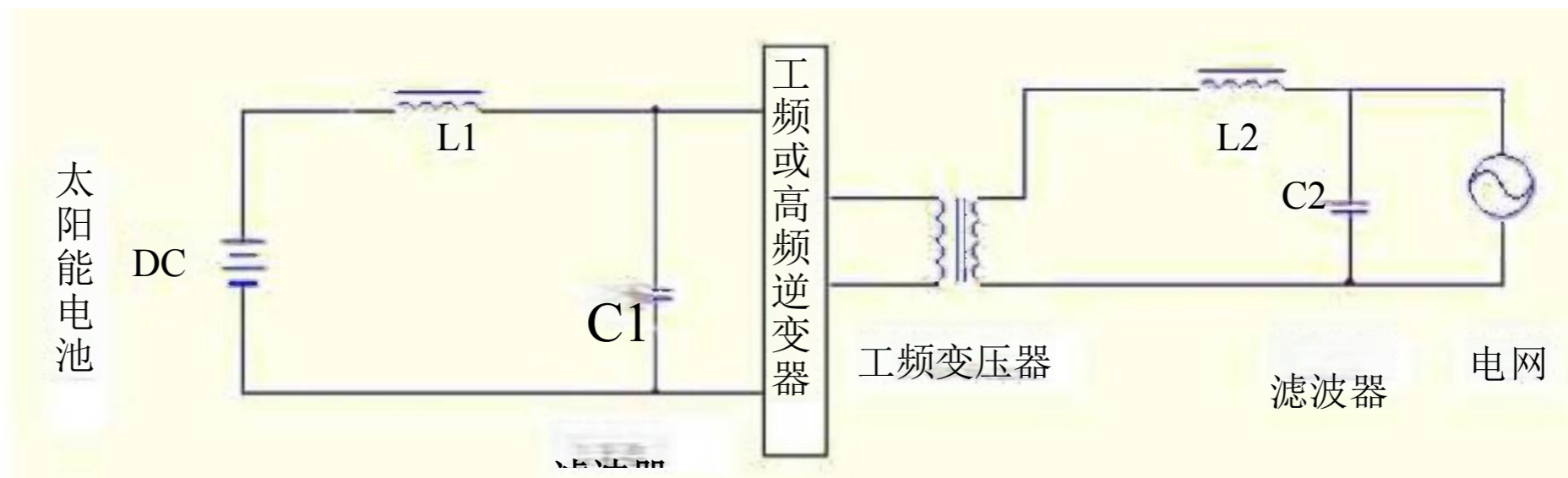


图2-3低频环节并网逆变器电路结构

由这个结构不难看出，它是1个单级逆变系统，即把太阳能电池的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。其拓扑结构包括推挽式、推挽正激式、半桥式、全桥式、多重叠加式等电路，以全桥式为例，其拓扑结构见图2-4。

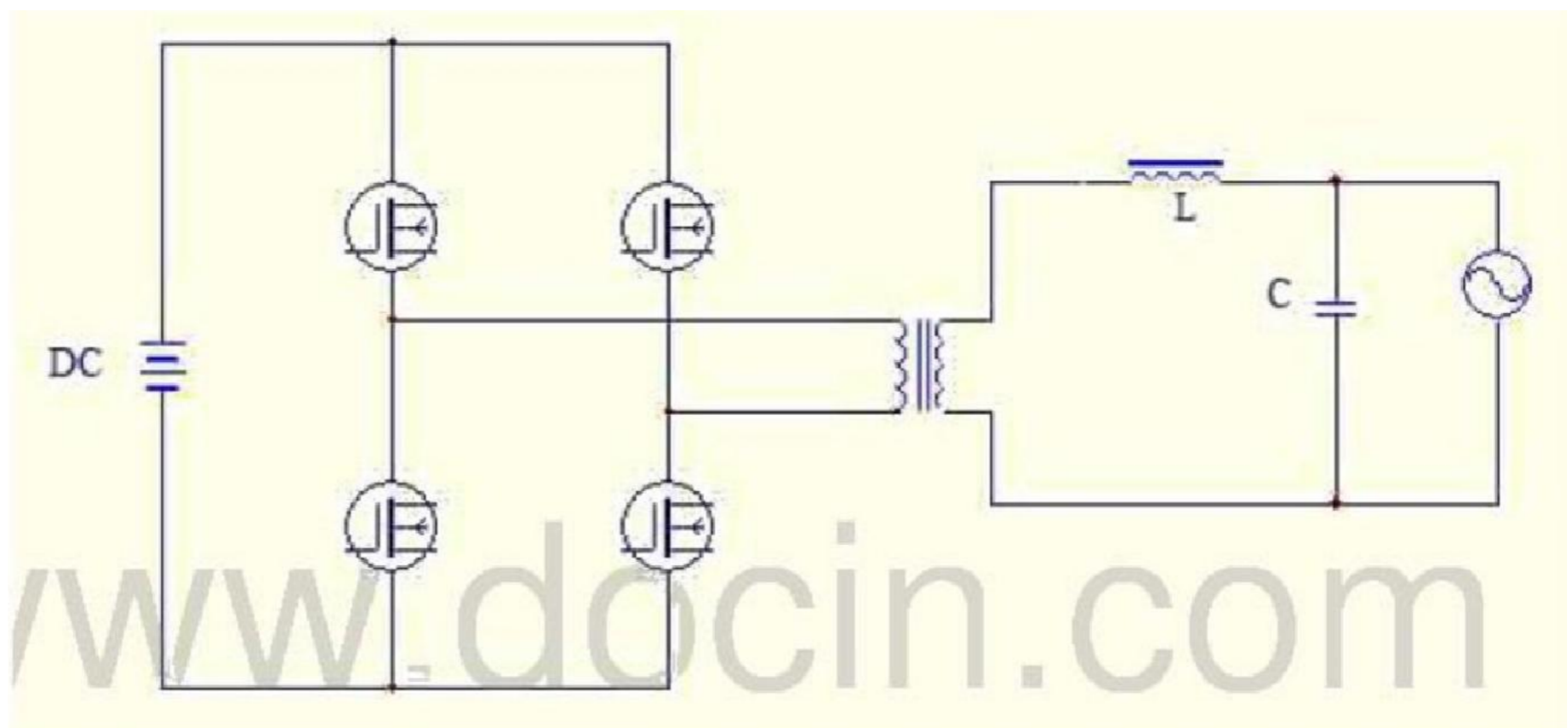


图2-4低频环节并网逆变器拓扑结构

这种逆变器的优点在于，电路结构简洁，所用元器件少，损耗小，转换效率高，容易控制。但是，系统成本高，且变压器体积和重量大，噪声也比较大，因此，其注定要被高频逆变器所取代。

## (2) 高频环节并网逆变技术

高频环节并网逆变器由高频逆变器、高频变压器、整流器、极性反转逆变桥以及输入、输出滤波器组成，其电路结构见图2-5。

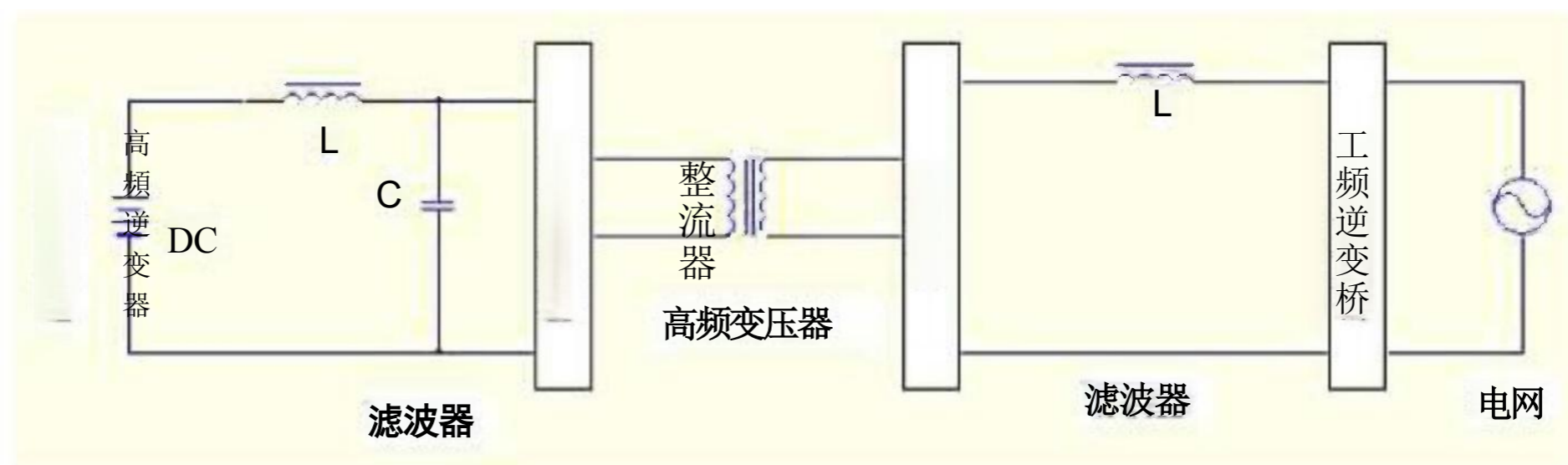


图2-5 高频环节并网逆变器结构图

从这个结构不难看出，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。它主要包括两部分：a) 前级为1个直流变换电路，其功能在于将光伏阵列输出的直流电压变为较高的直流电压，并跟踪光伏电池输出最大功率点；b) 后级是工频逆变环节，它将直流电变换为交流电并输入电网。其拓扑结构包括单管并联交错单管正激式、正激式、推挽式、双管正激式、推挽正激式、并联交错双管正激式、半桥式、全桥式等，我们以全桥式为例(见图2-6)。

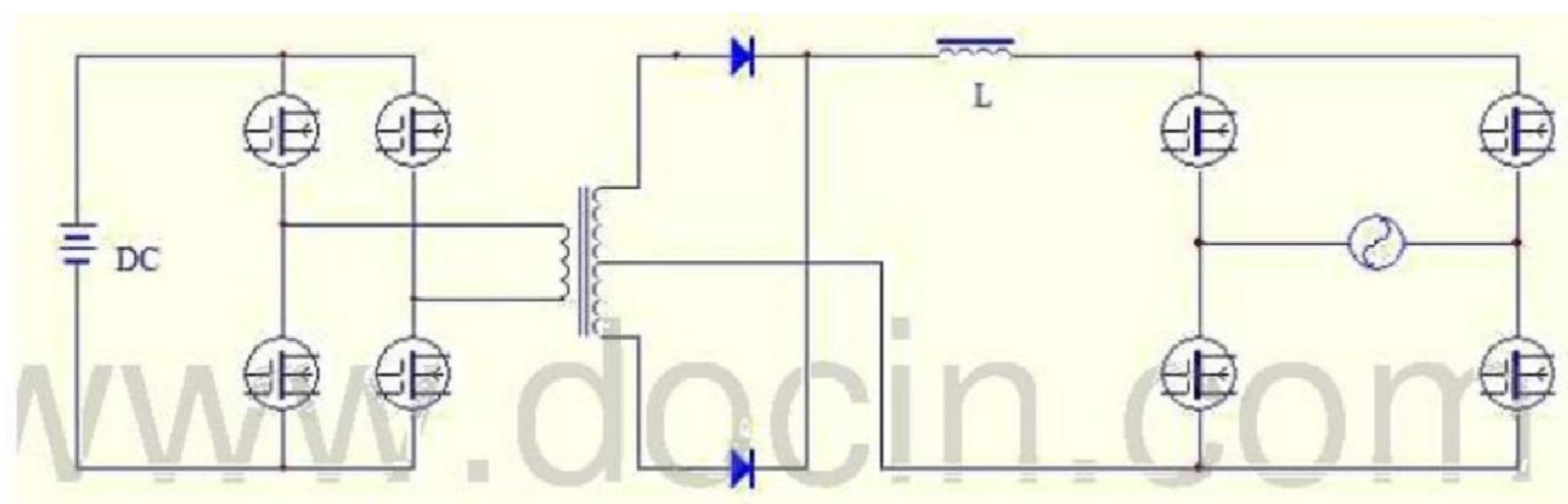


图2-6 高频环节并网逆变器拓扑结构

这种电路由于采用了高频变压器的隔离方式，因此，具有体积小、重量轻的优点，且它利用变比调节电压增益的方式，能够满足最大功率的跟踪和直流电压输入范围的要求。

## 2.4 最大功率点的跟踪基本原理

线性电路原理如图2-7。

图7中负载上的功率为：

$$P_{R_0} = I^2 R_0 = \left( \frac{V_i}{R_i + R_0} \right)^2 \times R_0$$

(2.1)

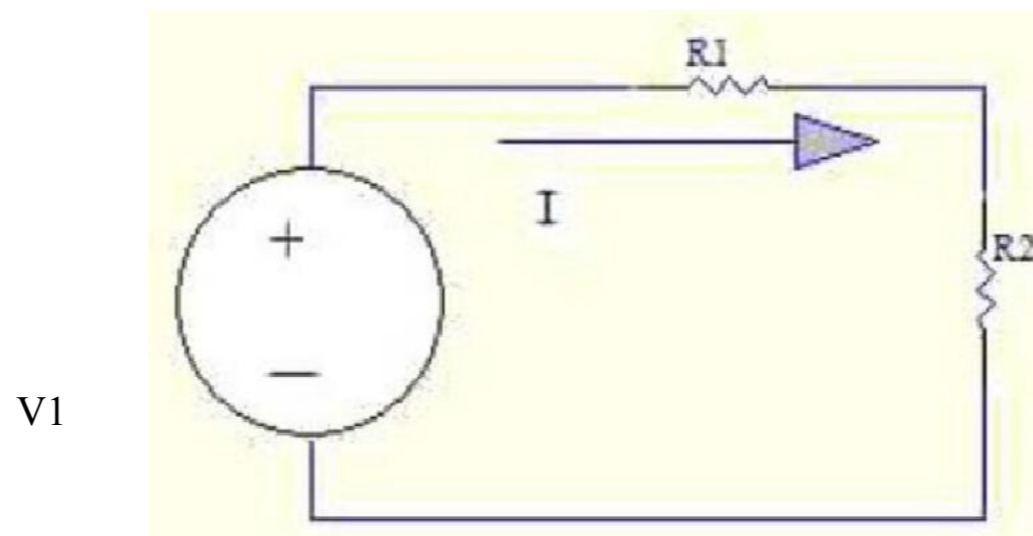


图2-7 简单的线性电路

将式(1)对 $R_0$ 求导，因为 $V$ 、 $R$ 都是常数，所以可得：

$$\frac{dP_{R_0}}{dR_0} = V_i^2 \frac{R_i - R_0}{(R_i + R_0)^3} \quad (2.2)$$

当 $R_0 = R_i$ 时， $P$  时有最大值。对于线性电路来说，当负载电阻等于电源内阻时，电源有最大功率输出。虽然太阳电池和 DC-DC变换电路都是强非线性的，但在极短的时间内，可认为是线性电路。因此，只要调DC-DC转换电路的等效电阻使它始终等于太阳电池的内阻，就可实现太阳电池的最大功率输出，也就实现了太阳电池的最大功率点跟踪。从图2中可以看出，当 $R_0 = R_i$ 时，两端的电压是 $V_i/2$  这表明若 $R$ 两端的电压等于 $V_i/2$ ， $P_p$ ，同样也是最大值。因此在实际应用中，通过调节负载两端的电压实现太阳电池的最大功率点跟踪。

## 2.5 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，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。如果电网中负载正好

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：  
<https://d.book118.com/558051022106006123>