

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2017.5.131

中图分类号:TM615

文献标志码:A

# 一种带储能的级联光伏逆变器的协同调制方法

杨 雯<sup>1</sup>,熊 兰<sup>1</sup>,席自强<sup>1</sup>,查晓明<sup>2</sup>

(1.湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心,武汉 430068;

2.武汉大学电气工程学院,武汉 430072)

**摘要:**提出一种带有储能的混合级联光伏逆变器结构,并针对该逆变器的结构和工作原理,提出基于特定谐波消除(SHE)与载波移相(PS-PWM)调制的协同调制方法。该逆变器将 1 个储能单元与数个光伏单元混合级联,储能单元使用 SHE 消除其输出电压中的部分低次谐波,光伏单元采用 PS-PWM 技术补偿储能单元输出中未被消除的低次谐波,从而进一步降低总的输出电压中谐波含量。仿真结果表明,对于储能单元与光伏单元的输出电压幅值和相位不同的情况,相比于采用单一的 PS-PWM 调制,采用协同调制方法的输出电压中低次谐波含量与总谐波失真(THD)均较低。

**关键词:**储能;光伏逆变器;特定谐波消除;载波移相调制

## A Synergistic Modulation Method for Cascaded PV Inverter with Energy Storage

YANG Wen<sup>1</sup>, XIONG Lan<sup>1</sup>, XI Ziqiang<sup>1</sup>, ZHA Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2 School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A hybrid cascaded photovoltaic(PV) inverter with energy storage is proposed, and a synergistic modulation method based on the specific harmonic elimination(SHE) and carrier phase-shift PWM(PS-PWM) is presented for the inverter's operation. This inverter cascades an energy storage cell with several PV cells, the energy storage cell uses SHE to eliminate the part of low-frequency harmonics in the output voltage, while PV cells adopt PS-PWM to compensate the rest low-frequency harmonics of the energy storage cell, which can further reduce the harmonic in the total output voltage. Simulation results show that, compared with the unified PS-PWM method, the proposed modulation method has less low-frequency harmonics and lower total harmonic distortion(THD) when the modulation indices and output phases of the two types of cells are both different.

**Keywords:** energy storage; photovoltaic inverter; specific harmonic elimination; phase-shift pulse width modulation

级联型光伏逆变器能够缩短光伏电池串联长

度,并在各光伏单元使用独立的最大功率跟踪 MPPT(maximum power point tracking)控制,提高发电效率。同时,级联型逆变器使用载波移相 PS-PWM(phase shift pulse width modulation)调制方法,大幅提高等效开关频率,有效减小低频谐波,因而输出波形质量好,可以减小输出滤波器的体积。但由于光伏电池受到光照等因素的影响其输出波动很大,会造成并网运行的不稳定,因此抑制光伏系

收稿日期:2017-07-28;修回日期:2017-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507054);太阳能高效利用湖北省协同创新中心开放基金资助项目(HB-SKFMS2014035)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51507054); the Open Fund of Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy (HBSKFMS2014035)

统的功率波动也十分重要<sup>[1,2]</sup>。

在分布式光伏并网系统中,通常由于成本等原因不考虑配置储能元件,但随着接入电网的光伏电源规模增大,光伏发电的波动性将会对电网产生较大影响。超级电容具有功率密度大、充放电效率高特点,对于平抑光伏系统功率波动较为理想。现有的带储能元件的光伏逆变器通常采用超级电容与光伏电池在直流侧并联的结构<sup>[3-5]</sup>,这类逆变器结构存在直流侧电压高、输出电平数少等问题,需要较大体积的输出滤波器,并且两级变换器会降低发电效率。

本文提出一种将 1 个储能单元与光伏电池单元混合级联的光伏逆变器结构。和已有的级联型光伏逆变器相比<sup>[6,7]</sup>,这种结构的光伏系统不仅具有级联型光伏逆变器的优点,同时利用储能单元补偿光伏电池的发电功率波动,能进一步增加输出电平数。文中对该新型级联光伏逆变器的系统结构和工作原理进行了介绍,并提出适合于此逆变器结构的协同调制方法,最后仿真验证了该调制方法的可行性。

### 1 系统结构与工作原理

带有储能的混合级联光伏并网系统的单相拓扑结构如图 1 所示。

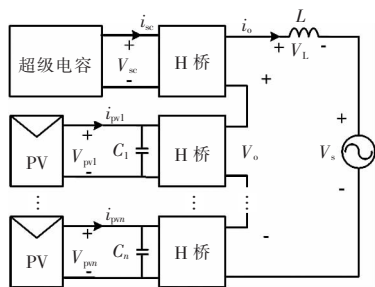
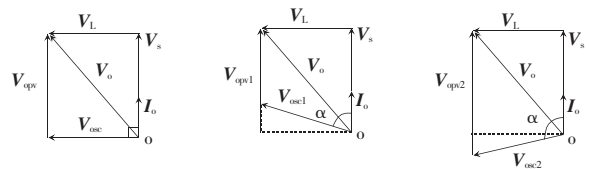


图 1 带有储能的单相混合级联光伏逆变器拓扑结构  
Fig.1 Structure of the single-phase hybrid cascaded photovoltaic inverter with energy storage

该光伏发电系统包含 1 个储能单元和多个普通光伏单元。储能单元为超级电容直接与 H 桥逆变器相连;光伏单元为光伏电池并联一个滤波电容,再与 H 桥逆变器相连。储能单元与光伏单元的数量比例

是可变的,直流电压也不相同。光伏单元的数量越多,输出电压的电平数也越多,从而能有效降低输出电压的谐波含量,减小滤波电感 L 的体积。

该逆变器的工作原理为:当光伏单元输出功率平稳时,储能单元只需保持自身电压稳定,其输出电压  $V_{osc}$  等于滤波电感 L 消耗的无功电压分量;光伏单元的输出电压  $V_{qp1}$  即为有功电压分量,两种单元的输出合成为总输出电压  $V_o$ ,如图 2(a);当光伏单元输出功率波动时,储能单元除了输出无功电压分量,还要输出部分有功电压分量,以抵消光伏单元输出电压的波动,如图 2(b)和(c)所示。



(a) 光伏功率平稳 (b) 储能单元放电 (c) 储能单元充电

图 2 混合级联光伏并网逆变器输出矢量合成

Fig.2 Phasor synthesis diagram of the hybrid cascaded photovoltaic inverter

由上述结构及其工作原理可知,储能单元和光伏单元的直流母线电压、输出电压的幅值和相位都不一致,因此该类变换器属于不对称的混合级联变换器。

### 2 调制原理

通常在级联型逆变器中采用载波移相脉宽调制 PS-PWM 方法,并在单个单元采用单极性倍频调制,这样可以将等效开关频率提高到单个单元开关频率 f 的 2n 倍,基本消除低次谐波。但是这种低次谐波抵消的条件是各单元的直流电压、输出调制波的幅值和相位都一致<sup>[8]</sup>。当条件不满足时,将在 2f 及其倍数频率附近出现谐波。而本文研究的逆变器显然不满足该条件。此外,由于储能单元的充放电,其直流电压会出现大幅度的变化,因而单一 PS-PWM 方法不再适用于此类变换器结构<sup>[9,10]</sup>。

本文提出了一种新的调制方案,对于数量较多的光伏单元统一采用 PS-PWM 方法,而对于单个的

储能单元采用特定谐波消去法,并在光伏单元的调制波中加入补偿储能单元低频谐波的分量,达到进一步降低总体谐波含量的目的。

为简单起见,本文以消去 3 次、5 次谐波的特定谐波消去法为例说明该调制方案的算法与步骤。图 1 的储能单元采用特定谐波消去调制方法<sup>[11-13]</sup>,假定直流母线电压为  $V_{dc}$ ,则具有 1/4 周波对称和奇对称特征的输出电压波形如图 3 所示,图中 3 个独立的开关角度为  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ,则输出电压傅里叶分解表达式为

$$f(t) = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} V_k \sin(k\omega t) \quad (1)$$

式中,  $k$  为谐波次数。各次谐波幅值的表达式为

$$V_k = -\frac{4V_{dc}}{n\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{l=1}^3 (-1)^l \cos(k\alpha_l) \right] \quad (2)$$

令  $V_k=0$  即可消去对应的第  $k$  次谐波。由 3 个独立的开关角度可以得到 3 个独立的方程。对单相逆变器,选择在满足基波输出指令的同时消除 3 次和 5 次谐波。设调制比为  $m$ ,可以得到所需要求解的方程组为

$$\begin{cases} V_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} [2(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3) - 1] = mV_{dc} \\ V_3 = \frac{4V_{dc}}{3\pi} [2(\cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3)) - 1] = 0 \\ V_5 = \frac{4V_{dc}}{5\pi} [2(\cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3)) - 1] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

图 4 所示为在  $[0 \sim 1]$  的调制比范围内,消除 3 次、5 次谐波的开关角度  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  的求解结果。显然,独立开关角个数越多,可以消除的谐波次数也越多,但是方程组式(3)的求解难度也相应增加。对于其他未被消除的谐波,可以依据式(1)、式(2)计算其幅值和瞬时值,将所有需要处理的谐波瞬时值求和即得到需要光伏单元输出补偿的谐波的瞬时值  $h$ 。假设需要补偿的谐波为 7~49 次中的奇次谐波,则  $h$  可计算为

$$h(t) = - \sum_{k=7,9,11}^{49} \frac{4V_{dc}}{k\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{l=1}^3 (-1)^l \cos(k\alpha_l) \right] \sin(k\omega t) \quad (4)$$

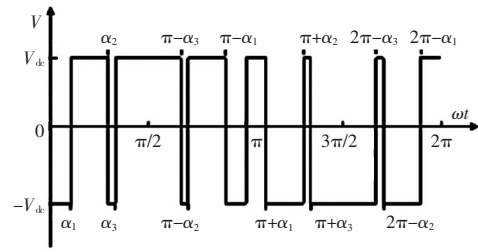


图 3 特定谐波消去法的电压波形

Fig.3 Voltage waveform of SHE

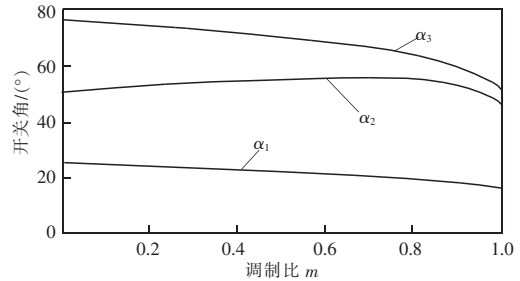


图 4 消除 3 次、5 次谐波的开关角

Fig.4 Switching angles of eliminating 3rd and 5th harmonics

设  $m_{pv}$  为光伏单元控制器输出的瞬时调制比,则光伏单元补偿谐波时的最终输出调制比为

$$m'_{pv} = m_{pv} - h / \sum V_{pvn} \quad (5)$$

式中,  $V_{pvn}$  为第  $n$  个光伏单元直流电压。若 PS-PWM 调制中三角载波幅值范围为  $[-1, 1]$ , 为避免饱和,应满足  $|m'_{pv}| < 1$ 。

由于  $n$  个单元级联的逆变器采用 PS-PWM 调制,输出等效开关频率提高到单个单元开关频率  $f$  的  $2n$  倍。根据香农采样定理,频率在  $nf$  以下的谐波都可以被补偿。当同时满足以上调制比和开关频率两个条件时,就可以用光伏单元的输出来补偿储能单元生成的较低次谐波。

应该注意到,特定谐波消去的导通角以及待补偿谐波瞬时值的计算都可以离线完成,并在实际系统运行中通过查表方式获取,因而这种方法对控制器的计算量不会造成过多负担。同时,由于储能单元的开关频率远低于  $nf$ ,其产生的高次谐波很少,因而其输出波形中的主要谐波成分都可以被补偿,从而在总体上达到了消除逆变器输出的低频谐波的效果。此外,储能单元的开关频率降低有利于减

小损耗。因此本文的调制方法是有应用价值的。

### 3 仿真分析

为验证所提出的协同调制方法应用于并网光伏系统的可行性,本文在 Matlab/Simulink 中搭建了 1 个储能单元与 12 个普通单元级联的逆变器仿真模型,并同所有单元采用统一的 PS-PWM 调制方法时的结果进行了对比。假定各单元直流母线电压恒定,储能单元和光伏单元的直流母线电压分别为 24 V、28 V,光伏单元 H 桥的开关频率为 1 kHz。

图 5 给出了储能单元调制比取不同数值时,其所需要补偿的 7~49 次奇次谐波总和的最大幅值  $H$  (标么值) 以及光伏单元自身能输出的调制比限值 (计算方法为  $1-H \times 24 / (12 \times 18)$ ), 图 5 中该限值在 0.852~0.915 之间变化。若增加光伏单元个数,则由式(5)可知,光伏单元调制比的限制将会提高。实际上,由于待补偿谐波与光伏单元自身调制波的相位差,这样计算的光伏单元调制比最大限值并不是该协同调制方法有解的必要条件,应该根据谐波和调制比的瞬时值来判断是否满足式(5)的条件。但图5还是说明了储能单元的待补偿谐波总幅值随调制比变化的趋势。

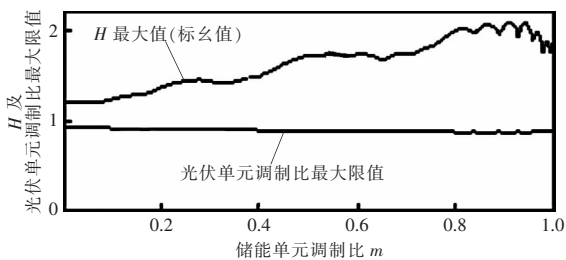


图 5 储能单元的谐波幅值和光伏单元的调制比最大限值  
Fig.5 Harmonic amplitude of energy storage cell and modulation index limit of PV cells

图 6 为当储能单元与光伏单元的调制比分别为 0.8 和 0.91、且两者输出电压存在 90°的相位差时,本文协同调制方法的仿真结果。图 7 为所有 13 个单元统一采用 PS-PWM 调制方法的仿真结果。

由图 6(c)、图 7(c)的对比可见,采用统一的 PS-PWM 调制时,在 40 次附近出现了较明显的低

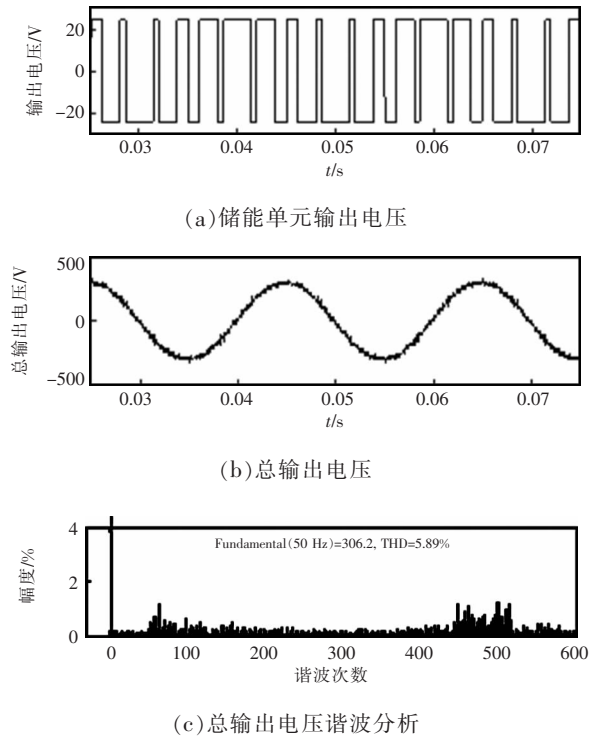


图 6 协同调制的逆变器输出电压及其谐波分析

Fig.6 Voltage waveforms and FFT analysis of synergistic modulation

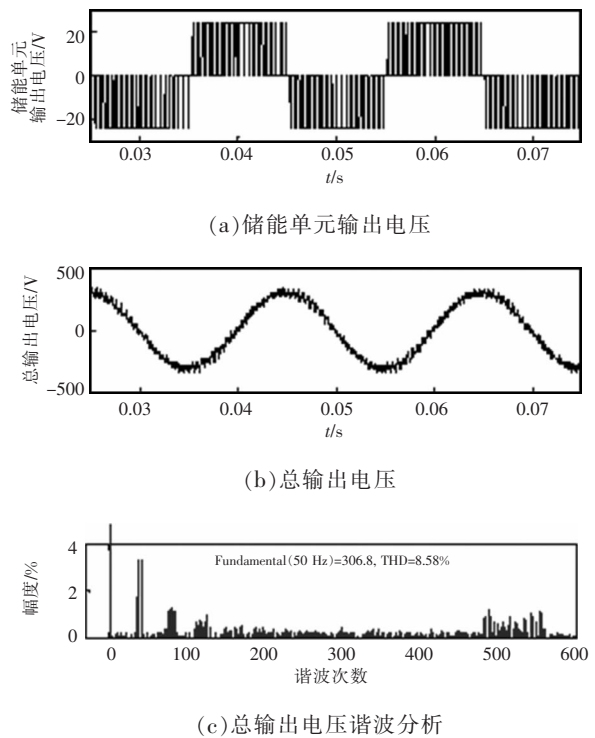


图 7 统一调制的逆变器输出电压及其谐波分析

Fig.7 Voltage waveforms and FFT analysis of unified PS-PWM modulation

频谐波;采用本文的协同调制后,低频谐波较少,且50次以下的谐波含量极低。协同调制的总谐波畸变率THD(total harmonic distortion)低于统一PS-PWM调制。如果将补偿范围从50次以下扩大到更高次谐波,则输出谐波含量将进一步降低。采用统一的PS-PWM调制要减小低频谐波,需要提高单个单元的开关频率,这将导致开关损耗的增加。

另一方面,当采用协同调制方法时,两种单元直流电压的差别、输出电压的调制比和相位差对于逆变器总的输出电压波形质量基本没有影响,波形质量稳定,比较适合用于储能单元直流电压大幅度变化的情况;而统一PS-PWM调制的输出波形中的谐波含量将随着单元的直流电压差异、调制波幅值和相位的差异不断变化。如果级联的光伏单元数量降低,统一PS-PWM调制的输出波形中会出现更高比例的低频谐波成分。其次,采用协同调制方法时,储能单元的开关频率比采用统一PS-PWM调制时低很多,有利于提高效率。

## 4 结语

本文提出了协同调制方法对应带储能的混合级联光伏逆变器的工作原理,利用特定谐波消去调制的精确性和PS-PWM调制的高等效开关频率特性的结合,可以有效减小输出电压的谐波含量。相比于单一的PS-PWM调制方法,该方法在单元直流电压、输出电压的幅值和相位不同时,具有稳定、良好的波形质量。控制简单,易于扩展,能很好应对单元之间输出基波电压的相位和幅值不同的情况,适用于含有储能单元的分布式级联光伏系统。

### 参考文献:

- [1] 张扬帆, 严成, 邹莘剑, 等. 特定谐波消除法在T型三电平并网逆变器中的应用[J]. 电源学报, 2014, 12(4):1-9.  
Zhang Yangfan, Yan Cheng, Zou Shenjian, et al. Selective harmonic eliminated PWM strategy on three-level T-type grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2014,12(4):1-9 (in Chinese).
- [2] Kartick J C, Sujit B K, Suparna K C. Dual reference phase shifted pulse width modulation technique for a N-level inverter based grid connected solar photovoltaic system[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(7):928-935.
- [3] Mora A, Juliet J, Santander A, et al. Dead-time and semiconductor voltage drop compensation for cascaded H-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12):7833-7842.
- [4] 曹剑坤, 谢少军. 移相与SHEPWM结合控制的级联型混合非对称三相变流器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12):290-296.  
Cao Jiankun, Xie Shaojun. Multi-level hybrid asymmetric three-phase inverter with phase shift plus SHEPWM control scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 290-296(in Chinese).
- [5] 周熙炜, 梅芳, 陈金平, 等. 三电平NPC逆变器的一种空间分区矢量提取的SHEPWM调制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(3):102-107, 117.  
Zhou Xiwei, Mei fang, Chen Jinping, et al. A kind of three-level NPC inverter SHEPWM technique based on space division and vector extraction[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14 (3): 102-107, 117(in Chinese).
- [6] Thounthong P, Luksanasakul A, Koseeyaporn P, et al. Intelligent model-based control of a standalone photovoltaic/fuel cell power plant with supercapacitor energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):240-249.
- [7] Sikkabut S, Mungporn P, Ekkaravarodome C, et al. Control of high-energy high-power densities storage devices by Lithium battery and supercapacitor for fuel cell/photovoltaic hybrid power plant for autonomous system applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5):4395-4407.
- [8] Holmes D G, McGrath B P. Opportunities for harmonic cancellation with carrier-based PWM for two-level and multilevel cascaded inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(2):574-582.
- [9] Busarello T D C, Pomilio J A, Bubshait A S, et al. Staircase modulation based battery storage system with asymmetric cascaded H-bridge multilevel inverter[C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015:1-5.

[10]靳艳,黄晶晶,同向前,等.基于级联 STATCOM 的 CPS-SPWM 脉冲相移技术[J].电力系统保护与控制,2015,43(14):120-125.

Jin Yan, Huang Jingjing, Tong Xiangqian, et al. Pulse phase shifting technology of CPS-SPWM for cascaded STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14):120-125(in Chinese).

[11]Kavousi A, Farokhnia N, Fathi S H, et al. Implementation of selective harmonic elimination PWM switching strategy on DSTATCOM[C]. International Conference on Electrical Power Quality & Utilization, 2011: 1-6.

[12]Ahmed I, Borghate V B. Simplified space vector modulation technique for seven-level cascaded H-bridge inverter [J]. IET Power Electronics, 2013, 7(3):604-613.

[13]杨克虎,陈良育,袁志宝,等.求解特定消谐变换器开关角度的并行完备算法[J].电力系统自动化,2015,39(13):87-93.

Yang Kehu, Chen Liangyu, Yuan Zhibao, et al. Parallel com-

plete algorithm for solving switching angles of SHEPWM inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13):87-93(in Chinese).



杨雯

#### 作者简介:

杨雯(1992-),女,硕士研究生,研究方向:多电平逆变器的控制,E-mail:yxm\_sxb@163.com。

熊兰(1978-),女,通信作者,博士,讲师,研究方向:多电平逆变器的控制、新能源发电并网,E-mail:xusbl@hotmail.com。

席自强(1960-),男,博士,教授,研究方向:电能质量分析及控制,E-mail:695936405@qq.com。

查晓明(1967-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:大功率电力电子装置及其在电能质量控制、高压电机驱动、柔性输电、新能源及微电网技术中的应用,E-mail:xmzha@whu.edu.cn。

## CNKI 推出《中国高被引图书年报》

日前,中国知网(CNKI)中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》,该报告基于中国大陆建国以来出版的 422 万余本图书被近 3 年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次,分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍,他们统计并分析了 2013-2015 年中国学术期刊 813 万余篇、中国博硕士学位论文 101 万余篇、中国重要会议论文 39 万余篇,累计引文达 1451 万条。根据统计数据,422 万本图书至少被引 1 次的图书达 72 万本。研制方根据中国图书馆分类法,将 72 万本图书划分为 105 个学科,分 1949-2009 年和 2010-2014 年两个时间段,分别遴选被引最高的 TOP10% 图书,共计选出 70911 本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示,这 7 万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的 1.68%,却获得 67.4% 的总被引频次,可见这些图书质量上乘,在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科 h 指数”排名前 20 的出版单位的评价指标,对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发,评价图书的学术影响力,弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾,科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创,是全面、客观评价图书学术影响力的工具,填补了目前图书学术水平定量评价的空白,在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面,均具有较强的参考价值,也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物,分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学 6 个分卷,随盘赠送图书,欢迎您咨询、订购。咨询电话:010-82710850 82895056 转 8599, email: aspt@cnki.net