

一种带辅助微源的新型主从协调控制策略^{*}

程启明¹, 张宇¹, 程尹曼², 谭冯忍¹

(1. 上海电力学院 自动化工程学院, 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 微电网的协调控制方法是微电网最为关键的技术之一, 主从控制方法是微电网协调控制中的常用方法。针对传统的主从控制存在的问题, 提出了一种带辅助微源的新型主从控制策略。在传统主从控制基础上, 增设一个采用下垂控制的辅助控制单元, 此辅助单元可与主控单元一起共同支撑微电网的电压与频率稳定, 且当主控单元出现故障时可替补充当新的主控单元, 克服了传统主从控制采用单一主控单元发生故障时微电网崩溃的危险, 从而增强了主从控制方式的稳定性。MATLAB/Simulink 软件仿真验证了所提控制策略的有效性和可行性。

关键词: 微电网; 下垂控制; 协调控制; 主从控制; 辅助控制单元; 并网逆变器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0006-06

A New Master-Slave Coordinated Control Strategy with Auxiliary Unit of Distributed Generation^{*}

CHENG Qiming¹, ZHANG Yu¹, CHENG Yinman², TAN Fengren¹

(1. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory,

College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The coordination control method of microgrid was one of the most important technologies in microgrid, and the master slave control method was a common method in the coordinated control of microgrid. Aiming at the problems existing in the traditional master slave control, a new type of master slave control strategy with auxiliary micro source was presented. On the basis of traditional master-slave control, it added a droop control of auxiliary control unit which could be with the main control unit together to support micro network voltage and frequency stability, and could be the new main control unit when the main control unit fails. The method overcame the danger that the traditional master slave control system adopted a single main control unit, and the stability of the master slave control mode was enhanced. The effectiveness and feasibility of the proposed control strategy were verified by MATLAB/Simulink software simulation.

Key words: microgrid; droop control; coordinated control; master-slave control; auxiliary control unit; grid-connected inverter

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61304134); 上海市重点科技攻关计划项目(14110500700); 上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)

作者简介: 程启明(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等。

张宇(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、电机控制等。

程尹曼(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制等。

谭冯忍(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制等。

0 引言

随着科学技术的不断进步,资源环境问题日益增加,微电网可以综合多个分布式电源(Distributed Generation, DG)提高新能源的稳定性和利用率^[1-4]。如何控制微电网内部多个 DG(也称微源)的协调控制以及在并网/孤岛模式之间平滑切换是一个亟待解决的问题^[5]。

微电网协调控制策略可分为对等控制^[6-7]、分层控制^[8-9]和主从控制^[10-14]。其中:对等控制具有“即插即用”的特点,各微源只需通过各自接入点信息参与微电网的电压、频率调控,且微电网孤岛/并网切换中各微源无需改变控制方法,但这种控制属于有差控制,灵敏度不高;分层控制一般都设有中央控制器,用于发送控制信号,可实现对微源的负荷、功率预测,根据系统各状态信息对运行计划进行调整,但微源与中央控制器之间都需通信线路,通信失败会影响系统的运行;主从控制的微电网可在孤岛时保持电压和频率的稳定,但对主控单元的依赖程度大,一旦主控单元出现故障,微电网将不能运行。由于主从结构可以方便地整合现有的商用并网逆变器,因此现阶段各种实际微电网工程仍以主从结构为主。

微源 DG 的控制策略可以分为恒功率(PQ)控制、恒压恒频(U/f)控制和下垂(droop)控制。在传统的主从控制中,主控单元一般采用单个 U/f 控制或 droop 控制,此时主控单元的容量及灵活性直接影响到系统的稳定性。目前主从控制中主控单元也有采用多个 droop 控制^[15],此时单个 droop 控制单元的损坏可通过其他 droop 控制单元调节来补偿,微电网系统的稳定性得到提高,但主控单元采用的 droop 控制算法属于有差调节,而从控单元一般均为随机波动的 DG,一般工作于 PQ 控制模式,实现最大功率发电,因此它们不能辅助主控单元调节电压和频率。

为了解决上述问题,本文对传统的主从控制方法进行改进,提出了一种带辅助微源的主从控制方法,其中:一个主控单元采用 U/f 控制,将一个或多个 droop 控制的单元作为主控单元的辅助控制单元,其他所有单元作为从控单元,它们采用 PQ 控制。这样设置辅助控制单元可以充分利用 droop 控制的 droop 特性,提高主从控制的稳定性

和适用性。

1 DG 的控制方法

本文所提的新型主从控制方法中,主控单元、辅助控制单元、从控单元分别采用了 U/f 控制、droop 控制、PQ 控制这 3 种控制方法。

1.1 droop 控制

droop 控制是通过模拟同步发电机出口侧的有功功率和电压频率、无功功率和电压幅值的关系特性对系统进行控制,能实现逆变器出口侧近似于传统的同步发电机特性。它可实现多台逆变器的对等并联,能够自动分配各种 DG 的有功、无功功率。

图 1 为 droop 控制系统的原理框图。图 1 中, L_f 为滤波电感、 C_f 为滤波电容、 Z 为负载阻抗, u_{abc} 、 i_{abc} 、 i_{Cabc} 、 Z_{line} 为线路电压、线路电流、电容电流、线路阻抗, P_n 为额定有功功率, P 、 Q 为计算所得有功功率、无功功率。微源 DG 的 droop 控制结构包含测量元件、计算功率环节、功率控制环节、电压电流双环节。

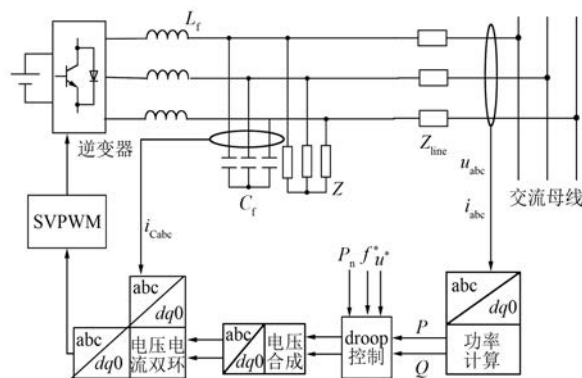


图 1 droop 控制系统的原理框图

droop 控制的原理如下:测量输电线路中的电压、电流,计算出平均有功功率和无功功率并进行电压合成;经过功率控制环中 droop 特性得到相应的电压与频率指令值;电压电流控制环产生 SVPWM 调制信号。

droop 特性可表示为

$$\begin{cases} f = f^* + mP_n \\ u = u^* - nQ_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 、 n 为有功功率和无功功率的下垂系数,其计算式为

$$m = \frac{f_n - f_{\min}}{P_{\max} - P_n} \quad (2)$$

$$n = \frac{U_0 - U_{\min}}{Q_{\max}} \quad (3)$$

式中: $f_{\min}$ ——微源输出有功功率最大相应的最小频率;

$P_{\max}$ ——微源在频率下降时允许输出的最大有功功率;

$U_{\min}$ ——微源输出无功功率最大时相应的最小电压幅值;

$Q_{\max}$ ——微源在电压幅值下降时允许输出的最大无功功率。

另外,在设置 m 、 n 时,需要保证电压与频率变化在一定范围内满足电能质量要求。本文的新型主从控制系统中辅助控制单元采用 droop 控制。

1.2 PQ 控制与 U/f 控制

图 2 为 PQ 控制和 U/f 控制两种控制方法的原理框图。图 2 中 P_{ref} 、 Q_{ref} 、 u_{ref} 分别为额定有功功率、额定无功功率、额定电压。图 2 中画出了 PQ、 U/f 两种控制原理框图,但一个微源某一时刻只能工作在一种控制方法中,例如,传统的主从控制中,微电网并网运行时主控单元工作在 PQ 控制,而微电网孤岛运行时主控单元以 U/f 控制为工作方式。

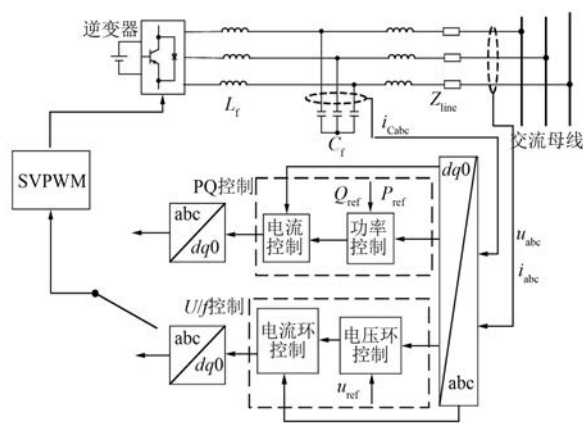


图 2 PQ、 U/f 两种控制系统的原理框图

PQ 控制是按照有功 P_{ref} 和无功 Q_{ref} 的给定参考值发电的控制技术。间歇性和波动性的 DG (如风力发电、光伏发电等)一般都采用 PQ 控制,这样可以实现最大功率发电。采用这类控制的 DG 其本质相当于受控电流源。本文的新型主从

控制系统中从控单元采用 PQ 控制。

U/f 控制可以使得 DG 输出的电压 U 幅值与频率 f 保持稳定不变,而输出的功率 P 、 Q 可以变化。本文的新型主从控制系统中主控单元采用 U/f 控制。

2 新型主从控制系统

根据前面引言所述,传统的主从控制方法存在一些缺点,本文在传统的主从控制基础上提出一种新型主从控制方法,此法实际上是在传统的主从控制上,增加一个辅助主控单元的辅助控制单元。由于 droop 控制的 droop 特性可灵活调节功率分配,故辅助控制单元选择采用 droop 控制,这样可充分利用 droop 控制的 droop 特性,提高系统的适用性。

图 3 为本文提出的带辅助单元的主从控制微电网系统结构示意图。图 3 中,微电网包括 DG1、DG2、DG3 共 3 个微源,其中:主控微源(即主控单元)DG1 在孤岛运行时采用 U/f 控制,在并网运行时采用 PQ 控制;从控微源(即从控单元)DG3 则一直采用 PQ 控制;DG2 作为主控单元 DG1 的辅助单元,采用 droop 控制。

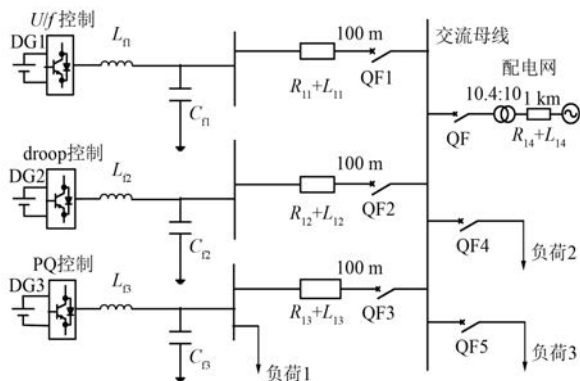


图 3 本文提出的带辅助单元的主从控制微电网系统结构

若系统中只有主控单元 DG1 与从控单元 DG3,其运行在传统的主从控制模式,孤岛运行时微电网的频率和电压只能由处于主控地位的 DG1 采用 U/f 控制来维持。由于多个 U/f 控制不能工作在一个微电网系统中,且 PQ 控制又不能调节电压与频率,只有 droop 控制方法中的独特 droop 特性可使其充当主从单元的辅助单元,

因此,除了主控单元 DG1(采用 U/f 控制)提供频率和电压的参考值外,本文加入了采用 droop 控制的辅助控制单元 DG2,其作用是协助主控单元 DG1 共同完成微电网系统频率和电压的稳定。这样,采用 droop 控制的 DG2 来充当辅助单元时,即使采用 U/f 控制的主控单元突然发生事故而脱离微电网,采用 droop 控制的辅助单元 DG2 也可替补充当新的主控单元而不至于微电网崩溃。因此,本文提出的带辅助单元主从的微电网控制面对主控单元发生故障等情况能够自适应的灵活处置,保证微电网的电压与频率稳定,从而提高微电网的电能质量。此外,由于增加的辅助单元采用了 droop 控制,这种控制方法在并网/孤岛运行模式切换时,无需改变 DG 的控制方法,也即辅助单元在并网运行时可以继续采用 droop 控制方法。

3 仿真分析

本文在 MATLAB/Simulink 软件平台上搭建了图 3 的微电网系统仿真模型。由此仿真验证本文提出的新型主从协调控制方法的可行性和有效性。

仿真参数选取如下:滤波参数 $R_f=0.1\ \Omega$, $L_f=1.5\ \text{mH}$, $C_f=2\ 000\ \mu\text{F}$; U/f 控制模块中,电压设定值 u_{ref} 为 $300\ \text{V}$, $f^*=50\ \text{Hz}$,电压控制环的比例系数 $K_{\text{up}}=10$ 、积分系数 $K_{\text{ui}}=200$,电流控制环的比例系数 $K_{\text{ip}}=0.5$; PQ 控制模块中, $P_{\text{ref}}=10\ \text{kW}$ 、 $Q_{\text{ref}}=0\ \text{kvar}$,电压控制环的比例系数 K_{up} 为 0.5 、积分系数 $K_{\text{ui}}=20$; droop 控制模块中下垂系数 $m=0.000\ 01$ 、 $n=0.000\ 3$, $P_n=20\ \text{kW}$, $f_n=50\ \text{Hz}$, $U_0=311\ \text{V}$,电压电流双环结构中电压环 PI 参数 $K_p=10$, $K_i=100$,电流环比例系数 $K_p=10$;输电线路中, DG 低压线路阻抗为 $0.064\ 2+0.000\ 83j\ \Omega/\text{km}$,配电网高压线路阻抗为 $0.3\ \Omega+0.2j\ \Omega/\text{km}$;微电网所带的负荷 1、负荷 2、负荷 3 分别为 $P_1=10\ \text{kW}$ 和 $Q_1=5\ \text{kvar}$ 、 $P_2=20\ \text{kW}$ 和 $Q_2=10\ \text{kvar}$ 、 $P_3=10\ \text{kW}$ 和 $Q_3=5\ \text{kvar}$ 。

仿真时间共 2 s。其中:0~1 s 期间微电网孤岛运行,1 s 时刻微电网由孤岛运行切换到并网运行,1~2 s 期间微电网并网运行。微电网的具体操作步骤如表 1 所示。

表 1 微电网的具体操作步骤

时刻 t/s	微电网操作步骤
0	微电网开始孤岛运行, DG1~DG3 均接入系统运行, 负荷 1~3 运行在额定功率
0.2~0.3	投切负荷 3, 检验本文提出的带辅助单元的新型主从控制稳定性
0.5	DG3 脱离微电网, 开始采用传统的主从运行
0.7~0.8	投切负荷 3, 检验传统的主从控制孤岛运行
1	微电网由孤岛运行切换到并网运行, 且 DG3 连入微电网运行
1.2~1.3	投切负荷 3, 检验本文提出的带辅助单元的新型主从控制稳定性
1.5	DG3 脱离微电网, 开始传统的主从运行
1.7~1.8	投切负荷 3, 检验传统的主从控制运行

图 4 为本文的新型主从控制与传统的主从控制两种控制方法仿真对比曲线。其中:图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)、图 4(d)分别为微电网的母线电压、负荷侧母线电流、负荷 2 侧功率、负荷侧母线频率。图 4 说明如下。

(1) 0~1 s 微电网处于孤岛运行模式。其中:0~0.5 s 期间采用本文的新型主从控制方法运行,0.5~1 s 期间采用传统的主从控制方法运行。这 2 个时间段中,负荷 3 进行了投入与切除操作。

通过比较这 2 个时间段的曲线,可以分析在孤岛条件下两种主从控制方法的差异。

由图 4(a)的 0~0.5 s 新型主从控制母线电压波形可见,初始时电压稳定在 320 V,切除负荷 3 后电压上升为 340 V;而由图 4(a)的 0.5~1 s 传统主从控制母线电压波形可见,初始时电压稳定在 250 V,切除负荷 3 后电压升高到 280 V。因此,本文加入的 droop 控制的辅助单元有助于补偿电压降落。由图 4(b)的 0~0.5 s 新型主从控制母线电流波形可见,电流波形与并网时相比更接近 100 A,这有利于系统在并网/孤岛模式切换的稳定性;由图 4(b)的 0.5~1 s 传统的主从控制母线电流波形可见,其电流由 100 A 变为 75 A 有明显变化,这不利于系统的稳定运行。图 4(c)的 0~0.5 s 新型主从控制与 0.5~1 s 传统主从控制负荷 2 侧功率波形相比可见,新型主从控制波形更加平稳,且与并网时波形更接近,这在并网/孤岛模式切换时功率分配更易实现。由图 4(d)的

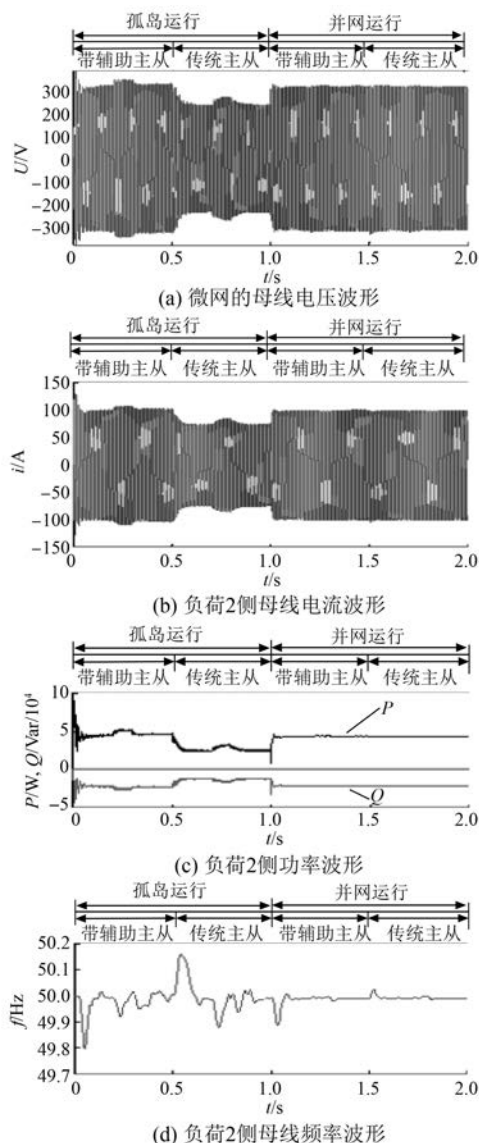


图4 新型主从控制与传统的主从控制两种控制方法仿真对比曲线

0~0.5 s 新型主从控制与 0.5~1 s 传统主从控制的母线频率波形可见, 新型主从控制更近于 50 Hz 的额定频率, 且在切除负荷 3 时, 传统的主从控制波形波动较大, 将有损于设备的寿命与系统的稳定性。

由此可见, 在孤岛运行模式中, 由电流、电压、功率和频率的波形都可明显看出, 本文提出的带辅助单元的新型主从控制更加稳定。

(2) 1~2 s 微电网处于并网运行模式。其中: 1~1.5 s 期间采用本文的新型主从控制方法运行, 1.5~2 s 期间采用传统的主从控制方法运行。这 2 个时间段中, 负荷 3 也进行了投入与切除操作。

通过比较图 4(a)~图 4(d) 的 1~1.5 s 新型主从控制和 1.5~2 s 传统主从控制的波形可见, 在整个并网模式下, 两种主从控制方法中电压都维持在约 320 V, 频率在 50 Hz 附近, 电流与功率也基本维持不变。因此, 两种主从控制都能在并网模式中很好地运行。

另外, 0.5 s、1 s、1.5 s 时微电网进行了 3 次主从控制方法或微电网工作模式的切换操作, 它们分别是孤岛模式下新型主从控制改为传统主从控制、由孤岛模式下传统主从控制切至并网模式下新型主从控制、并网模式下新型主从控制改为传统主从控制。由图 4 可见, 这 3 次切换中微电网基本上都能平滑切换。

4 结 语

本文提出了一种带辅助单元的新型主从协调控制策略, 通过仿真可以得到以下结论: 在微电网处于孤岛状态、并网状态、孤岛与并网切换状态等所有工作状态下, 本文的新型主从控制方法都优于传统主从控制方法, 能改善微电网系统的控制性能, 提高微电网系统的稳定性和可靠性, 尤其在孤岛运行时的电压、电流、功率和频率等特性明显更好。这表明本文引入的辅助单元为微电网提供了更加稳定的电压和频率支撑。

【参 考 文 献】

- [1] DASGUPTA S, MOHAN S N, SAHOO S K, et al. A plug and play operational approach for implementation of an autonomous-microgrid system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3): 615-629.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-22.
- [3] 贺军, 张俊洪. 风储微电网运行控制研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(12): 50-54.
- [4] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [5] CARVALHO P M S, FERREIRA L, ILIC M D. Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: voltage control limitations and risk of cascading [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 82-88.
- [6] HUA M, HU H B, XING Y, et al. Multilayer control

- for inverters in parallel operation without inter-communications [J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2012, 27(8): 3651-3663.
- [7] KIM J, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2011, 26(3): 689-701.
- [8] NUNNA H S V S, DOOLLA S. Multiagent-based distributed energy management for intelligent microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [9] DOU C X, LIU B. Multi-agent based hierarchical hybrid control for smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 771-778.
- [10] WANG C S, LI X L, GUO L, et al. Aseamless operation mode transition control strategy for a microgrid based on master-slave control[J]. Science China Technological Sciences 2012, 22(6): 1644-1654.
- [11] 邱麟, 许烈, 郑泽东, 等. 微电网运行模式平滑切换的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 172-176.
- [12] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微电网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 163-170.
- [13] 陈杰, 陈新, 玛志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3098.
- [14] 李霞林, 郭力, 王成山. 微网主从控制模式下的稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 24-34.
- [15] 李军, 许嘉宁, 孙志强, 等. 微电网主从控制建模仿真[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2012, 10(3): 16-22.

收稿日期: 2016 -11 -21

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 TOP 10% 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