

# Optimization and Evaluation of Energy-Storage Capacity for Wind Farm\*

Lingling Huang, Yang Fu

College of Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai  
Email: linglinghuang82@gmail.com

Received: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2013; revised: Sep. 6<sup>th</sup>, 2013; accepted: Sep. 11<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Lingling Huang, Yang Fu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In order to configure energy-storage devices for wind farm economically and satisfy the economic operation requirements of large power generators, this paper proposed a method to calculate the demanded energy-storage capacity for one-charge-one-discharge requirement of the wind farm. An actual example illustrates the way to store the energy in the low load period can get a good utilization rate of energy-storage devices and the wind energy.

**Keywords:** Wind Farm; Energy-Storage System; Energy-Storage Capacity; Utilization Rate

## 风电场储能容量配置与评估研究\*

黄玲玲, 符 杨

上海电力学院电力与自动化工程学院, 上海  
Email: linglinghuang82@gmail.com

收稿日期: 2013年8月22日; 修回日期: 2013年9月6日; 录用日期: 2013年9月11日

**摘 要:** 为了经济合理地风电场配置储能设备, 获得最佳的利用效率, 同时满足消耗性能源为主的电网中大型火电或核电机组的经济运行的要求, 本文结合储能装置每日一充一放的运行需求特点, 提出了电网谷荷时段对风电场发电功率进行存储的思路, 对风电场需求的储能装置的容量和功率进行配置, 并结合设备管理体系对配置结果进行评估。一个风电场的实际上网电量数据分析说明该方法能够获得较优的综合利用效果。

**关键词:** 风电场; 储能设备; 储能容量; 设备利用率

### 1. 引言

风能是一种随机性和间歇性的能源, 风电场的有功出力随着气象条件, 季节和每日时间段的不同而变化, 有功输出的控制能力有限, 像传统发电厂一样根据调度指令进行发电量调节难度较大。同时, 由于风电预测困难, 当并网运行的风电容量不断扩大时, 对电网调峰、调频以及电网安全稳定带来了严重的影响<sup>[1-3]</sup>。为了解决大规模风电并网的问题, 除了分析电网最大穿透功率、建立相应容量的备用电源和调节设备

之外, 电力储能装置为其提供了新的解决方案。

目前已经有多种储能技术被应用于风力发电系统之中, 如飞轮储能、电池储能、超级电容储能及超导储能等。各种储能技术由于工作原理不同, 使其从功率、容量、工作环境以及充放电时间特性上都存在较大的差异。文献[4-6]表明, 储能装置能够有效抑制系统振荡, 提供系统暂态及动态稳定性; 文献[7]设计了神经网络控制器来调节储能装置的有功功率和无功功率, 能够保证无功功率输出的合理和最优。但是储能装置的最终目标还是为了实现有功功率在

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51177098)。

时间上的控制。因此，本文从储能装置对风电场有功出力进行调节的角度出发，不考虑诸如调压和无功控制等其它功能。

国内风电场主要是由发电集团和能源公司投资或持股，风电场业主作为独立的经济实体，在进行储能容量配置时，除了要满足电网的并网标准的要求之外，还需要进行经济性分析。在当前4类风电场上网电价的政策下，风电场配置储能设备意味着投资的增加，储能设备容量越大，投资增加的越多，对风电场的经济效益影响也就越大。因此，经济合理地不同容量的风电场配置储能设备，既不造成储能设备的浪费，又不因储能容量不足而未达到储能的预期效果，是风电场配置储能设备需要解决的一个关键问题。

本文结合电网的有功调节需求和风电场有功功率输出的特点，从风电场的角度出发，满足储能装置每日一充一放的运行需求，以风电场配置的储能设备利用率最优为目标，对储能设备的功率和容量进行选择。并通过实际风电场有功出力特性，对该方法指导下储能设备的利用率进行评估。

## 2. 电网对风电场有功出力的要求

目前已经投运的大型风电场基本都采用最大风能捕捉的控制策略。因此，风电场输出的有功功率受风速和天气的影响很大，表现出明显的波动特定。图1所示为某风电场典型并网日有功功率曲线。

为了减少风电功率波动性对电网运行的影响，储能设备被引入进行风电功率的平滑，以减少对系统有功-频率的影响。以图2为例，通过对储能功率 $P_b$ 的控制，可以较好地实现对并网有功功率 $P_{out}$ 进行控制<sup>[8]</sup>。

从图2可以看出，风电场向电网输送的功率为：

$$P_{out} = P_w + P_b \quad (1)$$

其中， $P_w$ 为风电场发出的有功功率； $P_b$ 为储能设备的有功功率， $P_b$ 为+时，储能设备处于放电在状态， $P_b$ 为-时，储能设备处于充电状态； $P_{out}$ 为风电场实际向电网输送的有功功率。

实际上，风电场的并网运行还需要考虑其他因素。电力调度在安排发电机组时，要保证高峰负荷可

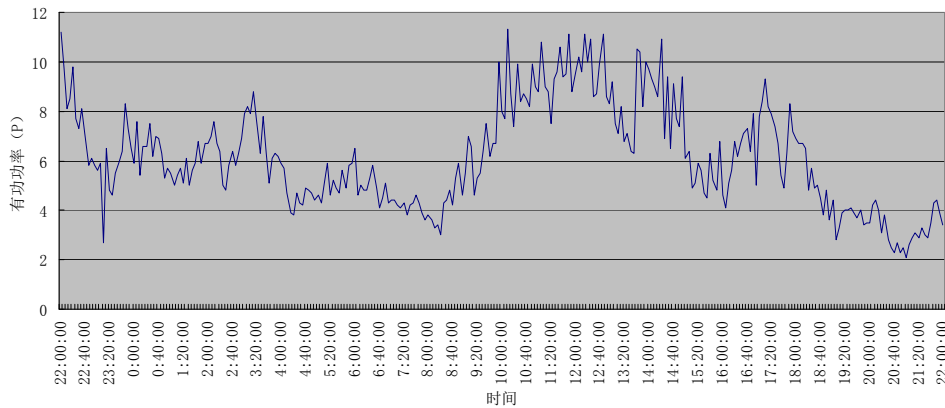


Figure 1. Reactive power curve of a wind farm  
图 1. 某风电场典型并网日有功功率曲线

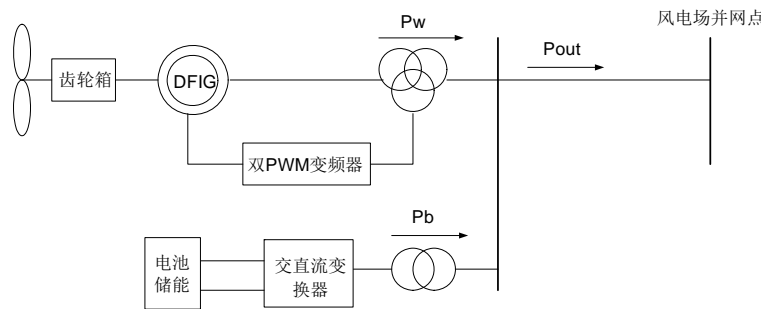


Figure 2. Storage device in a wind farm  
图 2. 风电场配置储能设备结构图

风电后，在高峰负荷时，即使风电场此时满发，只要压低其它一些机组出力，便可以保证电网频率合格；靠供电，并留有一定事故、负荷备用；负荷低谷时通过调峰压出力保证频率合格<sup>[9]</sup>。电网接入相当容量的但是在负荷低谷时，本地风电场有功输出较大时，对电网中其它常规能源电厂来说，相当于扩大了电网的峰谷差。因此，谷荷状态下，风电场有功功率输出较大时对电网影响更大。

以上海市地区为例，上海市地区 2010 年全年最大负荷为 26212.5 MW，全市最小负荷 8251.1 MW，上海市地区当地发电厂全年最大发电功率为 17764.1 MW，最小发电功率为 5813.5 MW。上海市电网 2010 年底装机容量构成与分布如图 3 所示<sup>[10]</sup>。

从图 3 和上述数据可以看出，上海市电网配置有相当容量的发电设备，负荷消耗的电能主要来源于火力发电机组。而且新增的火电发电机组越来越呈现大容量化的趋势。为了解决电网日益发展，峰谷差增大的问题，原本承担基荷的一些大容量火电机组或核电机组，开始降低负荷运行或停机以满足调峰填谷的要求。为了提高大容量机组的运行效益，在负荷低谷时期，要保证火电机组的最小技术出力，就必须限制风

电场的上网电量。

因此，对于大型火电或核电承担主要发电负荷的地区来说，风电场配置的储能设备应具备以下特点：

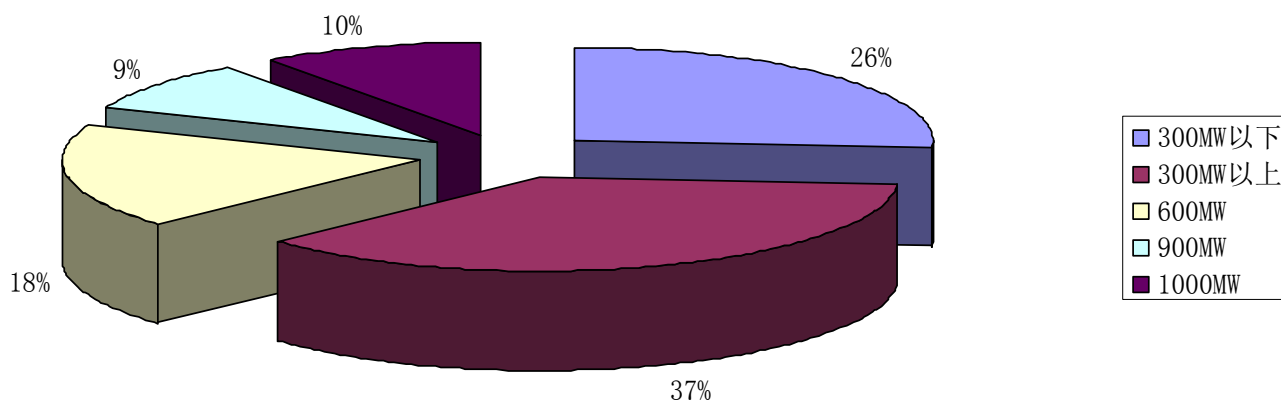
- 1) 储能设备的容量应能满足风电场在谷荷时段发电量充分存储的要求；
- 2) 为了能够对谷荷时期风电场发电功率的充分存储，储能设备的电能存储时间至少在数小时以上；
- 3) 若需要平滑风电场有功出力，储能设备还需要具备相应快速放电的能力。

随着技术的发展，储能电池可以较好地满足上述三点要求。

### 3. 风电场储能电池的配置

交流电能不能直接存储，但是可以通过电磁变化、电化学变化、动能或势能转化后进行存储。每一个储能系统都包含一个电能转化的设备<sup>[11]</sup>。因此，储能系统的容量通常包含两个方面的：一个是储能设备的容量，即储能装置能够存储的电能量的多少，另一个是储能系统的功率，即电能量能够被存储或释放的速度，这个主要取决于能量转换装置的最大转换速率，同时也受电池自身反应速率的影响。这两个参数

上海电网2010年底统调装机容量构成



截止 2010 年底，上海电网统调装机容量为 20348.3MW，火电机组为 20208.9MW，风电装机容量为 139.4MW。

Figure 3. Power capacity of Shanghai power system in 2010  
图 3. 上海电网 2010 年底统调装机容量构成图

之间可以通过储能设备的充电时间或放电时间构成联系, 即

$$E_s = P_s T \quad (2)$$

其中,  $E_s$  为储能系统的容量,  $P_s$  为储能系统的额定功率,  $T$  为充电时间。

因此, 风电场配置电池储能需要确定两个量: 容量  $E_s$  和额定功率  $P_s$ 。

### 3.1. 容量 $E_s$ 的计算

储能电池的容量  $E_s$  表示电池最大的充放电能力, 但是为了提高储能电池的使用寿命, 通常不采用满充满放的方式, 选择合适的放电深度(DOD)能够提高储能电池的使用寿命。容量(Ah throughput)和充放电次数(Cycles to failure)是两个常用的表征电池使用寿命的参数。图 4 是储能电池充放电次数、安时吞吐量与放电深度之间的曲线关系<sup>[12]</sup>。从图 4 中可以看出, 选择 50% 的 DOD 可以获得较优的储能电池使用寿命。

根据上文所述, 为了改善在电力系统谷荷时期大容量火电机组的效率, 应尽量减少谷荷时期风电场上网的电量。因此, 储能电池的容量  $E_s$  可以根据风电场平均谷时发电量确定。但是, 风能的间歇性和波动性, 使得风电场每日和每时的有功功率都存在差异, 为了提高储能电池的利用效率, 应该从数据统计的角度, 结合风电场多年的运行数据进行计算:

$$E_s = \frac{24P_{WF}T_{EF}}{8760(K_W + 1) \times DOD} \quad (3)$$

式中,  $E_s$  为储能设备容量, 单位 WMh。  $P_{WF}$  为风电场装机容量, 单位 MW。  $T_{EF}$  为风电场年利用小时数, 单位 h。  $K_W$  为统计的风电场峰谷上网电量比; DOD 为储能电池的放电深度, 这里取 50%。

### 3.2. 额定功率 $P_s$

常用的电池储能系统(BES)如图 5 所示<sup>[13]</sup>。通过变换器控制系统对交直流变换器的控制可以实现对储能电池组以不同大小的功率进行充放电, 甚至可以如风电机组进行最大风能捕捉一般, 追踪风电场输出功率的变化进行连续性控制。但是, 由于变换器电力电子器件的限制, 整个电池储能系统具有功率上限, 即只能工作于  $P_{s,max}$  以下。从目前的电力电子变换器系统来看, 交直流变换器在稳定运行状态下, 通常取

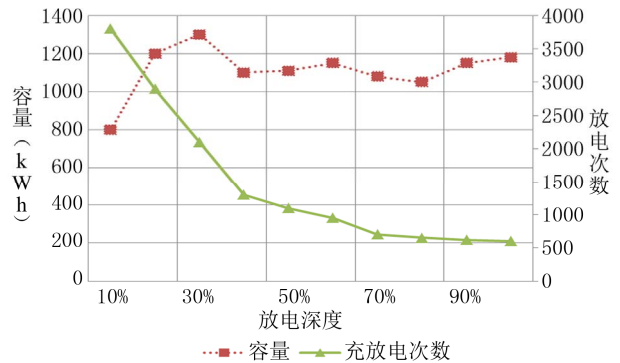


Figure 4. Relations between cycle times, capacity and DOD  
图 4. 储能电池充放电次数、容量与放电深度之间的曲线

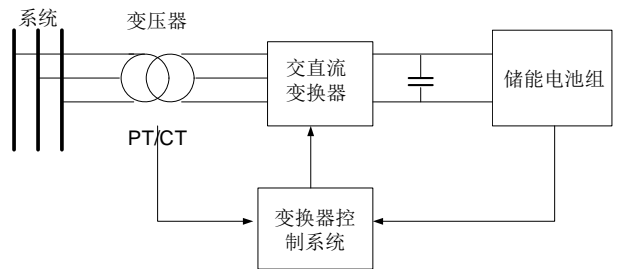


Figure 5. Typical structure of BES  
图 5. 常用的电池储能系统(BES)

10% 的裕量, 即

$$P_{s,max} = 1.1P_s \quad (4)$$

其中,  $P_{s,max}$  为储能系统的功率上限,  $P_s$  为储能系统的额定功率。

因此, 额定功率  $P_s$  的选择不仅直接影响电池储能设备的充放电时间, 同时, 还将影响电池储能设备的利用率。为了保证谷荷时期大火电机组的最小技术出力, 同时确保储能设备充分利用,  $P_s$  至少保证对风电场谷荷时期输出功率的存储, 当然也受到风电场装机容量的限制, 即可以得到储能设备额定功率的一个范围:

$$\frac{E_s \cdot DOD}{T_v} \leq P_{s,max} \leq P_{WF} \quad (5)$$

式中,  $T_v$  为谷荷时间段, 根据上海市电价标准, 谷荷时段为 22 时~次日 6 时, 即 8 个小时;  $E_s$  根据公式(3) 计算得到。

储能电池的额定功率越大, 相应的其价格也越高, 为了充分利用储能设备并保证其经济性, 本文中储能设备的额定功率按式(5)的约束取风电场谷时概率最大发电功率。

#### 4. 应用效果评估

为了对上述方法的应用效果进行分析,这里结合企业管理体系设备利用指标对风电场中配置的储能设备的设备利用率进行评估<sup>[14,15]</sup>。主要有:

1) 设备时间利用率:每年度设备实际使用的时间占计划用时的百分比,是指设备的使用效率。由于文中采用风电场储能电池每日一充一放的使用规则,因此,这里采用设备时间利用率评估储能设备能够被充分利用的时间百分比,即:

$$\text{设备时间利用率} = \frac{\text{设备充分利用的天数}}{\text{一年365天}} \times 100\%$$

其中,设备充分利用的天数取一年之中,风电场谷时发电量大于或等于 50%充电深度的储能设备容量使得储能设备能够充分利用的天数。

2) 设备能力利用率:在规定时间(年)内的平均负荷与额定负荷之比的百分数,即设备负荷率。即:

$$\text{设备能力利用率} = \frac{\text{谷时发电量}}{\text{储能容量}} \times 100\%$$

这里的谷时发电量需要满足风电场发电功率小于等于储能电池最大运行功率的约束条件,当风电场谷时发电量大于给定 DOD 下储能容量时,储能装置利用率为 100%,风电场谷时不发电时,储能装置利用率为 0%。

3) 谷时风资源利用率:是指在规定时间(年)内,风电场谷荷时期通过储能设备存储的电能占相同时段内发电量的百分数。即:

$$\text{谷时风资源利用率} = \frac{\text{储能设备能够存储的发电量}}{\text{谷时发电量}} \times 100\%$$

这里的储能设备能够存储的发电量取在风电场发电功率小于等于储能电池最大运行功率的约束条件下,当风电场谷时发电量大于给定 DOD 下储能容量时,取给定 DOD 下的储能设备容量;当风电场谷时发电量小于给定 DOD 下储能容量时,取风电场谷荷时期发电量。

#### 5. 算例分析

为验证所提出算法的有效性,以上海某 16.5 MW 风电场为应用对象,结合该风电场 2008~2009 年的发电量数据,按照上述方法进行储能电池容量配置,并

评估储能电池的利用率。

图 6 为该风电场 2008~2009 年峰谷上网电量比数据。从中可以看出该风电场峰谷上网电量比基本在 2:1~3:1 之间,一天 24 小时中风资源分布较为均匀,电网处于峰荷时期风资源稍好。

图 7 为该风电场 2008~2009 年谷时输出有功功率百分比分布图。从图 7 可以看出,该风电场谷时有功出力为 0~5 MW 之间的情况占全年的 60%以上。

结合上文算法,为风电场配置 5 MW/30 MWh 储能设备。表 1 为风电场各种储能配置应用效果对比数据和谷时有功出力统计图。

表 1 可以看出,风电场配置的储能设备容量越大,风资源的利用率越高,但是设备利用率越低,反之配置的储能设备越小,风资源的利用率越低,但是设备的利用率就越高。应该根据实际需求综合评定。

本文提出的算法对风电场储能设备  $E_s$  和  $P_s$  进行配置的结果可以综合风资源利用率和设备利用率两个方面,得到一个相对较优的利用效果。

#### 6. 结论

1) 本文针对目前电网火电装机比例较大的特点,

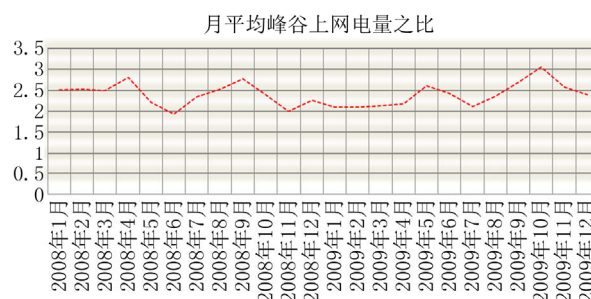


Figure 6. Ratio curve of peak and valley power of the wind farm in 2008-2009

图 6. 风电场 2008~2009 年峰谷上网电量比曲线

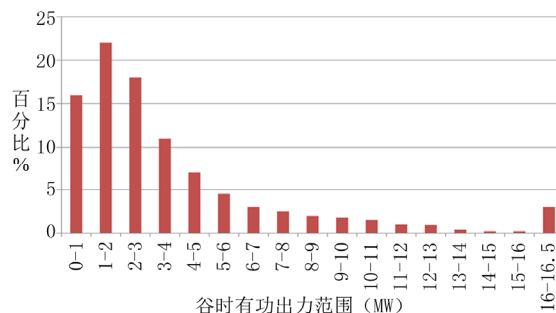


Figure 7. Distribution of active power in valley time of the wind farm in 2008-2009

图 7. 2008~2009 年风电场谷时有功出力百分比分布图

**Table 1. Utilization result of different storage capacity**  
**表 1. 风电场配置储能设备应用效果对比**

年份	配置的 储能容量	设备 时间利用率	设备 能力利用率	谷时风 资源利用率
2008	40 MWh	34.5%	63%	63.61%
	36 MWh	37.5%	65%	59.73%
	30 MWh	45.2%	69%	52.94%
	20 MWh	57.5%	76%	39.03%
2009	40 MWh	34.8%	64.73%	54.45%
	36 MWh	37.8%	65.26%	51.25%
	30 MWh	46.3%	69.85%	45.64%
	20 MWh	59.2%	77.87%	33.91%

分析得到风电场配置储能设备容量主要受谷荷时段大型火电机组最小技术出力约束。

2) 本文提出的谷荷时段对风电场发电量进行存储, 其它时段可以根据需要进行功率调节的思路, 符合目前许多风电场对储能装置每日一充一放的需求。

3) 本文采用有功功率统计的方法对风电场进行储能设备容量和功率的选择配置, 适用于已投运的风电场, 对于规划或建设中的风电场可以扩展为风功率统计的方法。一个具体风电场实际上网电量和有功功率数据说明, 该方法能够获得较优的风资源和储能设备综合利用效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 孙宏斌. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 1: 1-6.
- [2] 李强, 袁越, 李振杰, 王伟胜, 鲁华永. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009, 6: 13-18.
- [3] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
- [4] 韩涛, 卢继平, 乔梁等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.
- [5] 樊冬梅, 雷金勇, 甘德强. 超导储能装置在提高电力系统暂态稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2008, 30(18): 82-86.
- [6] 吴晋波, 孙海顺, 文劲宇等. 利用储能技术实现交流互联电网分区解耦控制的可行性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 30(16): 8-13.
- [7] 郑丽, 马维新, 李立春. 超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3): 73-76.
- [8] S. S. G. Jayasinghe. Direct integration of battery energy storage systems in distributed power generation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 677-685.
- [9] 国家电力调度通信中心. 电网调度运行实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [10] 上海市电力公司市场交易信息网站[URL]. sd.sh.sgcc.com.cn
- [11] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- [12] H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J. F. Manwell, U. Abdulwahid and I. Baring-Gould. Lifetime modelling of lead acid batteries, 2005.
- [13] 李建林, 胡书举, 付勋波等. 适合直接驱动型风力发电系统的 DRC 混合箝位变流器研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 89-93.
- [14] 保罗·萨缪尔森. 经济学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [15] 金占明. 企业管理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.