

A Double-Voltage Distribution Mode for Distribution Network

Zhongqin Kuang, Xiaofu Xiong, Jinxin Ouyang

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: cqquxf@vip.sina.com, setmethink@126.com, jinxinoy@163.com

Received: Apr. 11th, 2017; accepted: Apr. 27th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Aiming at the problem of energy conservation and transmission efficiency of close and distant loads under existing direct distribution mode, this article proposed a double-voltage distribution mode for distribution network. In order to reduce the loss and improve the voltage quality, three-winding transformer is used to output two different voltage levels to meet the requirements of both close and distant loads. Feasibility demonstration and impact analysis in every aspect were also made in this article.

Keywords

Double-Voltage Distribution Mode, Three Winding Transformer, Close Load, Distant Load

一种配电网的双电压配电方法

匡仲琴, 熊小伏, 欧阳金鑫

输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆

Email: cqquxf@vip.sina.com, setmethink@126.com, jinxinoy@163.com

收稿日期: 2017年4月11日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

通过分析传统直配电方式的局限性, 针对现有配电方法难以兼顾远近距离负荷的节能高效配电需求问题, 本文提出一种配电网的双电压配电方法, 利用三绕组配电变压器输出两种不同电压的特性, 分别对远近距离负荷供电, 达到降低配电网损耗、提高电能质量的目的, 并从多个方面进行可行性论证和效益分析。

关键词

双电压配电方法, 三绕组变压器, 近区负荷, 远距离负荷

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

配电网是电力系统向用户传输电能的最终环节, 其安全性、可靠性和供电质量对用户有直接影响。我国中压配电网大多为 10 kV, 低压系统一般采用 0.4 kV 直配电方式[1], 前后两级电压之比达 25 倍。根据配电设计规范要求, 0.4 kV 线路的供电半径宜小于 400 m, 10 kV 线路的输送理想距离为 6~20 km [2]。当用电设备总容量低于 250 kW 或变压器容量低于 160 kVA 时, 不宜采用 10 kV 供电[3]。因此, 对容量和距离不满足 10 kV 供电要求的较远负荷采用低压直配电方式, 损耗往往很大, 电压质量也难以保证。

传统 0.4 kV 直配电方式的低压线缆直接从配变引出接至用户, 送电容量小、出线回路多、线行通道拥挤、供电半径有限。特别在农村远郊地区, 负荷小而分散, 供电距离远, 电压质量差。在现有的配电方式很难兼顾近距离组团负荷与远距离分散负荷的节能、高效配电需求, 亟待研究突破性的配电技术来解决当前配电方式面临的困境。

鉴于当前配电方式和改善手段不能同时解决远距离分散负荷因供电半径和电压等级造成的损耗和供电质量问题, 本文提出一种基于三绕组配电变压器的双电压配电方法: 配电变压器采用三绕组变压器, 增加一个高于 0.4 kV 的补充电压层级 U_m , 高压侧接 10 kV 进线, 中、低压侧分别输出补充电压 U_m 和直配电压 0.4 kV, 形成对近距离负荷和远距离分散负荷分电压供电的双电压配电模式, 降低供电线路损耗, 保障远距离用户的供电质量, 达到兼顾远近负荷高效配电目的。

2. 配电网的双电压配电方法

2.1. “星云状”和“卫星式”负荷特点

“星云状”和“卫星式”负荷这两种负荷分布形式, 常见于农村和小城镇的低压配电台区, 也易见于煤矿、石化工业供配电系统, 如图 1 所示: 配电变压器布置在近区负荷密集处, 负荷零星分散在配变周围较远处(圆圈大小代表负荷大小)的为“星云状”分布负荷; 少数小容量负荷远离配变、孤立于组团负荷中心的为“卫星式”分布负荷。这些负荷的供电半径和容量不满足 10 kV 供电条件, 但距离配变又比较远, 采用 0.4 kV 直配电方式线路长、损耗高, 三相不平衡度很高, 且供电末端的电压质量不能保证[4]。随着电能替代和分布式电源的发展, 这些分散负荷的容量需求逐步扩大, 低压输电线路的功率波动性和损耗也在增大, 电压质量面临越来越严重的问题。

2.2. 现有配电方式和降耗手段的局限性

我国低压配电系统一般采用 0.4 kV 直配电方式, 10 kV (20 kV)中压配线经配电变压器将电压转换为 0.4 kV, 对低压台区内的负荷直接配电。这种直配电方式主要存在以下问题:

- ① 配电电压较低, 输送容量和供电半径有限;
- ② 低压配电线缆电流过大, 线路损耗较高;

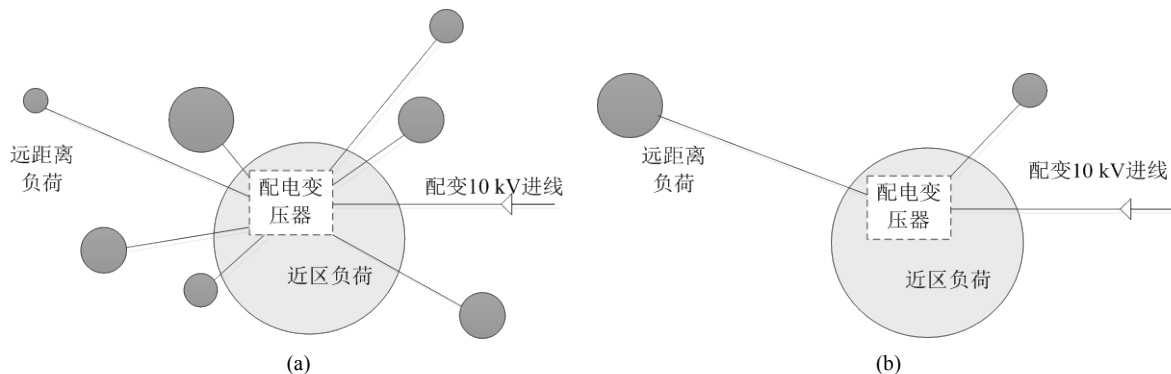


Figure 1. Nebulae shaped loads and satellite shaped loads; (a) Nebulae shaped loads; (b) satellite shaped loads
图 1. “星云状”负荷与“卫星式”负荷分布示意图; (a) “星云状”负荷; (b) “卫星式”负荷

- ③ 出线回路多，线行通道拥挤，占地面积大；
- ④ 三相不平衡度高，损耗加剧；
- ⑤ 距离配电变压器较远的负荷，电能质量较差。

显然，传统 0.4 kV 直配电方式难以满足“星云状”和“卫星式”分布负荷的高效节能供电需求。目前，配电网节能降耗和改善电压的措施主要有网络重构、变电设备的经济运行、装设调压设备、无功补偿和提高配电电压几种方式[5]。配电网重构主要通过调整网络接线模式改变拓扑结构和潮流分布，达到降低损耗的目的，但并不适宜无联络冗余的放射型配电网[6] [7] [8]。根据变压器的经济运行区间和负载情况调整变压器的运行方式、采用新型节能变电设备也可有效降低配电网损耗[9]；装设有载调压变压器和馈线调压器还能在一定范围内调节线路末端的电压质量[10] [11]，但变压器的购置和运行成本太高，一般不用于 10 kV 及以下线路中；馈线调压器成本虽然相对较低，但一般安装于长距离线路的末端，只能改善电压，不能降低线路上的损耗，且两者的调节范围都有限(有载调压变压器不大于 5%，馈线调压器不大于 20%) [12]。

无功补偿是配电网节能降耗和调节电压质量应用最广泛的手段[13]，有集中补偿和分散补充两种方式[14]。无功补偿最大的优点在于能提高设备传输效率[15]，但不能解决因供电半径、负荷条件和网络自身参数导致的有功损耗。由于无功具有“分级补偿、就地平衡”的特性，因此不能减少补偿点之前线路和设备的损耗[16]。提高配电电压能扩大传输容量和供电半径，传输相同功率的条件下电流是电压升高倍数的平方分之一[17]，能显著降低线路上的损耗，目前我国中压配电网已有部分地区采用 20 kV 电压供电，取得了较好的效果[18]。低压配电系统，除煤井、采矿、石油和化工领域有 660 V (690 V)和 1140 V 的电压等级应用[19]，公用配电系统仍只有 0.4 kV 一个电压等级。因此对于不满足 10 kV 供电容量和距离要求“星云状”和“卫星式”分布负荷，低压线路上的损耗往往很大，末端电能质量也常常不能满足。

2.3. 基于三绕组配电变压器的双电压配电方法

根据 GB 50052-2009《供配电系统设计规范》[20]，要改善配电网电压偏差和负荷波动带来的电压闪变，宜从以下几个方面设计供配电系统：

- ① 降低系统阻抗，减小线路上的电压降；
- ② 装设无功补偿和调压装置；
- ③ 尽量平衡三相负荷；
- ④ 对波动较大的负荷采用专用线路和专用变压器供电。

针对“星云状”负荷和“卫星式”负荷在配电过程中存在的问题，特提出一种基于三绕组配电变压

器的双电压配电方法：对已确定配电变压器和负荷分布位置的配电台区，增加一个大于 0.4 kV、小于 10 kV 的补充电压等级 U_m ；配电变压器选用 $10/U_m/0.4$ kV、 $\Delta/\Delta/Y$ 联结的三绕组变压器，高压侧接 10 kV 电源进线，低压侧输出额定电压 0.4 kV，经低压母线直接接至近区负荷供电；中压侧输出补充电压等级 U_m ，经电缆或架空线接至远距离负荷区，再由 $U_m/0.4$ kV 降压变压器降压供用户使用。由此形成一种配电网的双电压配电模式(U_m 和 0.4 kV)，如图 2 所示。其中 $U_m/0.4$ kV 降压变压器可采用铁芯式、非晶合金或电力电子等类型的变压器。0.4 kV 低压出线侧可装设无功补偿装置，以提高设备传输效率、改善电能质量。由于相邻电压等级不宜小于两倍，为方便设备选型，补充电压 U_m 宜尽量选择规范中已有的标称电压或整数、倍数电压。

采用双电压配电方法对“星云状”和“卫星式”分布负荷进行供电，可大幅降低远距离负荷的传输电流，扩大输电容量，提高供电质量，同时实现远、近区负荷分开供电、专线专变，有效避免远距离负荷波动对整个配电台区的影响。尽管增加补充电压可以降低远距离负荷的输电损耗，提高电能质量，但使用三绕组配变和增加的降压变压器也会使系统接线更复杂，增加投资。本文将分析基于三绕组配变的双电压配电方法效益及可行性。

3. 双电压配电方法的可行性及效益分析

3.1. 提升电压质量

电压降百分数计算公式为：

$$U\% = \frac{PR + QX}{100 \cdot U_N^2} \quad (1)$$

式中： P 为配线所供的有功负荷，单位 kW， Q 为配线所供的无功负荷，单位 kvar； R 和 X 为计算配电线路的电阻和电感，单位 Ω ； U_N 为计算线路的额定电压，单位 kV。

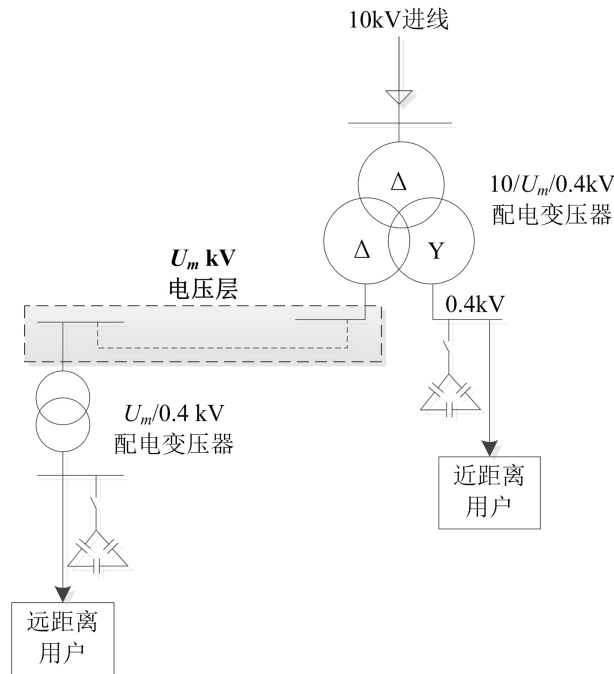


Figure 2. Double-Voltage Distribution Mode

图 2. 双电压配电模式

线路电压降与电压平方呈反比,因此,当配电电压分别为 0.4 kV、0.66 kV、1 kV、3 kV、5 kV 和 10 kV 时,以 0.4 kV 电压配电时的电压降为标准(设为 1),在负荷不变和负荷增加一倍情况下,电压降水平如表 1 所示。

当电压从 0.4 kV 提升至 0.66 kV 后,在负荷不变的情况下,电压降可降低 63%,负荷增加一倍后,电压降也可降低 27%。显然,提升配电电压能显著降低配电线路上的电压降,电压越高,这种效果越明显,但当电压升高至 5 kV 以后,效果就不够明显了。

3.2. 扩大供电半径

配线电压降可以表示为:

$$\frac{PR+QX}{U_N} = L \cdot (\sqrt{3}r_0 I_j \cos \varphi + \sqrt{3}x_0 I_j \sin \varphi) \quad (2)$$

式中: L 为配线长度,单位 km; r_0 、 x_0 是配电线缆单位长度的电阻和感抗,单位 Ω/km ; $\cos \varphi$ 为功率因素; I_j 为负荷的计算电流,单位 A。

由式(1)和式(2),可得到

$$L = \frac{U\% \cdot U_N}{\sqrt{3}r_0 I_j \cos \varphi + \sqrt{3}x_0 I_j \sin \varphi} \quad (3)$$

根据低压配电设计规范[21],0.4 kV 配电方式的供电半径极限为 500 m,在电压降要求一致,负荷不变的情况下,配电线路的供电半径与供电电压呈正比,如表 2 所示。

可见,在其他条件不变的情况下,0.66 kV 供电半径是 0.4 kV 供电半径的 1.65 倍,3 kV 供电半径是 0.4 kV 的 7.5 倍,配电电压提高有利于扩大供电半径。

3.3. 提高输电能力

电网输电能力

$$S = \sqrt{3}U_N I_j A \quad (4)$$

式中: S 为送电功率,单位 kW; A 为配电线缆的截面积,单位 mm^2 。

故在相同导线规格条件下,电网输电能力与电压成正比,令 0.4 kV 电压下的送电容量为 1,电压与输电能力关系如表 3 所示。

3.4. 降低配电损耗

0.4 kV 低压直配电方式的损耗主要来自 10/0.4 kV 电力变压器和 0.4 kV 线缆两部分,采用基于三绕组

Table 1. Voltage drop

表 1. 电压降水平

配电电压	0.4 kV	0.66 kV	1 kV	3 kV	5 kV	10 kV
同一负荷	1	0.37	0.16	0.018	0.0064	0.0016
负荷增加一倍	2	0.73	0.32	0.035	0.0128	0.0032

Table 2. Relationships between supply radius and voltage

表 2. 供电半径与供电电压关系

供电电压	0.4 kV	0.66 kV	1 kV	3 kV	5 kV	10 kV
供电半径	500 m	825 m	1.25 km	3.75 km	12.5 km	25 km

配变的双电压配电方法后，由于传输相同的功率，线损和电压平方成反比，因此采用补充供电的远距离负荷线路损耗必然会降低，然而增设降压变压器又将带来额外的损耗，且三绕组配电变压器与传统两绕组配电变压器的损耗也不相同，因此要综合比较提高电压后线路减少损耗和增设降压变和更好三绕组配变增加的损耗，确定配电电压和配电方式。

假设一台配变所覆盖的台区中，有 m 个负荷片区，其中 l 个为近距离负荷片区，采用 0.4 kV 直配电方式，需敷设 l 根线缆；另外 $m-l$ 个为远距离负荷片区，采用 U_m kV 的配电方式。采用补充电压 U_m kV 配电方式时， $U_m/0.4$ kV 降压变压器就装于该负荷片区内，接至用户的 0.4 kV 出线很短可忽略，因此为远距离负荷片区供电需敷设 $m-l$ 根线缆和 $m-l$ 个降压变压器。三绕组配电变压器的有功损耗 ΔP_1 为：

$$\Delta P_1 = P_{o0} + \left(\frac{S_1^2}{S_{1N}^2} P_{k10} + \frac{S_2^2}{S_1^2 S_{2N}^2} P_{k20} + \frac{S_3^2}{S_1^2 S_{3N}^2} P_{k30} \right) \quad (5)$$

式中： P_{o0} 为三绕组配变的空载损耗； S_1 、 S_2 、 S_3 表示三绕组配变高、中、低压侧的负载容量； S_{1N} 、 S_{2N} 、 S_{3N} 表示三绕组配变高、中、低压侧额定容量； P_{k10} 、 P_{k20} 、 P_{k30} 分别为三绕组配变高、中、低压侧的短路损耗。

降压变压器的有功损耗 ΔP_2 ：

$$\Delta P_2 = \sum_{x=1}^{m-l} (P_{ox} + \beta_x^2 P_{kx}) \quad (6)$$

式中： P_{ox} 为安装在第 x 个远距离负荷处的 $U_m/0.4$ kV 降压变压器的空载损耗； β_x 为为降压变压器 x 的负载系数； P_{kx} 为降压变压器 x 的短路损耗。

考虑负荷大小、分布情况、供电半径、线缆型号和三相不平衡等因素的影响，所选配电电压的台区内配电线缆的损耗 ΔP_3 确定方法如下：

$$\Delta P_3 = \sum_{x=1}^m 3(1 + \alpha_x) K_x^2 I_{av,x}^2 \rho_x L_x \quad (7)$$

式中： α_x 、 K_x 、 $I_{av,x}$ 分别为线缆 x 的线损增加率(因负荷三相不平衡引起)、负荷形状系数、平均电流大小； ρ_x 为第 x 条线缆的电阻率。

根据 GB 1094.1-2013 关于电力变压器的制造要求[22]，100 kVA 以下 S11 系列的降压配电变压器半载和全载情况下的损耗如表 4 所示。

假设功率因素为 1，变压器半载，在各种不同截面电缆(铝芯)条件下对 500 m 外负荷进行供电采用 1 kV 供电的损耗相比 0.4 kV 直配电方式的损耗之差，如表 5 所示。

Table 3. Relationships between transmission capacity and voltage

表 3. 输电能力与电压关系

供电电压	0.4 kV	0.66 kV	1 kV	3 kV	5 kV	10 kV
供电半径	1	1.65	2.5	7.5	12.5	25

Table 4. Loss of S11 power transformers under 100 kVA

表 4. 100 kVA 及以下 S11 系列电力变压器的损耗表

容量	30 kVA	50 kVA	63 kVA	80 kVA	100 kVA
低压侧额定电流 A	43.30	72.17	90.94	115.47	144.34
半载损耗 kW	0.25	0.347	0.41	0.492	0.575
满载损耗 kW	0.7	1	1.19	1.43	1.7

Table 5. Loss deduction of different sectional areas' cables under 0.4 kV and 1 kV power supply
表 5. 变压器半载情况下 0.4 kV 和 1 kV 供电各种不同截面电缆线损降低情况

电缆截面积 mm ²	半载电流 A				
	21.65	36.09	45.47	57.74	72.17
240	176.1724	142.3552	84.3656	-32.5924	-245.344
185	153.1396	78.3556	-17.2324	-196.4176	-501.2836
150	128.3344	9.4252	-126.6424	-372.8512	-776.9212
120	100.5808	-67.7036	-249.0808	-570.2848	-1085.3692
95	61.0084	-177.6596	-423.6244	-851.7352	-1525.0672
70	-11.6348	-379.52	-744.0508	-1368.4192	-2332.282
50	-128.5712	-704.4656	-1259.8528	-2200.162	-3631.7032

表 5 中, 数值为正的表示采用 1 kV 供电后线损加上降压变压器损耗比 0.4 kV 直配电大, 负的相反, 可见在由配电变压器引起的损耗变化不大的情况下, 相同输电条件和负荷条件, 提升配电网电压对降损有一定作用。特别对于配电线径较细而负荷很大的线路, 提升配电网电压降损效果十分显著。

4. 结论

针对传统 0.4 kV 低压直配电方式在“星云状”负荷和“卫星式”负荷配电过程中的线路损耗和电压质量问题, 本文提出一种双电压配电方法, 运用三绕组配电变压器输出两种不同电压的特性, 对不满足 10 kV 供电要求的较远距离负荷进行供电, 并分析其效益及可行性, 对兼顾近距离组团负荷与远距离分散负荷的节能高效配电需求问题有较好的实用性。

基金项目

国家自然科学基金项目(51407017)。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T156-2007. 标准电压[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [2] 王玉华, 赵志英, 李颖峰, 等. 供配电技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [3] 中华人民共和国建设部. JGJ16-2008. 民用建筑电气设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] 黎沃毅. 农村低压电网质量问题浅谈[J]. 科技风, 2008(6): 49, 52.
- [5] 王承民, 刘莉. 配电网节能与经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 1.
- [6] Yan, Y., Zhang, Z., Bao, W., Xin, J., Qin, L. and Du, Y. (2016) Optimal Distribution Network Reconfiguration for Load Balancing. *China International Conference on Electricity Distribution*, Xi'an, 10-12 August 2016.
- [7] 张学超. 配电网重构算法研究综述[J]. 中国电力教育, 2007(S3): 120-122.
- [8] 王方亮. 变压器经济运行方式分析与应用[J]. 变压器, 2005, 42(12): 35-38.
- [9] 蔡斌. 非晶合金铁心电力变压器节能效果的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [10] 李珊, 苏永丽, 康积涛. 有载调压变压器对电压稳定的影响综述[J]. 变压器, 2012, 49(2): 19-23.
- [11] 马成祥. SVR 馈线自动调压器的特点及应用[J]. 农村电气化, 2009(3): 46-47.
- [12] 刘成峰. 阳春配电网电压控制策略与低压电压补偿装置应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [13] Venkata, S.S. and Rudnik, H. (2007) Distribution Systems Their Past Present and Future. *IEEE Power & Energy Magazine*, 7-8, 50-67.

- [14] 李颖峰. 低压配电网无功补偿方式及优化研究[J]. 电气应用, 2008, 27(19): 53-55.
- [15] Singh, B., Chandra, A., *et al.* (1999) Reactive Power Compensation and Load Balancing in Electric Power Distribution System. *Electrical Power & Energy System*, **102**, 375-378.
- [16] 熊卿, 张哲, 尹项根, 文明浩, 王存平. 新型配电变一体化静止无功补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 59-64.
- [17] 魏庆海, 吕鸣镝, 周莉梅, 范明天. 配电网采用 20kV 供电的前景分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 61-66.
- [18] 胡贤德, 吴环红, 张弘, 周浩, 戈镇全, 孙可, 张全明, 潘弘, 方淦林, 封东良. 10kV 配电变压器和箱式变电站升压改造至 20kV 电压等级的研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 118-126.
- [19] 李科峰. 煤矿井下供电电压升级改造效益研究[J]. 山东煤炭科技, 2014(11): 98-99.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50052-2009. 供配电系统设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50054-2011. 低压配电设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB1094.1-2013. 电力变压器第一部分: 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org