



# 光伏逆变器的实验研究

许胜辉

(武汉职业技术学院 电信学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**介绍了一种由DC-DC变换器和全桥DC-AC变换器组成的光伏逆变系统。这种DC-DC变换器结合升压和反激式拓扑,产生一个半正弦输出电流,并且实现了升高压的目的。然后采用一个由低频开关技术控制的全桥DC-AC变换器将电流转换成正弦形式,并向单位功率因数电网提供电力。首先阐述了所创建的光伏逆变器的电路工作原理,最后设计了一个80W原型系统,并通过仿真实验验证了所提出的光伏逆变系统的可行性和有效性。

**关键词:**并网光伏逆变器;升压变换器;反激式变换器;仿真实验

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2014) 01-0053-05

## 一、引言

随着对全球变暖、环境污染以及石油、煤等化石燃料成本上升等问题的关注日益增加,世界各国更加致力于发展利用可再生能源进行分布式发电技术,以满足日益增长的能源需求。在这些可再生能源中,目前光伏(PV)技术最为经济<sup>[1-2]</sup>,占领了越来越多的市场。

除了中央光伏逆变系统设计得具有较高的额定功率外,小型分散的光伏补充能源系统也是另一个快速发展的领域<sup>[3-5]</sup>并且向由若干相对较小功率的光伏逆变器集成的架构发展。这些小功率光伏逆变器可以并入屋面材料或分散安装在建筑中的任何位置。在这种应用中,每个逆变器中的光伏组件的数量在1—5个左右,并且将会随着应用需求而越来越多。然而,小型分散的光伏能源系统应用成功的关键在于简单、低成本和高性能的逆变器。

本文叙述了所创建的光伏逆变器电路工作原理,设计和建立了80W的原型光伏逆变器系统。最

后通过仿真实验验证了所提出的电路的可行性和有效性。

## 二、光伏逆变器的工作原理

### (一)逆变器系统

图1所示为创建逆变器采用升压型反激变换器,以提高电压和产生半正弦电流波形。利用全桥逆变器与线路的开关频率,以减少开关损耗<sup>[6-7]</sup>,并将DC-DC变换器的输出电流展开成一个完整的正弦波。设计此升压反激式变换器时,通过反激式耦合电感提高输出电压增益和升压输出电容回收能量。

低通滤波器由钳位电容  $C_{clamp}$  和  $C$  及输出电感  $L_s$  串联而构成。通过升压转换器的输出电压  $V_{Cc}$  与反激变换器的输出电压  $V_c$  的级联,我们很容易就可以得到一个很高的输出电压  $V_d$ 。此外,相比于传统的升压变换器,这种变换器会在功率开关管、二极管以及输出电容上施加一个低压应力。低压侧电容  $C_{clamp}$  的功能相当于一个输出电容和缓冲电容器在关断瞬态期间压制  $Q1$  的尖峰电压,同时回收耦合电

收稿日期:2014-01-02

作者简介:许胜辉(1966--)男,湖北武汉人,武汉职业技术学院电信学院副教授,研究方向:自动控制技术。

感的漏感能量。在本设计中,功率开关管 Q1 电压等级较低,用来减少传导损耗,因此整体效率显着提高。

创建的光伏逆变系统的开关控制采用了半正弦脉冲宽度调制(PWM)的方法。开关设备 Q1 的占空比通过一个锯齿电压波  $V_{tri}$  与一个半周期正弦电压波比较而获得。调节流经 Q1 的电流峰值与电网电压成正比,并控制变换器工作在电流断流状态(DCM),就可以产生一个半周期正弦电流波作为反激式变换器的输出电流  $I_d$ , 它也与其初级电流成正比, 例如 Q1 的峰值电流  $I_{Q1}$ 。为了将半周期正弦电流波转换成另一种波形,全桥 DC-AC 变换器的开关信号应与电网电压  $V_s$  同步。在正半周期内,逆变器的开关管 TA+,TB- 导通,而在负半周期内 TA-,TB+ 导通。然后全桥 DC-AC 变换器的输出通过一个由 VCc、Cc 和 Ls 构成的低通滤波器连接到电网( $V_s$ ),以实现向电网提供单位功率因数电能。应当注意,由于钳位电容 Cclamp 的放电路径不包括二极管,故整体效率可进一步增加。

(二)工作原理

为分析图 1 所示的光伏逆变器的电路, 变压器

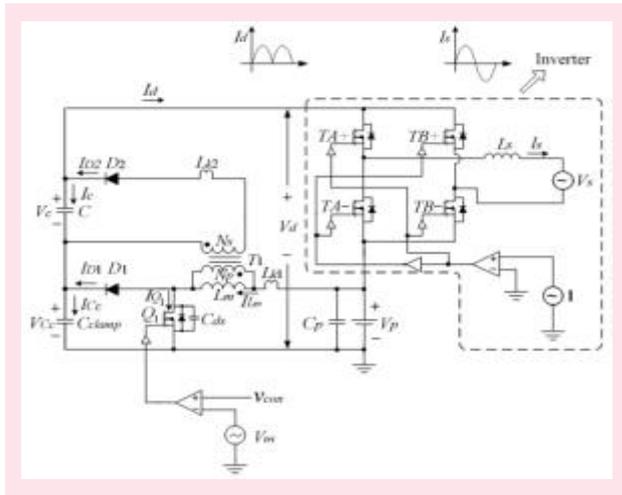


图 1 创建的变压器型反激式光伏逆变系统

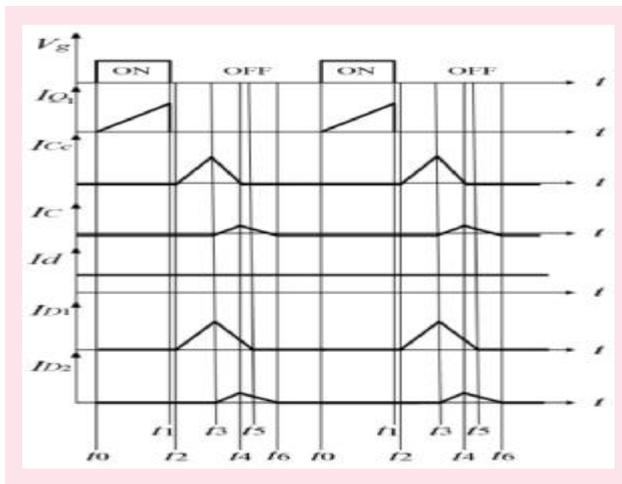


图 2 变换器工作在 DCM 状态下的典型电流波形

T1 建模为一个磁化电感  $L_m$  和两个漏电感  $L_{K1}$  和  $L_{K2}$ , 并且具有理想的匝数比  $N_p/N_s$ 。变换器工作在 DCM 状态下的典型输出电流波形如图 2 所示。有七种工作状态,这七种工作状态如下所述:

状态(1)( $t_0-t_1$ ):这种状态下的等效电路图如图 3 所示。当开关管 Q1 在  $t_0$  时刻导通, 输入电压  $V_p$  直接连接到电感上,磁化电感的电流  $I_{Lm}$  成线性增加。当开关管 Q1 在  $t_1$  时刻关断  $I_{Lm}$  达到峰值  $I_{Lm,pk}$ , 并且  $I_{Lm,pk}$  可以表述如下:

$$I_{Lm,pk} = \frac{V_p}{L_{K1} + L_m} DT_S \quad (1)$$

在此期间,二极管 D1 和 D2 反向偏置。输出电容 Cclamp 和 C 通过反激变换器的输出电流  $I_d$  向电网提供电能,而且逆变器的开关管 TA+、TB- 导通。在电网电压的正半周期内流入电网的电流为正。

状态(2)( $t_1-t_2$ ):这种状态下的等效电路图如图 4 所示。在  $t_1$  时刻,开关管 Q1 关断,励磁电感的电流  $I_{Lm}$  开始向杂散电容  $C_{ds}$  充电。在  $C_{ds}$  上电压达到  $V_{Cc}$  之前, 输出电容 Cclamp 和 C 继续向电网供电。

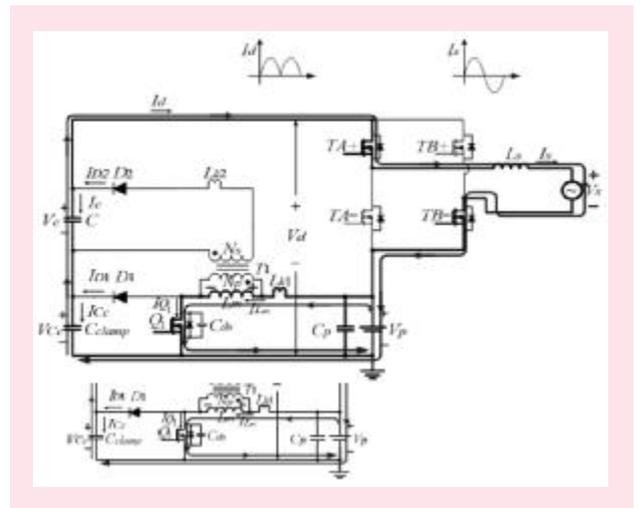


图 3  $t_0-t_1$  状态 I 的等效电路图

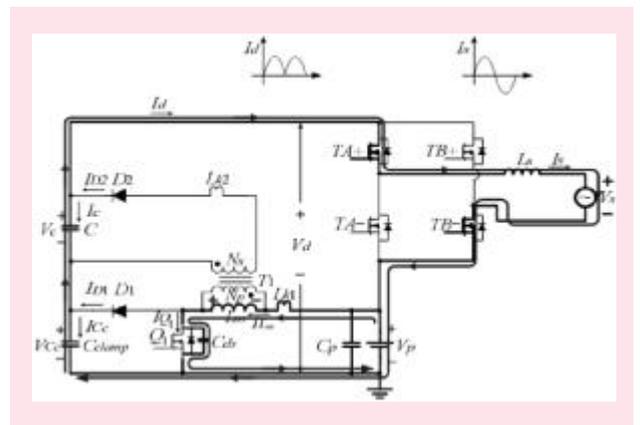


图 4  $t_1-t_2$  状态 II 的等效电路图

状态(3)( $t_2-t_3$ ):这种状态下的等效电路图如图5所示。在 $t_2$ 时刻,二极管D1、D2正向偏置而导通,励磁电感上电压 $V_{Lm}$ 由下式给出:

$$V_{Lm} = V_{Cc} - V_p \quad (2)$$

滤波电容的电压 $V_c$ 可表示如下:

$$V_c = \frac{N_s}{N_p} (V_{Cc} - V_p) \quad (3)$$

流经两个二极管的电流 $I_{D1}, I_{D2}$ 为:

$$I_{D1} = -\frac{V_{Cc} - V_p}{L_m} t_{on} - \frac{N_s}{N_p} I_{D2} + I_{D1}' \quad (4)$$

$$I_{D2} = -\frac{N_s (V_{Cc} - V_p)}{L_{k2}} t_{on} + I_{D2}' \quad (5)$$

在上述各式中,  $t_{on} = t_3 - t_2$ , 而且

$$I_{D1}' = \frac{L_{k2}}{L_{k1} + L_{k2}} I_{Lm} \quad (6)$$

$$I_{D2}' = \frac{L_{k1}}{L_{k1} + L_{k2}} \frac{N_p}{N_s} I_{Lm} \quad (7)$$

电流 $I_{D1}$ 向钳位电容 $C_{clamp}$ 充电,并储存漏感能量。当电流 $I_{Cc}$ 增加时, $I_{D2}$ 的电流不能完全支持的输出电流 $I_D$ 。反激式电容 $C$ 继续通过其放电电流向电网供电。

状态(4)( $t_3-t_4$ ):这种状态下的等效电路图如图6所示。在 $t_3$ 时刻,电流 $I_{D1}$ 开始从峰值下降,同时 $I_{Cc}$ 也开始下降。在此期间,电流 $I_{D1}$ 向钳位电容充电,并向电网供电。因为反激电容 $C$ 放电,电流 $I_{D2}$ 线性增加。

状态(5)( $t_4-t_5$ ):这种状态下的等效电路图如图7所示。在此期间,电流 $I_{D2}$ 给反馈电容 $C$ 充电,并提供输出电流 $I_D$ 。流进输出电容的电流 $I_{Cc}$ 为负,

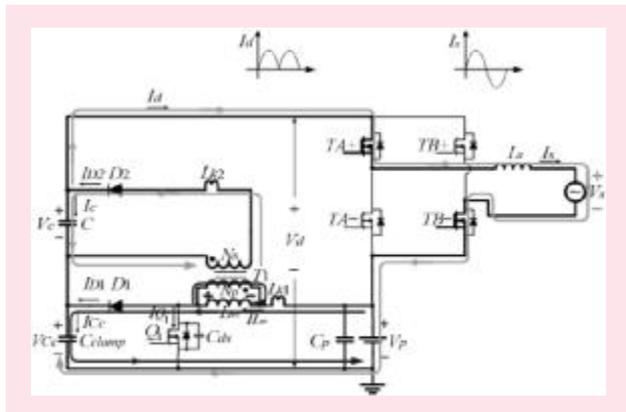


图5  $t_2-t_3$  状态 III 的等效电路图

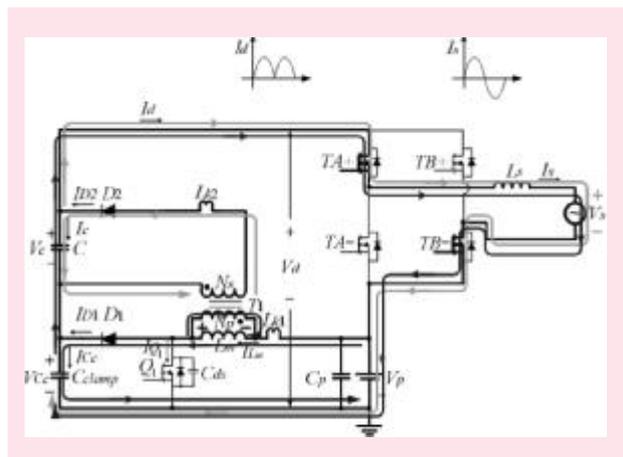


图6  $t_3-t_4$  状态 IV 的等效电路图

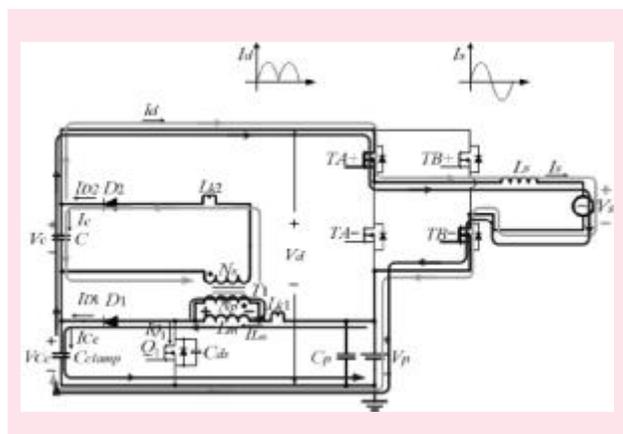


图7  $t_4-t_5$  状态 V 的等效电路图

并将能量传递给反馈电容 $C$ ,支持输出电流 $I_D$ 。

状态(6)( $t_5-t_6$ ):这种状态下的等效电路图如图8所示。 $t_5$ 时刻 $I_{D1}$ 降为零,由于次级绕组上的电压反向, $I_{D2}$ 线性降低。于是电流 $I_c$ 开始降低, $t_6$ 时刻 $I_{D2}$ 降为零。

状态(7)( $t_6-t_7$ ):这种状态下的等效电路图如图9所示。在此期间,两个二极管D1、D2均反向偏置。输出电流 $I_D$ 由 $I_{Cc}$ 和 $I_c$ 提供。

### 三、硬件设计

根据图5所示的状态3)时的等效电路,在 $t_2$ 时刻,两个二极管正向偏置而导通,施加在主开关上的电压 $V_{DSS}$ 等于输出电容上的电压。如图8所示,当二极管D1关断而D2导通时,施加在主开关上的电压 $V_{DSS}$ 由下式给出:

$$V_{DSS} = V_p + V_c \left( \frac{N_p}{N_s} \right) \quad (8)$$

由式(3)—(8),  $V_{DSS} = V_{Cc}$ 。当变换器工作在状态VII下时,二极管D1、D2均关断,施加在主开关

上的电压  $V_{DSS}$  等于  $V_p$ , 由式(3)可以计算出  $V_{Cc}$  的值:

$$V_{Cc} + V_c = V_{Cc} + \frac{N_s}{N_p} (V_{Cc} - V_p) = V_d \quad (9)$$

在式(9)中, 电压  $V_p$  等于电网电压的峰值。重新排列式(9), 输出电容上的电压可以由下式给出:

$$V_{Cc} = \frac{N_p \cdot V_d + N_s \cdot V_p}{N_p + N_s} \quad (10)$$

#### 四、仿真实验结果

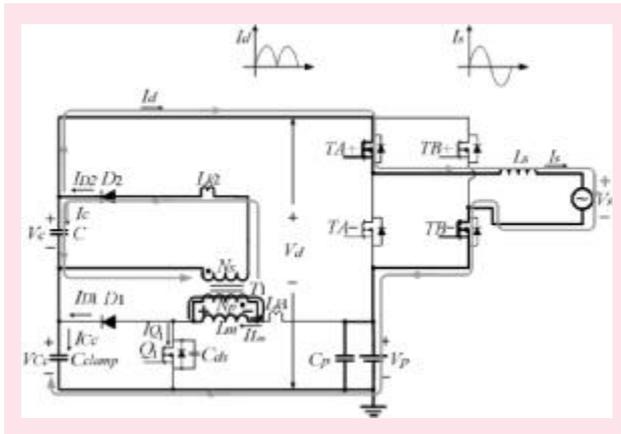


图 8 t5-t6 状态 VI 的等效电路图

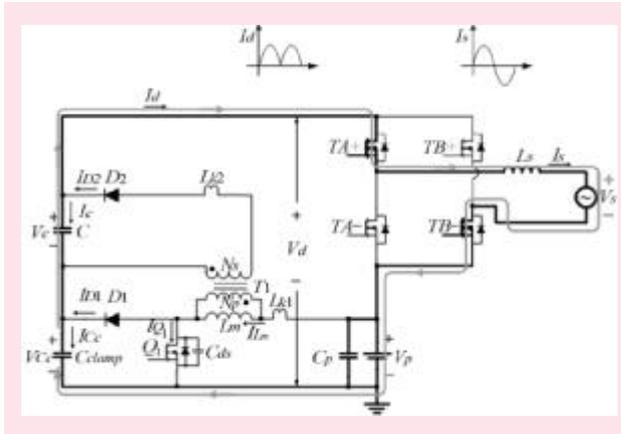


图 9 t6-t7 状态 VII 的等效电路图

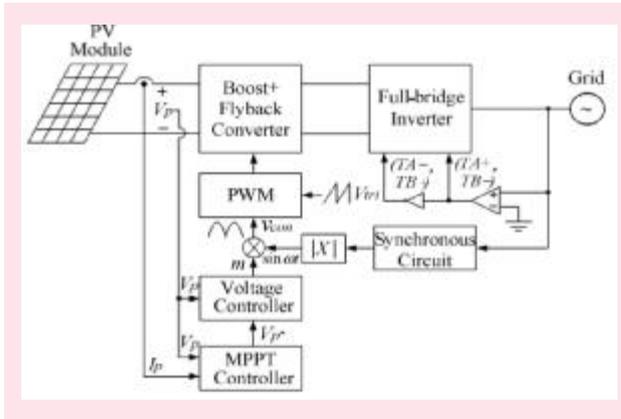


图 10 光伏逆变器的整体硬件配置和控制器

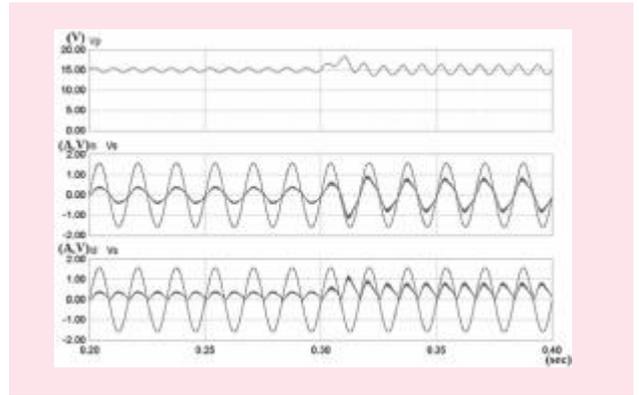


图 11 光伏逆变器的仿真结果

我们创建了一个 80W 光伏系统来满足测试目的。实验系统数据如下: 输入电压: 10—40V DC; 电网电压/频率: 110V/60Hz; 开关频率: 20kHz; 光伏模块: 80W ( $V_{MPPT}=15V$ )。

图 10 所示为创建的光伏逆变系统的框图。外部控制回路是一个最大功率点跟踪(MPPT)控制器, 负责计算光伏模块实现最大功率运行的工作电压指令  $V_p^*$ 。内部回路是一个电压调节回路, 专为调节光伏模块的电压  $V_p$  使之接近电压指令  $V_p^*$ 。将电压控制器的输出乘以一个半周期正弦信号, 以获得变换器的控制电压  $V_{con}$ 。通过 PWM 获得反激式变换器主开关设备的触发信号。

在硬件实施之前, 将创建的光伏逆变系统在 PSIM 软件环境下进行模拟, 以确认所设计的控制器性能。图 11 所示为仿真结果。将光伏模块设置在最大功率点, 所提出的 MPPT 控制器就能够使光伏模块保持 15V 电压。由图 11 可知, 流入电网的仿真电流失真较低, 并且几乎与电网电压同相。这样就可以确保获得一个非常高的功率因数。

#### 五、结论

本文介绍了一种由 DC-DC 变换器和全桥 DC-AC 变换器组成的光伏逆变系统。在叙述了它的工作原理基础上, 建立了一个 80W 的并网光伏逆变系统。最后通过仿真实验验证了所提出的光伏逆变系统的可行性和有效性。对于开发和研究光伏并网逆变器的产品具有一定的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, (5): 72-74
- [3] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No.5, pp.1292-1306, 2005.

- [4] 魏伟,许胜辉.光伏并网逆变器的研究[J].电力电子技术, 2008,(11):43-44
- [5] Q.Zhao,Performance Improvement of Power Conversion by Utilizing Coupled Inductors [J].Virginia Polytechnic Institute and State University of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, February 03, 2003.
- [6] Q. Zhao and F. C. Lee. High-efficiency, High Step-up DC-DC Converters[J].IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, pp. 65-73, 2003.
- [7] N. Kasa, T. Iida and Liang Chen.Flyback Inverter Controlled by Sensorless Current MPPT for Photovoltaic Power System [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, pp. 1145-1152,2005.
- [责任编辑:刘 骋]

## Experiment Study on the PV Inverter

XU Sheng-hui

(Department of Electronic Information Engineering, Wuhan Polytechnic, Wuhan430074, China)

**Abstract:** This paper presents a PV inverter system formed by a DC-DC converter and a full-bridge DC-AC converter. The DC-DC converter combines the boost and fly back topologies to produce a semi-sinusoidal output current and achieve the high step-up objective. A full-bridge DC-AC converter controlled with low-frequency switching techniques is used to convert the current into sinusoidal form and feed power to the grid with unit power factor. The circuit operating theory of the proposed PV inverter is firstly addressed; then an 80W prototype system is designed and built. The feasibility and effectiveness of the proposed circuit are confirmed with some simulation and experimental results.

**Key words:** grid connected PV inverter; boost converter; fly back converter; simulation experiment

(上接第 31 页)

- [15] 林玮莉.台湾现金减资宣告效果之实证研究[D].台北:台湾大学,2006.
- [16] 杨芳瑜.公司减资退还股款之研究[D].台北:台湾大学,2006.
- [17] 林宝珍.上市公司减资方式,与其股价异常报酬关系之研究[D].台北:东吴大学,2004.
- [18] 邱继毅.台湾上市柜公司减资行为之信息内涵实证研究[D].台北:政治大学,2004.

[责任编辑:张 磊]

## The Impact of Capital Reduction on Corporate Financial Performance

FU Xiu-ren

(Department of Business Administration, Overseas Chinese University, Taizhong40721, China)

**Abstract:** There are two types of reduction activities in the stock market. The first type is as foreign market; it reduces the per value of stock. The second type reduces outstanding share of companies. The first reduction case was Regent hotel on 2002. Until now reduction is an importation tool and issue on capital market. The result of this study are: there is a positive significantly relationship on cash reduction and financial performance; there is a positive significantly relationship on treasure stock reduction and financial performance; there is a negative significantly relationship on reduction for income loss and financial performance.

**Key words:** cash reduction; treasure stock reduction; reduction for income loss reduction; financial performance