

# 应用于 PET 的级联 H 桥直流侧电压平衡研究

张 展 杨 东

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003)

**摘 要:** 电力电子变压器(power electronic transfoemer, PET)的级联模块存在直流母线电压不平衡的问题,严重影响系统的稳定运行。本文针对电力电子变压器的级联 H 桥整流器直流侧电压的不平衡问题进行研究。首先,通过建立级联 H 桥整流器的数学模型,分析了各个级联 H 桥模块之间产生电压不平衡的原因,并提出了基于调制波矢量重构技术的电压功率平衡控制策略。然后,通过重构调制波矢量,实现直流侧电压平衡,保证了各 H 桥给定有功功率等量分配,使流经 H 桥的无功功率按需分配。最后,通过在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真,验证了本文方法的正确性和有效性。

**关键词:** 电力电子变压器;级联 H 桥整流;直流电压平衡;调制波矢量重构;电压控制

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

## Study of DC side voltage balance of cascaded H bridge used in PET

Zhang Zhan Yang Dong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** The cascade module of power electronic transfoemer (PET) has the problem of DC side voltage unbalance, which affects the stable operation of the system seriously. For power electronic transfoemer, the problem of DC side voltage unbalance in the cascaded H bridge rectifier is studied in this paper. The mathematical model of cascaded H-bridge rectifier is established, the reasons of voltage imbalance between cascaded H-bridge modules are analyzed, and the control strategy of voltage power balance is put forward, based on the reconstruction technique about modulation wave vector. By reconstructing the modulation wave vector, the balance of DC side voltage is achieved. The equal distribution of active power toward each H bridge is ensured, which makes the reactive power flowing through the H bridge to be allocated according to the requirement. Finally, the correctness and effectiveness of the method is verified by simulation in MATLAB/Simulink environment.

**Keywords:** power electronic transfoemer; cascaded H bridge rectifier; DC voltage balance; the modulation wave vector refactoring; voltage control

## 1 引 言

近年来,随着智能电网的发展,分布式电源和电气传动技术的推进,高电压、大功率、智能型的电力电子变流装置应用的范围越来越广,一种新型的电力电子变压器正在逐步取代传统的变压器。该电力电子变压器采用三级变换的结构,配合 H 桥级联使高压变流器摆脱了工频变压器的限制,并且具有结构简单,控制灵活,易于模块化运行等优点。

国内对电力电子变压器的研究起步较晚,目前主要研究的问题在于 PET 级联 H 桥变换器直流侧电容电压平衡,并取得了一系列的进展。文献[2]针对自平衡电力电子

变压器提出了相应的控制策略,文献[6]针对链式逆变器的静止同步补偿器提出了相应的直流侧电压平衡算法,文献[7]提出针对级联多电平逆变器的功率均衡控制研究,文献[10]针对级联 H 桥 SVG 提出了相应的电压均衡控制算法。但这些方法只针对直流侧电压不平衡的状态进行分析研究,在负载不平衡的情况下不能保证各 H 桥的功率分配均匀。

为了克服上述方法的局限性,本文针对级联 H 桥变换器的电压平衡和功率均衡问题,提出一种新的调制波矢量重构的方法。通过实验仿真表明该方法不仅能使级联 H 桥变换器直流侧电压保持平衡,更能使给定各 H 桥的有功功率等量分配,流经的无功功率按需分配。

## 2 数学模型及拓扑结构

### 2.1 拓扑结构分析

图1所示为典型的单相PET拓扑结构,该结构由输入整流环节,中间DC-DC隔离环节,输出逆变环节组成。工作原理为:整流环节将高压工频交流电转换为高压直流电;隔离环节将高压直流电转换为高压高频交流电,再经高频变压器转变为低压高频交流电;最后,输出环节将低压高频交流电转换为低压频交流电输送出去。

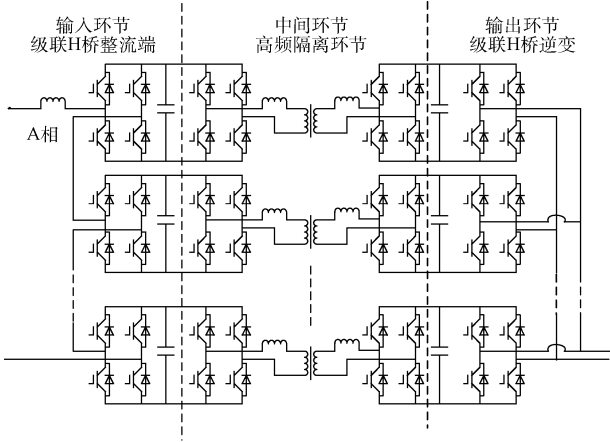


图1 单相PET拓扑结构

图2所示为级联H桥变换器的拓扑结构,正常运行时我们忽略L的内阻,用电阻R来代表各H桥自身损耗和有功功率的传输。系统稳态运行时,从电网吸收有功功率并向电网提供感性的无功功率,其稳态运行的矢量图如图3所示。

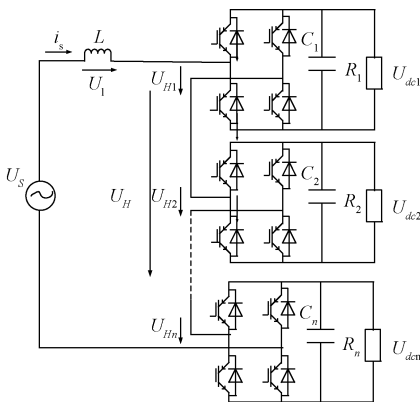


图2 级联H桥变换器的拓扑结构

$$\begin{aligned} U_s &= U_H + U_L \\ U_h &= U_{h1} + U_{h2} + \dots + U_{hn} \\ U_h &= U_{hd} + U_{hq} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $U_{hd}$  和  $U_{hq}$  分别为各H桥交流电压在电流  $I_s$  及其垂直轴上的投影分量,亦可称为  $U_h$  的有功分量和无功分量。

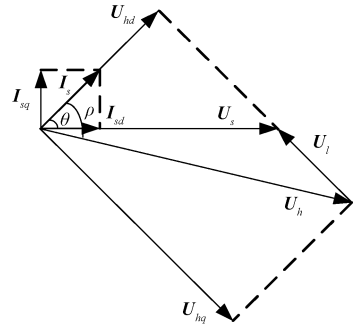


图3 系统稳态运行矢量图

电网提供的视在功率:

$$S_s = P_s + jQ_s = U_s I_{sd} + j(-U_s I_{sq}) \quad (2)$$

式中:负号表示H桥变换器向电网提供无功功率,下同。

则各H桥变换器的视在功率为:

$$S_i = P_i + jQ_i = U_{Hdi} I_s + j(-U_{Hqi} I_s) \quad (3)$$

由图2所示电路关系,忽略H桥的内阻损耗,可得下式:

$$S_i = \frac{U_{dci}^2}{R_i} + jC_i U_{dci} \frac{dU_{dci}}{dt} \quad (4)$$

### 2.2 H桥电容电压和功率不平衡分析

由H桥变换器的线性调制理论可得:

$$U_{hi} = U_{dci} D_i \quad (5)$$

式中:  $D_i$  为各H桥的调制波矢量。由式(3)~(5)可得到下面关系:

$$D_{id} I_s = U_{dci} / R_i \quad (6)$$

式中:  $D_{id}$  是H桥的调制波矢量在电网侧电流轴上的有功分量。

由式(6)可知,若采用双闭环控制保持H桥的调制波矢量不变,即  $D$  不变。那么此时有:

$$\begin{aligned} D_{1d} &= D_{2d} = \dots = D_{nd} \\ U_{dci} / R_1 &= U_{dci} / R_2 = \dots = U_{dci} / R_n \end{aligned} \quad (7)$$

从上式可以看出,在R不完全相等的时候,各H桥变换器的直流电压不能保持平衡,并且有功功率也不能保持平衡。如图4所示,R越大,  $U_h$  越大,P和Q也越大。 $I_s^*$  表示电流  $I_s$  的幺值,则电流轴和其垂直轴分别表示有功分量和无功分量。

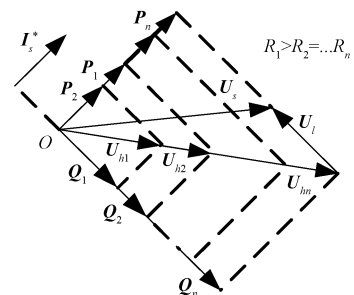


图4 双闭环控制下稳态矢量图

若保持  $U_{dc}$  不变,采用直接修改 H 桥调制比的方法,则此时有:

$$U_{dc1} = U_{dc2} = \dots = U_{dcn}, \text{ 结合式(6)可得:}$$

$$(1 + m_1)DR_1 = (1 + m_2)DR_2 = \dots = (1 + m_n)DR_n \quad (8)$$

可以看出,  $m_n$  为各 H 桥调制比的修正系数,为保证总的功率守恒,则  $m_1 + m_2 + \dots + m_n = 0$ 。

通过式(8)可以得出,由给定的调制比系数  $m_i$  可以匹配 H 桥之间的负载差异,虽然直流侧电压能保持平衡,但功率仍然不能平衡。如图 5 所示,  $U_{dc}$  保持不变的情况下,  $R$  越大,调制比系数  $m_i$  越小,甚至有可能是负数,而  $P$  和  $Q$  也越小。

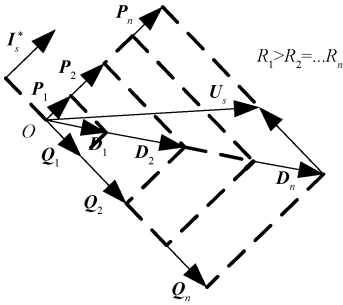


图 5 电压平衡控制下稳态矢量图

### 3 调制波矢量重构原理

#### 3.1 基于调制波矢量重构的电压平衡和功率均衡新算法

如图 6 所示,在 H 桥变换器直流电压平衡基础上为使各 H 桥有功功率平衡,提出了调制波矢量重构这一概念,引入了调制波误差分量,将其叠加到原来的调制波矢量中,得到一个新的重构的调制波矢量信号。

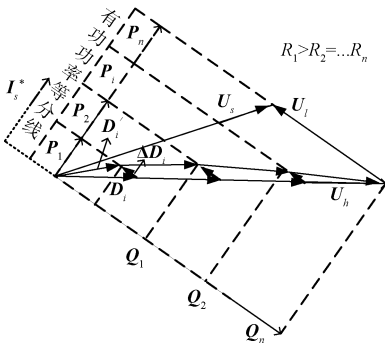


图 6 电压平衡和功率均衡稳态矢量图

图 6 中,  $\Delta D_i$  ( $i=1,2,3 \dots n$ ) 为调制波误差分量,和电流矢量  $I_s^*$  垂直,  $D_i'$  为重构之后的调制波矢量,则有:

$$D_i' = D_i - \Delta D_{i-1} + \Delta D_i$$

$$D_i' = (1 + m_i)D \quad (9)$$

$$\Delta D_0 = \Delta D_n = 0$$

由式(9)可以得到引入调制波误差分量的各 H 桥的重构调制波矢量,其误差分析如图 7 所示。

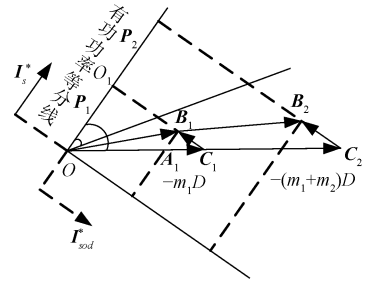


图 7 稳态控制局部放大图

上图中,  $\angle OA_1O_1 = \angle C_1A_1B_1$  二者互为对顶角,  $\triangle OA_1O_1$  和  $\triangle C_1A_1B_1$  是相似三角形,则:

$$A_iB_i = A_iC_i \sin \rho$$

$$A_iC_i = - \sum_{j=1}^n m_j d_m \quad (10)$$

式中:  $i=1,2, \dots, n$ ;  $d_m$  即未添加平衡控制算法时的 H 桥调制比,即  $D$  的幅值。由式(8)(9)(10)可得出添加矢量误差之后的各 H 桥的重构调制波矢量计算公式:

$$D_i' = (1 + m_i)D - m_i d_m \sin \rho I_{sod}^* \quad (11)$$

式中:  $I_{sod}^*$  为之后  $I_s^*$   $90^\circ$  的单位矢量。

#### 3.2 控制策略

本文中所采用的级联 H 桥变换器的控制策略主要有双闭环控制,电压平衡控制和功率均衡控制 3 部分组成。如图 8 所示。

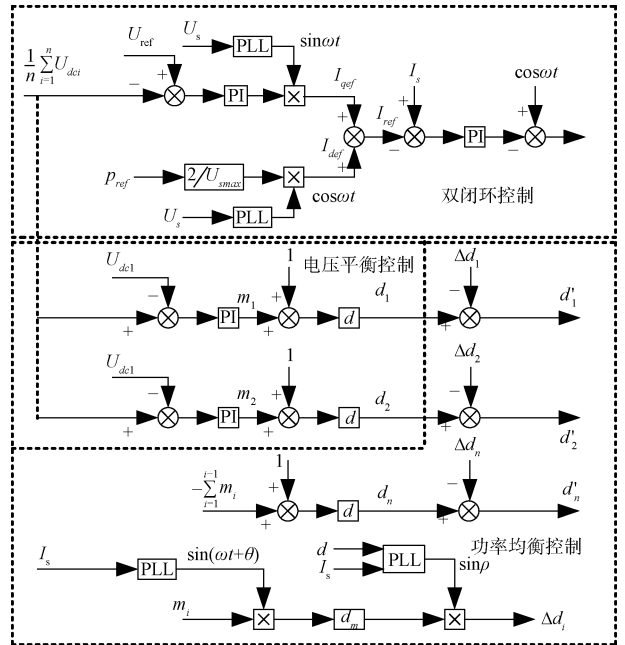


图 8 电压平衡及功率均衡控制策略

本文采用双 PI 控制构成的双闭环控制系统, H 桥直流侧电压均值由电压外环稳定,并形成无功电流  $I_{qcf}$ ,有功电

流信号  $P_{ref}$  由外部给定, 电流环则采用电压前馈式控制, 提高系统的稳定性和动态响应。

电压平衡控制则采用直接修改调制比的方法, 由前文可知, 级联 H 桥各桥的直流电压相互影响。因此, 我们采用各 H 桥直流侧电压与直流侧电压均值比较且经过独立的 PI 调节作用后形成一个调制比修正系数  $m_i$ , 通过调制比修正系数  $m_i$  来消除直流侧电压之间的差异。

功率均衡控制则是在以上的基础上, 通过式(11)计算

出各 H 桥的调制波矢量误差分量, 再分别得到重构的新的调制波矢量。图 8 中,  $\sin(\omega t + \theta)$  由  $\mathbf{I}_s$  经过锁相环得到,  $\sin\rho$  由  $d$  和  $\mathbf{I}_s$  经锁相环得到。

#### 4 波形仿真

为验证本文所提出的均压和平衡功率的控制方案的真实有效性, 在 MATLAB/Simulink 下搭载了 3 个 H 桥变换器。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

$U_{s,max} / V$	$U_{dc1} / V$	基准负载 $R_i / \Omega$	有功功率 $P / kW$	直流电容 $C_i / \mu F$	滤波电感 $L / mH$	开关频率 $f / kHz$
1500	1000	100	100	3000	2	1

其中, 对比负载  $R_2$  和  $R_3$  分别为  $150 \Omega$  和  $60 \Omega$ , 本文的调制部分采用广泛应用的载波移相调制策略, 在较低的开关频率下能实现较高的等效开关频率。

##### 4.1 直接修改调制比的电压平衡

根据式(8), 通过直接修改调制比的方法使直流侧电压平衡, 仿真时间为 3 s, 在 1 s 时加入平衡控制, 结果如图 9 所示。

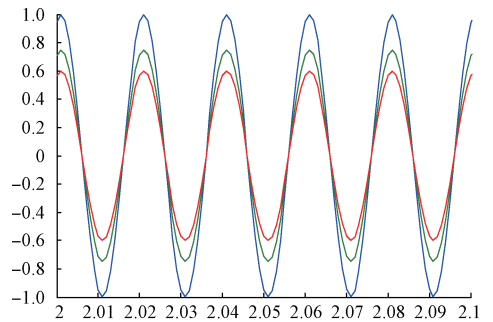
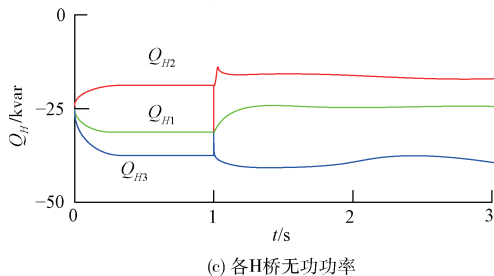
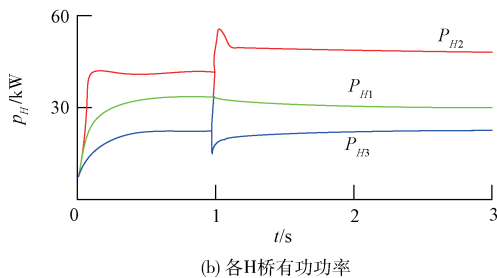
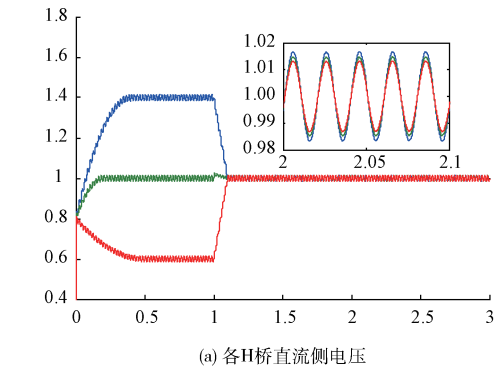
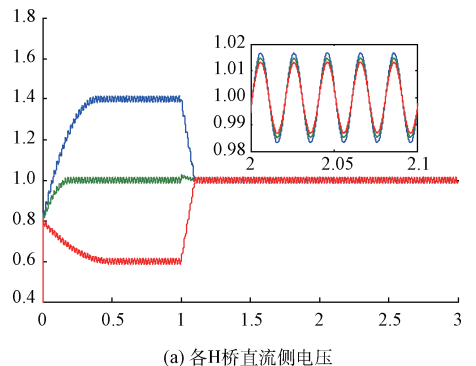


图 9 直接修改调制比电压平衡的波形

如图 9 所示, 在加入平衡控制之后, 各 H 桥直流侧电压趋于稳定, 平衡后的负载波动各不相同, 图 9(b) 和图 9(c) 分别为有功和无功图示, 负载越重, 有功和无功功率越大, 与分析一致。图 9(d) 为各 H 桥的调制波, 仅调制比不同。该方法虽然保证了 H 桥直流侧电压的平衡, 但对于各桥的有功功率却无法保持平衡。

##### 4.2 功率均衡控制

在上述电压平衡的基础上, 加入本文提出的控制算法, 得到图 10, 仿真时间 3 s, 在 1 s 的时候加入均衡控制。



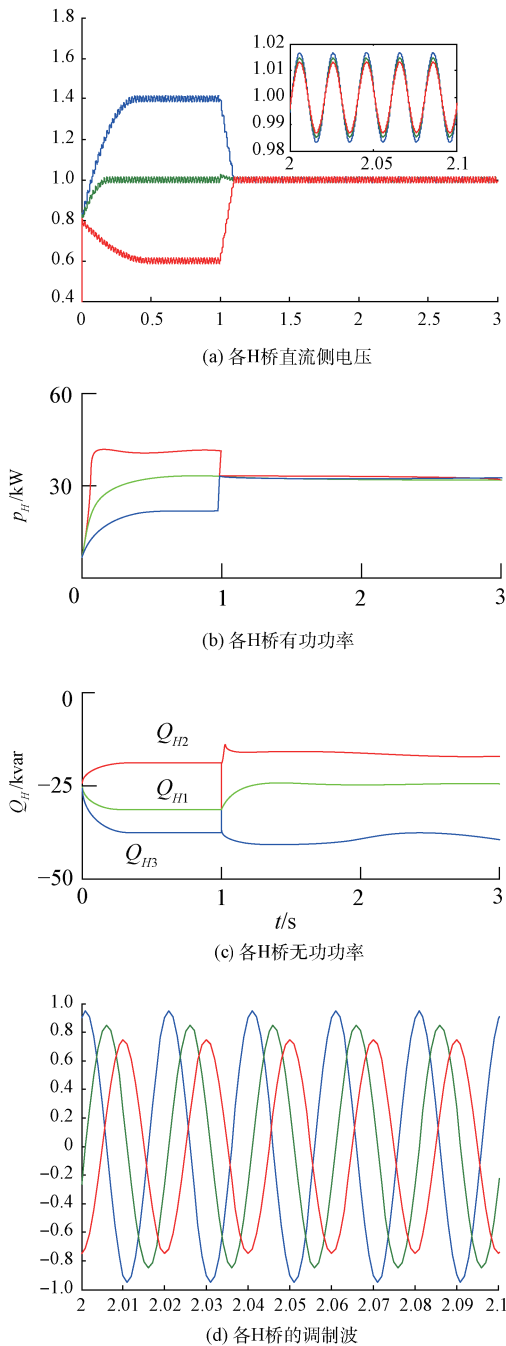


图 10 电压和功率均衡波形示意图

由图 10 可以看出,加入功率均衡控制模块之后,H 桥直流侧电压幅值与图 9 中的保持不变,各 H 桥电压波纹基本一致,不随负荷的变化而改变;无功功率实现了按需分配,有功功率趋于一致实现了平均分配,如图 10(b)和(c)所示;图 10(d)表示各 H 桥调制波的幅值和调制比和相位各不相同,与分析一致。

## 5 结 论

本文提出的重构矢量波的功率均衡控制方法与单纯

的电压均衡控制方法相比有以下几个有点:

- 1)各 H 桥直流侧电压能够保持一致;
- 2)各 H 桥给定的有功功率能够平均配;
- 3)各 H 桥流经的无功功率能够按需分配。

仿真结果表明,该方法较之更为合理有效,为平衡 H 桥电压和功率提供了参考。

## 参考文献

- [1] 耿俊成,刘文华,袁志昌.链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(一)仿真和试验[J].电力系统自动化,2003,27(16):53-57.
- [2] 王丹,毛承雄,陆继明.自平衡电力电子变压器[J].中国电机工程学报,2007,27(6):77-83.
- [3] 李子欣,王平,楚遵方,等.面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J].电网技术,2013,37(09):2592-2601.
- [4] 孙毅超,赵剑锋,季振东.并网型级联 H 桥变换器直流电压平衡和功率均衡控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(1):55-60.
- [5] 廖国虎,邱国跃,袁旭峰.电力电子变压器研究综述[J].电测与仪表,2014,51(16):5-10.
- [6] 刘文华,宋强,陈乐天,等.基于链式逆变器的 50MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2004,24(4):145-150.
- [7] 孙宜峰,阮新波.级联型多电平逆变器的功率均衡控制策略[J].中国电机工程学报,2006,26(4):126-133.
- [8] VAZQUEZ S, LEON J I, CARRASCO J M, et al. Analysis of the power balance in the cells of a multilevel cascaded H-bridge converter [J]. IEEE Trans on industrial Electronics, 2010, 57(7):2287-2296.
- [9] 张明锐,刘金辉,金鑫.应用于智能微网的 SVPWM 固态变压器研究[J].电工技术学报,2012,27(1):90-97.
- [10] 田铭兴,阎宏,赵雨欣.级联 H 桥 SVG 直流侧电容电压平衡控制方法[J].电网技术,2013,37(09):2632-2638.
- [11] 黄海宏,刘鑫,薛欢,等.基于载波移相技术的 H 桥级联高压 APF 研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(08):687-692.
- [12] 朱超杰,王友臣,朱琪.新型变压器局放监测特高频传感器的研究[J].仪器仪表学报,2013,34(04):749-755.

## 作者简介

张展,副教授,硕士生导师,主要从事电力系统分析与控制和矿山电气方面的研究。

E-mail:zhangzhan@hpu.edu.cn

杨东(通讯作者),硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

E-mail:leader\_dong@163.com