

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.014

基于 PWM 调制的高漏感变压器 三相输出平衡控制^{*}

王泽泽¹, 李文伟², 张胜锰³, 阳 林³, 金立军^{1*}

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 广西电网钦州供电局, 广西 钦州 535009;
3. 浙江冠华电气有限公司, 浙江 乐清 325606)

摘要:针对电力机车用高漏感变压器在运行中常出现的三相输出电压不平衡问题,以新型集成电抗器于一体的电力机车辅助电源逆变输出变压器为研究对象,通过建立电压闭环 PWM 调制以达到平衡三相输出电压和提高变压器供电质量的目的。建立了变压器与电抗器的高漏感磁集成模型,通过能量法计算得到高漏感变压器的漏感参数,并与低通滤波器的电抗器参数相匹配;基于 Simulink 进行高漏感变压器的工况模拟,得到在实际运行过程中三相负载不稳定的情况下产生的三相输出电压不平衡问题;建立输出电压波形闭环控制回路,对逆变器的 PWM 开关信号输入进行调制。结果表明:利用能量法计算的变压器漏感值与实测值误差在 10% 以内,通过 PWM 调制瞬时电压闭环控制能有效抑制三相输出电压不平衡问题,提高逆变输出变压器的供电质量。

关键词:高漏感变压器;漏感计算;工况模拟;不平衡控制

中图分类号:TM421

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0173-05

Three-phase output balance control of the high leakage inductance transformer based on the PWM modulation

WANG Ze-ze¹, LI Wen-wei², ZHANG Sheng-meng³, YANG Lin³, JIN Li-jun¹

(1. School of electronics and information engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Guangxi power grid Qinzhou Power Supply Bureau, Qinzhou Guangxi 535009, China;
3. Zhejiang Guan Hua Electric Co., Ltd., Yueqing 325606, China)

Abstract: To solve the problem of the imbalanced three-phase output voltage of the high leakage inductance transformer, the inverter output transformer of the electric locomotive auxiliary power supply was researched, which was integrated with reactors for the power locomotives. By voltage closed-loop and PWM modulation, balancing three-phase output voltage and improving the quality of the transformer's power supply was achieved. Setting up the high leakage inductance transformer and the filter inductor integrated model, the leakage inductance of the transformer was calculated through energy method, matching the inductance parameters of the low-pass filter. The transformer's high leakage inductance calculation was conducted based on the Simulink simulation in the unstable three-phase load, getting the three-phase output voltage under the condition of unbalanced waveform problem. The voltage closed-loop circuit was established to control the output voltage waveform through the PWM switch signal modulation of the inverter input. The results show that the error of transformer leakage inductance calculation by energy method is within 10% of measured values. Based on the PWM modulation output voltage closed-loop control, the three-phase output voltage imbalance can be effectively suppressed, improving the quality of transformer's power supply.

Key words: high leakage inductance transformer; leakage inductance calculation; working condition simulation; output unbalance control

收稿日期:2016-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577135)

作者简介:王泽泽(1991-),男,硕士研究生,主要从事电机与电器方面的研究工作. E-mail: zezewang7@163.com

通信联系人:金立军,男,博士,教授,博士生导师. E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

0 引言

随着电力机车轻量化发展和提速的要求^[1-2],对电力机车电气设备的集成和电能质量的控制^[3-4]要求越来越高。将电抗器集成到变压器是电气设备集成的一种方法^[5],传统集成方法是利用变压器的铁芯,绕制额外的电抗器绕组^[6],这种方法容易使电抗器磁路与变压器磁路产生耦合,影响变压器的和电抗器的正常运行,且由于额外电抗器绕组的加载,集成效果不明显;电力机车辅助变压器的输出电能质量关系到电气设备的运行寿命和机车安全^[7-9],负载多样性和变化性对输出变压器的影响较大^[10],对输出变压器的输出波形进行控制意义重大。

本研究提出一种新型电力机车高漏感集成电抗器的辅助电源逆变输出变压器^[11],采用高漏感磁集成方法^[12],无需加载电抗器绕组;采用能量法计算漏感^[13],为工况模拟和工程设计提供准确参数;Simulink 工况模拟为高漏感变压器的输出控制提供仿真实验平台;基于 PWM 调制的输出电压不平衡闭环控制解决因负载引起的三相输出不平衡问题^[14-15],以有效保证输出变压器的高效运行。

1 变压器高漏感磁集成模型

本研究中的高漏感变压器是 HX₀2B 型电力机车辅助电源的三相逆变输出变压器,其输入为幅值 3 775 V、有效值 1 458 V 的三相 PWM 正弦波,输出为有效值 400 V 的三相正弦波,功率 115 kVA,为机车的风机、照明等用电设备供电。高漏感变压器通过设计加载主、副铁芯将主磁通分离,从而将低通滤波器的电抗器部分集成变压器于一体,从而减少机车设备数量和体积,实现电力机车的轻量化。变压器实物及绕组模型如图 1 所示。

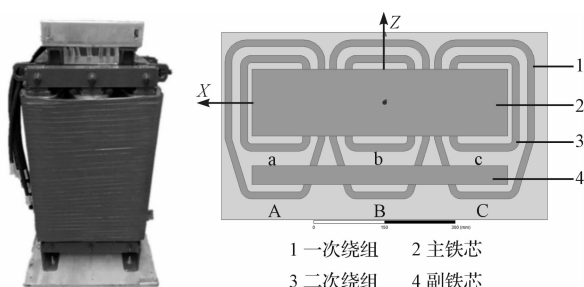


图 1 高漏感变压器实物及绕组模型

该高漏感变压器结构采用 Arkadiy Kats^[16]提出的变压器 E 型磁芯组合方法,铁芯包括主铁芯和副铁芯两部分,绕组方式为 Dyn11。变压器一次绕组采用轴向双分裂形式,包裹主、副铁芯两部分;二次绕组仅通过主铁芯与一次绕组进行耦合,副铁芯所产生的磁路

相对二次绕组形成额外漏感,该漏感值相对空气部分的漏感值较大,在二次侧形成的漏磁电抗也比较大,成为二次侧部分额外的电抗值,利用这部分的电抗,与外部输出的电容器组形成低通滤波器,从而达到磁分配集成电抗器的目的。变压器的漏感值可以通过调节主副铁芯的截面积和气隙宽度、一二次绕组参数、空气气隙部分来调整大小。

该变压器归算至一次侧的 T 形等效电路如图 2 所示。

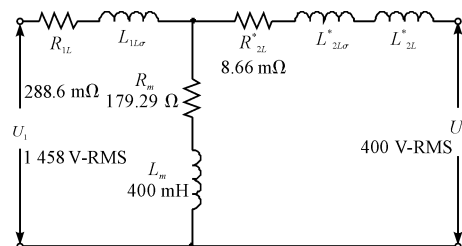


图 2 高漏感变压器等效电路图

R_m, L_m —励磁阻抗; $R_{1L}, L_{1L\sigma}$ —一次侧绕组电阻、漏抗; $R_{2L}^*, L_{2L\sigma}^*$ —二次侧绕组归算至一次侧的电阻、空气漏抗; L_{2L}^* —高漏感形成的集成电抗器部分

高漏感变压器输出波形由星形连接的三相低通滤波器进行滤波,低通滤波器的截止频率与电容器组中的电容大小和集成在变压器中的电抗值大小相关^[17],满足:

$$\omega_L = 2\pi f_L = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

截止频率与变压器输入的 PWM 正弦波载波频率的关系满足:

$$\frac{1}{10}f_c \leq f_L \leq \frac{1}{5}f_c \quad (2)$$

式中: $f_c = 1\,500\text{ Hz}$, 所以截止频率 $150 \leq f_L \leq 300$, 取 $f_L = 200\text{ Hz}$, 因此, 电容器组的电容值大小一旦确定, 集成的电抗器电感值也确定, 要求高漏感变压器的漏感值满足低通滤波器的要求。

2 变压器漏感能量法求解

电感和漏感参数是变压器绕组的重要参数, 对于普通的变压器而言, 消耗在变压器内部的有功功率即为变压器绕组电阻损耗功率和漏磁场引起的损耗功率之和, 变压器内部的无功功率则是用来建立主磁通和漏磁通。变压器的漏磁通计算和漏感计算正式从麦克斯韦方程出发, 得到表征漏磁场的能量 W_m , 从而求出变压器的漏感。对于一般的磁场系统, 磁场的能量 W 与电感量之间的关系满足:

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad (3)$$

式中: I —通过绕组的电流有效值。

对于线性磁性介质材料组成的场域,空间各部分的漏磁场能量 W_m 可表示为:

$$W_m = \int_V \frac{1}{2}BHdV = \frac{1}{2\mu}\int_V B^2dV \tag{4}$$

式中: B —介质材料中磁感应强度, V —计算空间的体积单位, μ —介质材料的磁导率。

在计算出各区域磁场能量之后,整个场域的磁场能量之和为 $\sum W_m$,总的漏感由式(3) 计算得出。

求解变压器正常工作情况下空间区域中的磁场能量可以通过有限元分析软件 Ansoft-Maxwell 进行^[18],高漏感变压器原边副边均为载流线圈,输入等效电流即可。线圈和铁芯区域按有限元剖分离散化求解,线圈区域以动态矢量磁位 A 和等效电流 I 为自由度。运行过程中,主磁通沿主、副铁芯闭合,漏磁通在副铁芯和周围空气气隙中流通,求解区域即为漏磁通区域。考虑有限元仿真分析方法的要求和高漏感变压器的特点,网格剖分应该着重考虑。线圈电流为漏磁场场源,副铁芯和空气部分为漏磁通通道,网格剖分密度应高于其他计算区域,采用映射四边形网格剖分方式,可保证漏磁场能量计算的精度,其余求解区域采用自由剖分形式即可满足要求。

仿真得到的高漏感变压器磁场能量分布如图 3 所示。

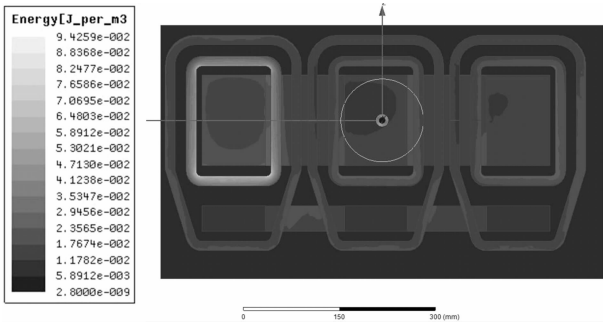


图 3 高漏感变压器磁场能量分布

本研究在 Maxwell 计算结果后处理器中对副铁芯

及空气部分的能量计算结果作积分,并换算成对应的漏感参数。该类型高漏感变压器的漏感设计值、实测值和能量法计算值对比如表 1 所示。

表 1 漏感设计、实测、计算值参数对比

对比类别	漏感值/mH
设计值	0.56
实测值	0.54
能量法计算值	0.517

经过能量法计算的漏感值为实测值 95.7%,误差在 10% 以内,计算精度达到了要求。

3 变压器 Simulink 工况模拟

HX₂B 型电力机车的辅助电源系统电力取自主变流器的中间直流环节,电压 3 775 V,通过三相逆变电路生成高漏感变压器所需的幅值 3 775 V、有效值 1 458 V 的三相 PWM 正弦波,逆变环节的 PWM 控制信号由外部电路产生,高漏感变压器将 PWM 波形转换成有效值 400 V 的正弦交流电,以供电力机车的辅助电气设备使用。集成的电抗器和外部电容器组形成低通滤波环节,对高漏感变压器的输出波形进行滤波,从而给三相负载提供电力。

本研究通过 Simulink 对高漏感变压器的工作状况进行模拟,包含主变流器中间直流环节、三相逆变桥、高漏感变压器、低通滤波器电容器组、三相对称负载和输入输出电压电流测量等部分。变压器中间直流环节电压 3 775 V;三相逆变桥采用带续流二极管的三桥式逆变电路;高漏感变压器有功功率视在功率 115 kVA,频率 50 Hz,励磁电阻 179.29 Ω ,励磁电感 400 mH,一次绕组电压有效值 1 458 V,电阻 0.432 9 Ω ,漏感 0.097 mH;二次绕组电压有效值 400 V,电阻 8.66 m Ω ,漏感 0.56 mH;电容器 3.17 mF;单相负载有功功率 34.2 kW,无功功率 3.8 kVar。

系统结构如图 4 所示。

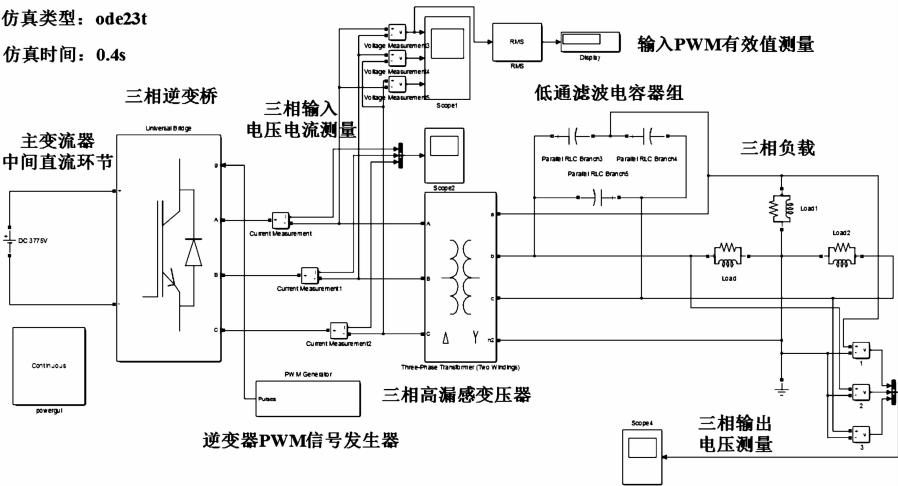


图 4 高漏感变压器工况模拟系统结构

逆变桥为高漏感变压器提供的三相 PWM 正弦电压波形,幅值 3 775 V,有效值 1 458 V,载波频率 1 500 Hz。三相输出电压波形如图 5 所示。

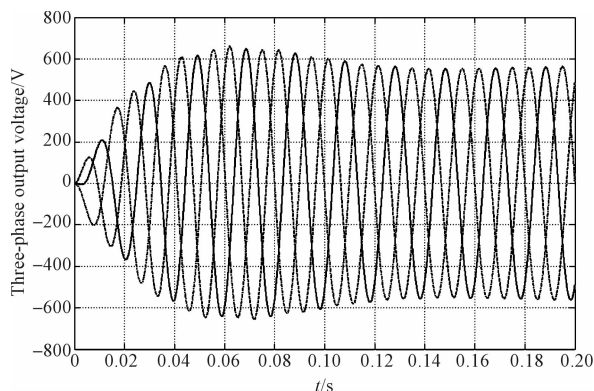


图 5 三相输出电压波形

高漏感变压器经过启动阶段,输出电压由 0 增长至最高并最终趋于稳定,稳定电压有效值 400 V,三相电压平衡对称,为三相负载提供电力。

4 三相输出不平衡的电压控制

4.1 输出不平衡现象

高漏感变压器的提供的电源为三相对称 400 V 电压源,电力机车的负载一般为单相负载,在负载分配过程中均保证三相负载的对称性。但实际运行过程中,单相负载的投入运行不同步,单相负载设备发生故障并从负载中切除,单相负载中部分设备需要停机检修等运行状况均导致三相负载功率出现不对称情况,高漏感变压器的输出电压由于输出电阻小、不存在稳压环节等措施,在三相负载出现不对称的过程中,高漏感变压器的输出电压也产生三相不平衡的情况。三相负载 A 相正常、B 相负载完全切除、C 相负载部分切除情况下的三相输出电压波形和三相输入电流波形如图 6 所示。

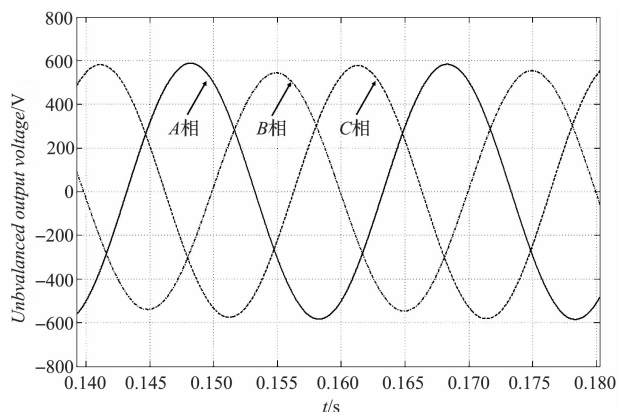


图 6 三相不平衡输出电压

由图可以看出,单相负载切除会导致对应相电压升高,三相电压不平衡相差 80 V,三相电压不平衡度为 0.24^[19]。

4.2 输出不平衡危害

高漏感变压器一次侧无零序电流,二次侧有零序电流,三相输出电压不平衡会造成中线电流增加,同时造成中性点电位的偏移;二次侧的零序电流完全是励磁电流,产生的零序磁通在主副铁芯中闭合,中线电流的增加会导致变压器铁损的加剧;另外,输出电压不平衡运行时,三相绕组的铜损会产生附加损耗。即三相不平衡运行会给变压器带来较大的损耗和电压偏移,影响变压器的正常运行和使用寿命。

输出电压的偏移会影响负载的正常工作,缩短用电设备的使用寿命,较高电压会影响甚至破坏绝缘性能,发生设备故障。

4.3 输出不平衡 PWM 调制

本研究针对高漏感变压器三相输出电压不平衡问题,建立输出电压-PWM 闭环瞬时控制策略^[20],该控制方法动态响应快,可适应输入电压的不平衡变化。

控制过程如图 7 所示。

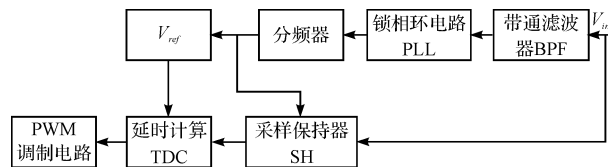


图 7 不平衡 PWM 调制电路

本研究检测到的 A、B、C 三相交流电压通过 50 Hz 带通滤波器后,进入锁相环电路以跟随电压频率的波动,其输出经过分频器后一路信号进入参考电压发生器,产生参考电压;一路信号作为采样保持的控制信号,采样保持器的输入信号是高漏感变压器的交流输出电压;采样保持器的输出信号与参考电压一同送入延时时间计算电路,其输出送入驱动控制电路,产生 PWM 调制驱动信号。

这种控制方式在每一个采样周期内都用输入电压与参考电压的瞬时值计算新的延时时间,其延时时间是一个采样周期,采样周期足够长,就可以保证输出电压能够迅速地跟随输入电压的变化。

基于工况模拟,加载了输出电压不平衡 PWM 调制电路,得到的三相负载 A 相正常、B 相负载完全切除、C 相负载部分切除,该情况下的三相输出电压波形如图 8 所示。

加载了控制回路的高漏感变压器三相输出电压达到了平衡状态,不平衡度为 0.02,解决了三相输出不平衡的问题。

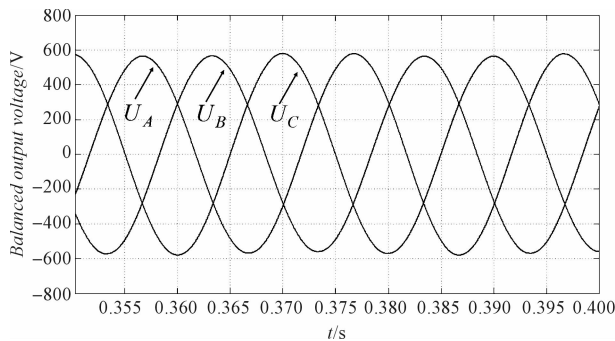


图8 三相平衡输出电压波形

5 结束语

本研究中的逆变输出高漏感变压器将低通滤波器的电抗器集成于一体,减小了电力机车电器设备体积和重量,有利于机车轻量化和提速。

本研究通过能量法计算得到高漏感变压器二次绕组漏感 0.517 mH,与实际值相差 4.3%,与设计值相差 7.7%,能量法漏感计算准确度较高。

基于 Simulink 的高漏感变压器工况模拟得到了输出电压波形,反映了变压器的运行状况和三相输出电压不平衡问题。基于电压闭环 PWM 调制技术的瞬时电压控制回路跟随性强,反应速度快,可有效解决变压器因负载不对称引起的三相输出电压不平衡问题,三相输出电压不平衡度由 0.24 下降到 0.02,提高了高漏感变压器的供电质量,保障了电力机车用电设备的安全运行。

参考文献 (References):

- [1] 王 璐,肖守讷,朱 涛,等. 160km/h 电力机车车体轻量化研究[J]. 机车电传动,2015(3):35-38.
- [2] HONGKE ZHANG, PING DONG, WEI QUAN, et al. Promoting efficient communications for high-speed railway using smart collaborative networking[J]. *IEEE Wireless Communications*. 2015,22(6):92-97.
- [3] 李世军,罗隆福,余双翔,等. 集成滤波电抗绕组变压器数学模型[J]. 电工技术学报,2015,30(14):201-207.
- [4] 周逊泉. 电力牵引系统供电方式及其负荷对电能质量影响的分析研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2007.
- [5] 田铭兴,尹健宁,柳轶彬,等. 基于磁集成技术的变压器式

可控电抗器的结构设计与分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3141-3149.

- [6] 尹健宁,田铭兴,柳轶彬. 变压器式可控电抗器磁集成结构设计与仿真分析[J]. 电网技术,2014,38(11):3236-3241.
- [7] KORAY SEPETCI, BUNYAMIN TAMYUREK. Design and simulation of a high power quality regenerative PWM rectifier system for 1 MW electric locomotives[C]//2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). New York:IEEE;2013:1-6.
- [8] 吴 忠,宋红霞. 机车安全状态监测信息平台研究与设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2011,34(3):57-60.
- [9] 周宝伟. 机车受电弓阻尼器检测系统设计[J]. 机电工程技术,2016,45(9):54-56.
- [10] 方 璐,罗 安,徐先勇,等. 高速电气化铁路新型电能质量补偿系统[J]. 电工技术学报,2010,25(12):167-176.
- [11] 李 朋,郝治国,张保会,等. 基于有限元法的变压器漏感计算在绕组变形中的应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):49-53.
- [12] 尹健宁,田铭兴,王 果,等. 磁集成技术在变压器式可控电抗器中的应用[J]. 高压电器,2014,50(5):6-11.
- [13] 律方成,郭云翔,李 鹏. 大功率中频变压器漏感计算及其校正方法[J]. 高电压技术,2016,42(6):1702-1707.
- [14] 孟 进,马伟明,张 磊,等. 考虑 PWM 调制策略的逆变器共模和差模干扰源模型[J]. 电工技术学报,2007,22(12):92-97.
- [15] 张 斐,许建平,曹太强. 不平衡负载下三相逆变电源控制方法的研究[J]. 机车电传动,2009(1):29-32+69.
- [16] 王亚超,刘 军,何湘宁. 高压大功率 E 型变压器漏感有限元仿真计算[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):109-114.
- [17] Mengsu YANG, Jing XIA, Yan GUO. Highly Efficient Broadband Continuous Inverse Class-F Power Amplifier Design Using Modified Elliptic Low-Pass Filtering Matching Network[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016,64(5):1515-1525.
- [18] 晏 明,马伟明,欧阳斌,等. 双九相同步电机定子漏感计算[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):524-531.
- [19] 张有玉,郭 珂,周 林,等. 三相三线制系统电压不平衡度计算方法[J]. 电网技术,2010,34(7):123-128.
- [20] 袁佳歆,潘建兵,饶斌斌,等. 三相逆变器的最小共模电压 PWM 控制[J]. 电工技术学报,2012,27(8):42-48.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王泽泽,李文伟,张胜猛,等. 基于 PWM 调制的高漏感变压器三相输出平衡控制[J]. 机电工程,2017,34(2):173-177.

WANG Ze-ze, LI Wen-wei, ZHANG Sheng-meng, et al. Three-phase output balance control of the high leakage inductance transformer based on the PWM modulation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(2):173-177.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn