DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.322 **中图分类号**：TM423 **文献标志码**：A

新型磁控变压器的特性分析

赵国生，高权威，郑晓雷，潘俊鹏
(郑州大学电气与信息工程学院，郑州 450001)

摘 要：传统的有载调压技术会存在产生电弧、响应速度慢、调节精度低等不足，影响变压器运行可靠性。新型电力电子变压器虽具有无弧、响应快的优势，但其损耗高、成本高。基于此，提出1种新型单相四柱式磁控变压器结构，由磁控电抗器和变压器串联连接组成。根据磁控电抗器拓扑结构分析该磁控变压器工作原理，并推导出电路方程与电磁方程。该结构的右旁轭可以提供交流磁通回路，不受直流磁通干扰。利用Ansys软件Maxwell与Simplorer进行模型场路耦合多物理域联合仿真分析其调压能力，并在Simulink中对输出电压进行谐波分析。结果验证了该新型磁控变压器可以无弧、无级、连续平滑地调节输出电压，谐波含量低。

关键词：新型磁控变压器；磁控电抗器；Ansys；场路耦合多物理域联合仿真；谐波

Characteristic Analysis of Novel Magnetron Transformer

ZHAO Guosheng, GAO Quanwei, ZHENG Xiaolei, PAN Junpeng
(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The traditional on-load voltage regulation technology has deficiencies such arc, a slow response speed and a low regulation accuracy, which affect the operation reliability of a transformer. Although the novel power electronic transformers have advantages of no arc and fast response, they have a large loss and a high cost. On the basis, a novel single-phase four-column magnetron transformer structure is proposed, which consists of a magnetron reactor and a transformer connected in series. According to the topological structure of the magnetron reactor, the working principle for the magnetron transformer is analyzed, and the circuit equation and electromagnetic equation are deduced. The right-side yoke in this structure can provide an AC flux loop, which is not interfered by the DC flux. The Maxwell and Simplorer in software Ansys are used to conduct field-circuit coupled multi-physics domain co-simulation to analyze the voltage regulation capability of the model, and the harmonic analysis of output voltage is carried out in Simulink. It is verified that the proposed novel magnetron transformer can adjust the output voltage smoothly without arc and without step, and the harmonic content is low.

Keywords: Novel magnetron transformer; magnetron reactor; Ansys; field-circuit coupled multi-physics domain co-simulation; harmonic

电压的稳定性是衡量电能质量的一项重要指标[1]。电压的波动会导致用电设备无法工作在额定电压下，影响电气设备的正常使用，甚至造成设备损坏[2]。配电网中常用变压器来调节电压，其调压方式在不断地发展。无励磁调压具有操作简单、成本低的优点，但采用该方式进行调压时需断开变压器电源，多适用于季节性调整，无法适用于一些日波动负荷比较大的配电区域，并且其调压范围较小。而有载调压变压器在调压的过程中无需断电，保证了电力系统供电不间断，极大地提高了供电可靠性[3-4]。

文献[5]提出的传统有载调压采用机械分接头，但是通过改变变压器抽头比来实现电压调节，会存在产生电弧、响应速度慢、不能精确调节等缺点；文献[6]指出随着电力电子器件的快速发展，电力电子型有载分接开关可以实现无弧有载调压；文献[7]

收稿日期：2022-06-02；**修回日期**：2022-08-02；**录用日期**：2022-08-15；**网络首发日期**：2022-09-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52107170)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52107170

介绍了电力电子型配电变压器有载调压技术的研究，但缺乏对变压器电磁性能的分析；文献[8]采用电力电子开关实现分接头的有载调压，由于电力电子装置运行成本高，且晶闸管功率消耗大，对控制精确性和器件自身性能要求高。目前电力变压器的励磁电抗主要由铁心尺寸和结构决定，在变压器运行过程中铁心一般处于非饱和状态，其励磁电抗非常大，很难改变。文献[9]提出了他励和自励型磁性调压器的基本结构和工作原理，并对其工作特性进行了仿真分析，但没有给出具体的调压范围，且谐波含量高，无法满足配电变压器的要求。

为了解决以上问题，本文提出 1 种新型磁控变压器拓扑结构。磁控变压器通过应用磁控电抗器可变电抗的特性，调节磁控电抗器两端电压，进而实现输出电压的调节[10-13]。单相四柱式结构的右旁轭可为交流磁通提供回路，减少输出电压谐波含量。通过 Ansys 有限元软件建立二维模型结构，搭建外电路联合仿真分析其调压性能，验证了该新型磁控变压器可以连续平滑地调节输出电压，电能质量高。

1　新型磁控变压器的结构和工作原理

1.1　新型磁控变压器的结构

本文提出的新型磁控变压器设计为单相四柱式结构，如图 1 所示。其中铁心柱 1、铁心柱 2 构成磁控电抗器，铁心柱 3 构成互耦变压器，铁心柱 4 为旁轭提供交流磁通回路。铁心柱 1、铁心柱 2 上下部分均绕有匝数为 $N/2$ 的绕组，铁心柱 1 上绕组有一分接头(抽头比δ=L_k/N)，工作绕组 L_g 的末端与控制绕组 L_k 的首端通过晶闸管 TH_1 相连，铁心柱 2 的下绕组有一分接头，工作绕组 L_g 的首端与控制绕组 L_k 的末端通过晶闸管 TH_2 相连。铁心柱 1、铁心柱 2 的上下绕组交叉互连且 2 铁心的上绕组间连接有续流二极管 D。铁心柱 3 绕有变压器一次侧绕组 N_1 和二次侧绕组 N_2，N_1 首末端分别与铁心柱 1、铁心柱 2 下绕组末端和上绕组首端相连，N_2 两端接负载 Z，最后通入交流电压源[14-15]。

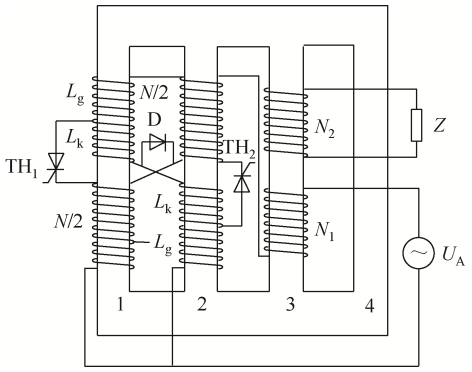


图 1　磁控变压器的结构

Fig. 1 Structure of magnetron transformer

1.2　新型磁控变压器的工作原理

文献[16-17]提出了磁控电抗器的基本结构，根据图 1 所示结构，可推导出磁控变压器的工作原理。当 2 个晶闸管无触发脉冲均不导通时，自耦电流为 0，铁心柱 1、铁心柱 2 的磁导率接近于 1，此时磁控电抗器有最大电抗，起到了支撑和分压作用。当磁控电抗器工作在正半周期时，晶闸管 TH_1 导通，晶闸管 TH_2 截止，流经铁心柱 1 上控制绕组 L_k 的交流电流经过晶闸管 TH_1 整流得到直流激磁电流，直流激磁电流产生的磁通方向呈顺时针流经铁心柱 1、铁心柱 2，由于铁心柱 1 上工作绕组电流方向与直流激磁电流相同，故直流激磁电流对铁心柱 1 起增磁作用，对铁心柱 2 起去磁作用；当工作在负半周期时，晶闸管 TH_2 导通，晶闸管 TH_1 截止，流经铁心柱 2 上控制绕组的交流电流经晶闸管 TH_2 整流得到直流激磁电流，直流激磁电流产生的磁场呈逆时针方向流经铁心柱 1、铁心柱 2，由于铁心柱 2 上工作绕组电流方向与直流激励电流相同，故直流激励电流对铁心柱 2 起增磁作用，对铁心柱 1 起去磁作用。二极管起到续流作用，1 个周期内铁心柱 1、铁心柱 2 交替饱和[18-19]。

磁控变压器的简化电路如图 2 所示。磁控电抗器与变压器一次侧绕组串联，两端电压和为数值不变的电源电压，通过控制晶闸管触发角的大小来改变磁控电抗器的铁心饱和程度，实现输出电压的连续调节。

忽略交流电源以及各绕组的电阻，根据图 2 可列出方程

$$\begin{cases} U_1=U_{\rm A}-U_{\rm m} \\ \dfrac{U_2}{U_1}=\dfrac{N_2}{N_1}=\lambda \\ U_Z=\lambda(U_{\rm A}-U_{\rm m}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$U_{\rm A}$为电源两端电压；U_1和U_2分别为变压器一、二次侧的电压；λ为一、二次侧匝数比；$U_{\rm m}$为磁控电抗器两端电压；U_Z为负载两端电压。

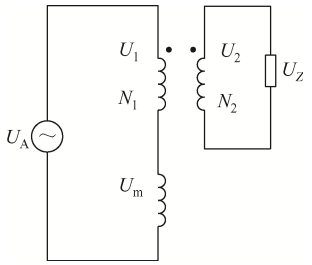


图 2 磁控变压器的简化电路

Fig. 2 Simplified circuit of magnetron transformer

由式(1)可知，此时磁控变压器的控制特性主要由流入磁控电抗器的电流基波幅值决定[20]，即

$$\begin{cases} I_{1\rm m}^{*}=\dfrac{1}{2\pi}(\beta-\sin\beta) \\ \cos\alpha=\dfrac{2}{\pi}\left(\sin\dfrac{\beta}{2}-\dfrac{\beta}{2}\cos\dfrac{\beta}{2}-1\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中：$I_{1\rm m}^{*}$为流入磁控电抗器的电流幅值标幺值；α为晶闸管触发角；β为铁心磁饱和度。从电流的角度分析，随着触发角α的增大，流入磁控电抗器的电流幅值减小，等效于负载侧的工作电流减小，因此改变触发角α的大小就可实现输出电压的连续调节。

2 新型磁控变压器的电磁特性

磁控变压器的电路原理如图 3 所示。由于结构及磁路工作状态对称，本次设计的磁控变压器重点推导以下 3 种工作状态的电磁方程：(1)$\rm TH_1$导通，$\rm TH_2$、D 截止；(2)$\rm TH_1$、D 导通，$\rm TH_2$截止；(3)D 导通，$\rm TH_1$、$\rm TH_2$截止。作如下假设：(1)输入交流电压源 $U_{\rm A}$、晶闸管 $\rm TH_1$、晶闸管 $\rm TH_2$、二极管 D 均为理想元件；(2)绕组 $L_{\rm g}$ 和绕组 $L_{\rm k}$ 匝数分别为$(1-2\delta)N/2$、δN，电阻分别为$(1-2\delta)R/2$、δR，变压器一、二次侧电阻分别为 R_1、R_2，负载阻抗为 Z；(3)铁心柱的磁势与磁感应强度分别为 F_1、F_2、F_3和 B_1、B_2、B_3，磁路长度均为 l，铁心柱截面积均为 A。

由图 1 和图 3 可求出磁势方程为

$$\begin{cases} F_1=lf(B_1)=\dfrac{1-\delta}{2}Ni_1+\dfrac{\delta}{2}Ni_5+\dfrac{1}{2}Ni_3 \\ F_2=lf(B_2)=\dfrac{1}{2}Ni_2+\dfrac{\delta}{2}Ni_7+\dfrac{1-\delta}{2}Ni_4 \\ F_3=lf(B_3)=N_1i-N_2i_8 \end{cases} \tag{3}$$

式中：f为铁心磁化特性的非线性函数；δ为抽光比；i为流经一次绕组的电流；i_1~i_8为流经各工作绕组、控制绕组和二次绕组的电流。

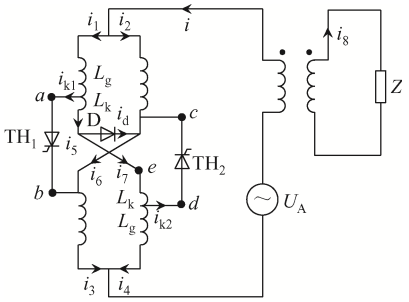


图 3 磁控变压器电路原理

Fig. 3 Schematic of magnetron transformer circuit

(1)$\rm TH_1$导通，$\rm TH_2$、D 截止

磁控变压器采用回路电流法求解，所列方程为

$$\begin{cases} U_{\rm A}=(1-\delta)NA\dfrac{{\rm d}B_1}{{\rm d}t}+[(1-\delta)R+R_1]i'+\dfrac{1-2\delta}{2}\cdot \\ \qquad Ri_1'+\dfrac{1}{2}Ri_2'+N_1A\dfrac{{\rm d}B_3}{{\rm d}t} \\ \dfrac{1-2\delta}{2}NA\dfrac{{\rm d}B_1}{{\rm d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{{\rm d}B_2}{{\rm d}t}+\dfrac{1-2\delta}{2}Ri'+(1-\delta)\cdot \\ \qquad Ri_1'=0 \\ \dfrac{1}{2}NA\dfrac{{\rm d}B_1}{{\rm d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{{\rm d}B_2}{{\rm d}t}+\dfrac{1}{2}Ri'+(1+\delta)Ri_2'=0 \\ (1-\delta)Ni'+\dfrac{(1-2\delta)}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_2'=F_1 \\ \dfrac{1}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_2'=-F_2 \\ N_1i'-N_2i_3'=F_3 \\ \dfrac{Zi_3'}{R_1i'+N_1A\dfrac{{\rm d}B_3}{{\rm d}t}}=\dfrac{N_1}{N_2} \end{cases} \tag{4}$$

求得电磁方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}=\dfrac{AN^2}{(1-\delta)lf(B_1)R}+\dfrac{U_\mathrm{A}}{AN(\delta-1)}-\left[\dfrac{lf(B_2)(2-2\delta-2\delta^2)+2lf(B_1)}{AN^2(\delta-1)(\delta^2+2\delta-2)}+\dfrac{lf(B_3)}{ANN_1(\delta-1)}\right]Z\\ \dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}=\dfrac{U_\mathrm{A}(2\delta^3+3\delta^2-6\delta+2)}{AN(\delta^3+\delta^2-4\delta+2)}+\dfrac{R(2lf(B_2)(-2\delta^3+2\delta^2+\delta-1)+lf(B_1)\delta(2-3\delta))}{AN^2(\delta^3+\delta^2-4\delta+2)}-\\ \qquad\dfrac{2lf(B_1)N_1(1-2\delta)+lf(B_3)N(2\delta^3+3\delta^2-6\delta+2)-2lf(B_2)N_1(2\delta^3+\delta^2-3\delta+1)}{AN_1N^2(\delta^3+\delta^2-4\delta+2)}Z\\ \dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}=\dfrac{2lf(B_1)R_1}{ANN_1(\delta^2+2\delta-2)}-\dfrac{2lf(B_2)R_1}{ANN_1}+\left[\dfrac{2lf(B_2)(\delta^2+\delta-2)-2lf(B_1)}{ANN_1(\delta^2+2\delta-2)}-\dfrac{lf(B_3)}{AN_1^2}\right]Z\end{cases}\tag{5}$$

磁控变压器的输出电压为

$$U_\mathrm{out}=\frac{\left[\dfrac{2lf(B_1)R_1}{N(\delta^2+2\delta-2)}-\dfrac{2lf(B_2)R_1}{N}\right]N_1}{N_2(Z-R_1)}Z+\frac{\left[\dfrac{2lf(B_2)(\delta^2+\delta-2)-2lf(B_1)}{N(\delta^2+2\delta-2)}-\dfrac{lf(B_3)}{N_1}\right]ZN_1+lf(B_3)R_1}{N_2(Z-R_1)}Z\tag{6}$$

(2)TH_1、D 导通，TH_2 截止

磁控变压器采用回路电流法求解，所列方程为

$$\begin{cases}U_\mathrm{A}=(1-\delta)NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}+[(1-\delta)R+R_1]i'+\dfrac{1-2\delta}{2}Ri_1'+\dfrac{1}{2}Ri_3'+N_1A\dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{1-2\delta}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}+\dfrac{1-2\delta}{2}Ri'+(1-\delta)Ri_1'=0\\ NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}+Ri_2'-Ri_3'=0\\ \dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}+\dfrac{1}{2}Ri'+(1+\delta)Ri_3'-\delta Ri_2'=0\\ (1-\delta)Ni'+\dfrac{1-2\delta}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_3'=F_1\\ \dfrac{1}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_3'=-F_2\\ N_1i'-N_2i_4'=F_3\\ \dfrac{Zi_4'}{R_1i'+N_1A\dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}}=\dfrac{N_1}{N_2}\end{cases}\tag{7}$$

求得电磁方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}=\dfrac{RZ\{l(3\delta-2)[f(B_2)N_1-f(B_3)N]+lf(B_1)N_1(\delta-2)\}+N_1(3\delta-2)[lf(B_1)R-NU_\mathrm{A}]}{ANN_1(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)}\\ \dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}=\dfrac{lf(B_1)N_1R(2\delta^2+\delta-2)+lf(B_2)N_1R(3\delta-2-2\delta^2)+lf(B_3)NR(2-3\delta)}{AN^2N_1(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)}+\\ \qquad\dfrac{R[\delta lf(B_1)R-NU_\mathrm{A}](3\delta-2)-lf(B_2)R^2(3\delta^2-5\delta+2)}{AN^2(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)}\\ \dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\{lf(B_1)N_1R(2-3\delta-\delta^2)+(3\delta^2-5\delta+2)Rl[f(B_2)N_1-f(B_3)N]\}+2\delta^2NN_1U_\mathrm{A}}{AN^2N_1(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)}Z+\\ \qquad\dfrac{RR_1l[f(B_1)(\delta^2-2+3\delta)+f(B_2)(5\delta-2-3\delta^2)]}{AN^2(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)}\end{cases}\tag{8}$$

磁控变压器的输出电压为

$$U_{\text{out}}=\frac{lf(B_1)N_1^2R(2-3\delta-\delta^2)+(3\delta^2-5\delta+2)RlN_1[f(B_2)N_1-f(B_3)N]+2\delta^2NN_1^2U_{\text{A}}}{[N^2(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)](N^2Z-N_2R_1)}Z^2+\frac{RR_1N_1^2l[f(B_1)(\delta^2-2+3\delta)+f(B_2)(5\delta-2-3\delta^2)]}{[N^2(2\delta^2Z+3\delta^2R-5\delta R+2R)](N^2Z-N_2R_1)}Z+\frac{lf(B_3)R_1Z}{N^2Z-N_2R_1} \tag{9}$$

(3)D 导通，TH_1、TH_2 截止

磁控变压器采用回路电流法求解，所列方程为

$$\begin{cases}U_{\text{A}}=NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}+Ri'+\dfrac{1}{2}Ri_1'+\dfrac{1}{2}Ri_2'+R_1i'+N_1A\dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}+\dfrac{1}{2}Ri'+Ri_1'=0\\ \dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}-\dfrac{1}{2}NA\dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}+\dfrac{1}{2}Ri'+Ri_2'=0\\ Ni'+\dfrac{1}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_2'=F_1\\ \dfrac{1}{2}Ni_1'+\dfrac{1}{2}Ni_2'=-F_2\\ N_1i'-N_2i_3'=F_3\\ \dfrac{Zi_3'}{R_1i'+N_1A\dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}}=\dfrac{N_1}{N_2}\end{cases} \tag{10}$$

求得电磁方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}B_1}{\mathrm{d}t}=\dfrac{lf(B_3)NZ+NN_1U_{\text{A}}-lf(B_2)N_1Z-lf(B_1)N_1(R+Z)}{AN^2N_1}\\ \dfrac{\mathrm{d}B_2}{\mathrm{d}t}=\dfrac{lf(B_3)NZ+NN_1U_{\text{A}}-lf(B_2)N_1Z-lf(B_1)N_1(R+Z)}{AN^2N_1}\\ \dfrac{\mathrm{d}B_3}{\mathrm{d}t}=\dfrac{N_1l(R_1-Z)[f(B_1)+f(B_2)]+lf(B_3)NZ}{AN^2N_1}\end{cases} \tag{11}$$

磁控变压器的输出电压为

$$U_{\text{out}}=\frac{N_1l[f(B_1)+f(B_2)]-lf(B_3)N}{NN_2}Z \tag{12}$$

3 新型磁控变压器的仿真分析

3.1 联合仿真的建立

Ansys 作为一款有限元分析软件，相较于 MATLAB 仿真软件，可以对一些复杂结构的物体进行建模仿真，并对其材料属性进行不同参数的设置，进而得出更接近实物的数据。本文在 Maxwell 中对磁控变压器进行了二维建模，如图 4 所示，主要设计参数见表 1。此外利用 Maxwell 自适应剖分对仿真模型的各个部分进行网格剖分，仿真模型中铁心材料属性设置为拟定的 M-4-30 硅钢片，绕组属性设为铜材料，其余外边界设置为 Ballon 边界条件[21]。

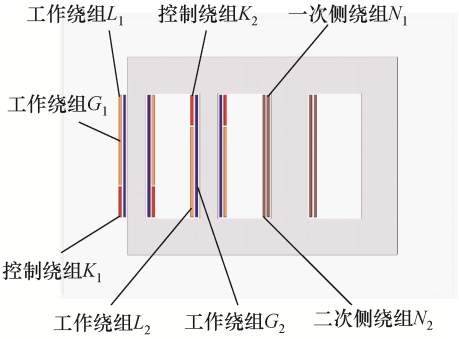


图 4 磁控变压器二维模型

Fig. 4 2D model of magnetron transformer

表 1 磁控变压器模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of magnetron transformer model

部件		参数		
		长	高	厚
铁心	铁心柱 1/mm	100	700	300
	铁心柱 2/mm	100	700	300
	铁心柱 3/mm	200	700	300
	旁轭/mm	200	700	300
	上下铁轭/mm	200	200	300
		长	高	
绕组	工作绕组 L_g/mm	15	502.5	
	控制绕组 L_k/mm	15	167.5	
	一、二次侧绕组/mm	15	680	
	匝数	$G_1=G_2=800$，$K_1=K_2=400$ $L_1=L_2=1\,000$ $N_1=2\,100$，$N_2=120$		
	厚度/mm	15		
	距铁心柱间距/mm	10		
	绕组间距/mm	10		

Simplorer 具有丰富的电力电子器件，可实现多物理域模型的无缝集成，被应用于多领域的建模仿真分析。在 Simplorer 中导入建好的 Maxwell 二维模型，二维模型联合仿真外电路如图 5 所示。输入电压 E_1 为有效值 10 kV 的理想交流电压源，基波频率 f=50 Hz，系统参数 L_1=5 mH，R=0.01 Ω，负载 Z=0.4 Ω，V_{M1} 为负载两端的电压。TR 设置为：仿真时间 2 s，仿真步长 1 ms。

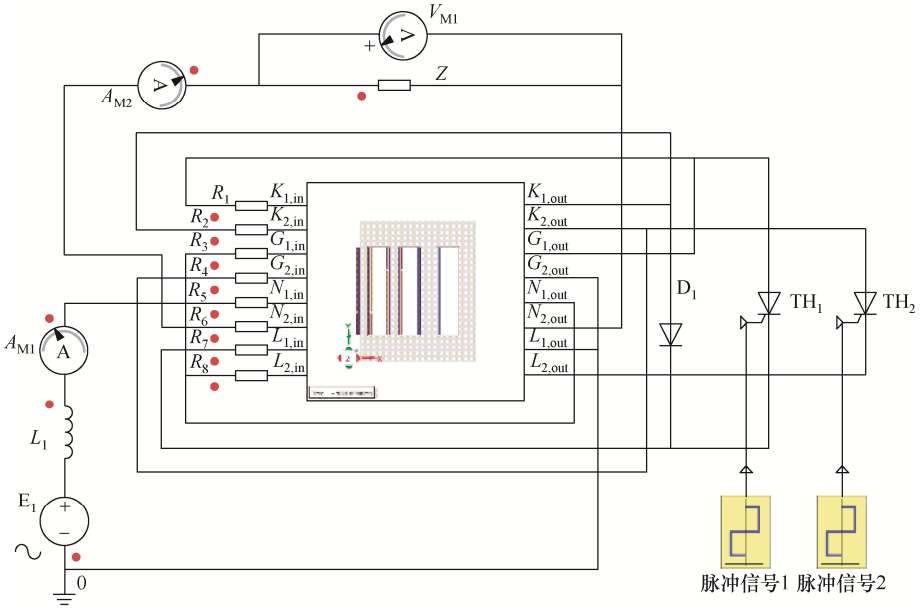
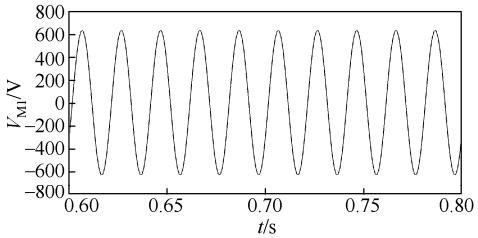


图 5　二维模型联合仿真接线

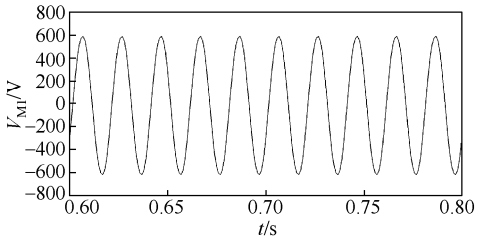
Fig. 5 Co-simulation wiring of 2D model

3.2　输出电压特性分析

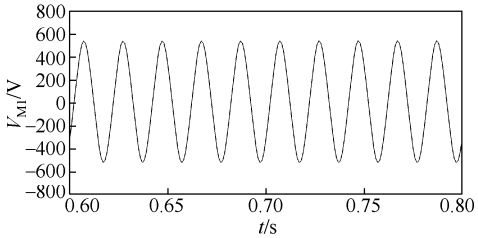
磁控变压器输出电压波形如图 6 所示，当磁控变压器处于工作状态时，随着触发角的增大，输出电压不断减小。将得到的输出电压数据导入到 MATLAB/Simulink 中进行傅里叶分析，由此得到晶闸管不同触发角下磁控变压器的输出电压谐波



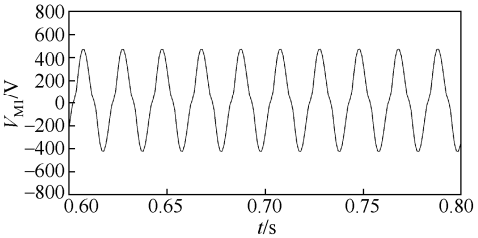
(a)触发角为0°



(b)触发角为36°



(c)触发角为90°



(d)触发角为108°

图 6　各触发角下输出电压波形

Fig. 6 Waveform of output voltage at each trigger angle

含量见表 2，其中 U_{THD} 为输出电压总谐波畸变率。从表 2 可以看出触发角越大，磁控变压器在 1 个工频周期内的磁饱和时间越短，磁导率μ变化越大，使得电抗器的电抗值呈非正弦规律变化，输出电压

谐波含量越高。

表 2 磁控变压器输出电压的有效值及谐波含量

Tab. 2 RMS and harmonic content of output voltage from magnetron transformer

α/(°)	U_Z/V	U_{THD}/%	3 次/%	5 次/%	7 次/%
0	442.7	0.59	0.54	0.16	0.12
36	439.6	0.54	0.43	0.20	0.20
72	412.4	2.57	2.51	0.51	0.04
90	377.4	2.29	2.18	0.47	0.43
94	360.3	4.86	4.02	3.42	0.58
108	317.8	14.01	13.25	4.32	1.42

本文设计的磁控变压器额定电压为单相 10 kV/0.4 kV，调压范围为±10%，输出电压有效值为 360.3~442.7 V，晶闸管触发角为 0~94°。磁控变压器在此工作条件下可实现对输出电压连续平滑地调节，谐波含量低于 5%。

3.3 响应特性分析

在图 5 的主电路基础上对晶闸管触发脉冲部分增加动态变换控制电路，如图 7 所示。控制电路中 TH_1 和 TH_3 为一组，TH_2 和 TH_4 为一组，根据磁控变压器的工作原理可知每组各个晶闸管触发角之间相差 180°。在初始状态下，设置触发模块 $PULSE_1$ 和 $PULSE_3$ 触发角为 90° 和 270°，分别触发晶闸管 TH_1、TH_3。将延迟模块 DELAY 设置为 0.6 s 延迟，即当磁控变压器工作到 0.6 s 时，通过延迟模块 DELAY 和常量模块 CONST 配合单刀双掷开关 TS_1 和 TS_2，接通晶闸管 TH_2、TH_4，设置触发模块 $PULSE_2$ 和 $PULSE_4$ 触发角为 36° 和 216° 来触发晶闸管 TH_2 和 TH_4。

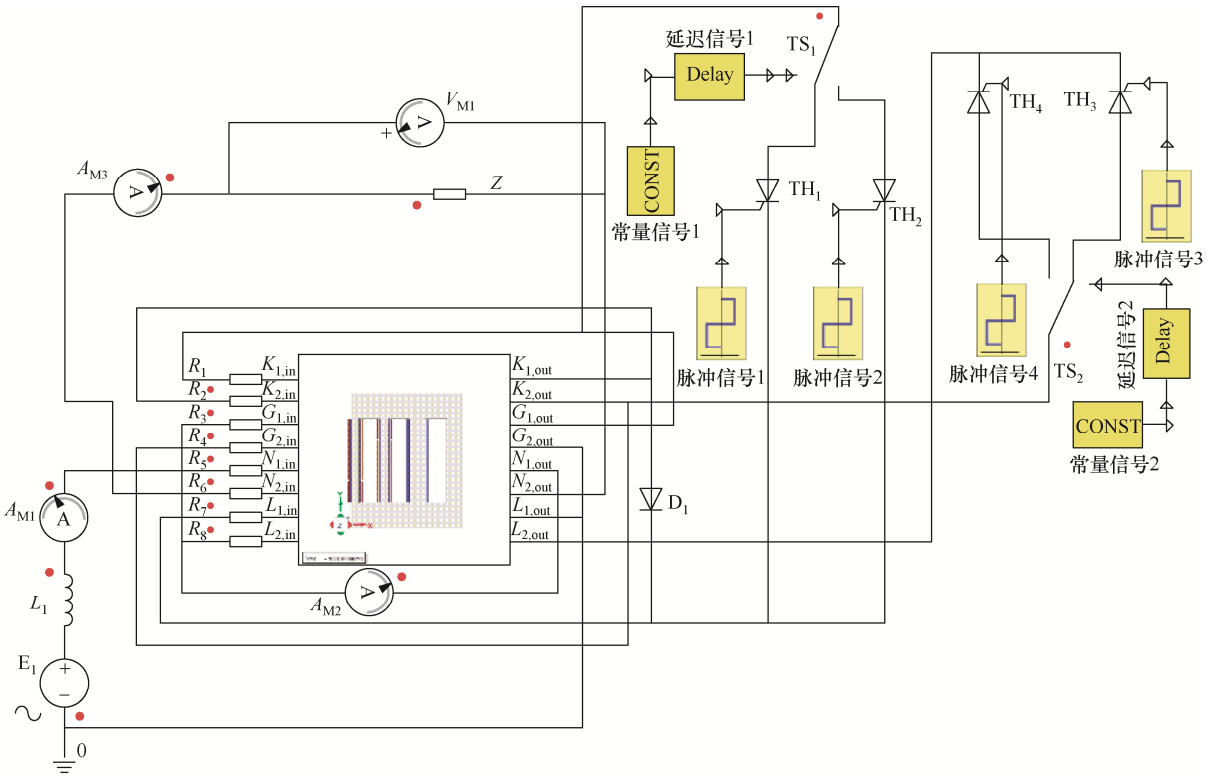
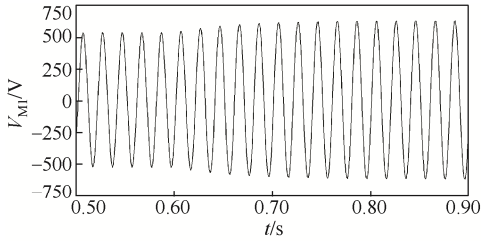


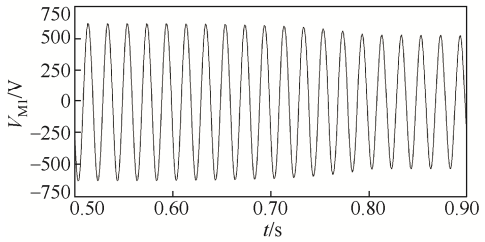
图 7 动态变换控制电路

Fig. 7 Dynamic transformation control circuit

同理，在初始状态下，设置相对应的参数，当磁控变压器工作到 0.6 s 时，使晶闸管(TH_1、TH_3)与(TH_2、TH_4)触发角由 18° 到 90° 跳变。进行输出电压由高到低的动态特性分析，观察输出电压的变化情况，如图 8 所示。可以看出，当晶闸管触发角分别由 90° 切换到 36° 和由 18° 切换到 90° 时，磁控变压器在 100~200 ms 内可以实现对负载的动态补偿，电压很快达到稳定状态。



(a)触发角由90°切换到36°



(b)触发角由18°切换到90°

图 8　输出电压动态变化波形

Fig. 8 Waveforms of output voltage changing dynamically

4　结语

本文针对传统有载调压存在的一些不足，介绍了 1 种新型磁控变压器结构，将磁控电抗器与变压器结合在 1 个结构上，不仅可以实现磁控电抗器动态调节无功的作用，还可以实现调压功能。结合磁控电抗器可变电抗的特性，调节晶闸管触发角在 0° 到 94° 之间，磁控变压器可以实现降压功能，调压范围为±10%。相较于传统的有载调压变压器而言，磁控变压器可以实现输出电压连续平滑地调节，精度比较高，同时磁控变压器无机械部件，电力电子器件少，结构简单，可在成本较低的同时实现无弧有载调压。单相四柱式结构右旁轭可为交流磁通提供回路，减少了电压谐波含量，提高了电压稳定性。通过对本文提出的新型磁控变压器拓扑结构的工作特性进行仿真分析，验证了模型的合理性，可为今后发展更多结构的磁性变压器提供理论参考。

参考文献：

[1] 裴玮, 盛鹃, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.

Pei Wei, Sheng Kun, Kong Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157. (in Chinese)

[2] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.

Liu Yingying, Feng Dandan, Lin Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176. (in Chinese)

[3] 赵玉林, 李海凤, 牛泽晗, 等. 配电变压器无触点有载自动调压的一种新方案[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3888-3893.

Zhao Yulin, Li Haifeng, Niu Zehan, et al. A new scheme of contactless on-load automatic voltage regulation for distribution transformers [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3888-3893. (in Chinese)

[4] 宋祺鹏, 王继东, 吴艳敏, 等. 静态无弧有载自动调压配电变压器研究与实现[J]. 变压器, 2022, 59(1): 45-49, 53, 21.

Song Qipeng, Wang Jidong, Wu Yanmin, et al. Research and implementation of static arcless OLTC transformer [J]. Transformer, 2022, 59(1): 45-49, 53, 21. (in Chinese)

[5] 张国强, 李庆民, 赵彤. 电力变压器有载分接开关机械性能的监测与诊断技术[J]. 变压器, 2005, 42(9): 33-37.

Zhang Guoqiang, Li Qingmin, Zhao Tong. Monitoring and diagnostic techniques for machanical properties of on-load tap-changers in power transfomer [J]. Transformer, 2005, 42(9): 33-37. (in Chinese)

[6] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187.

Wang He, Luan Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187. (in Chinese)

[7] 赵玉林, 宋伟. 配电变压器无触点有载调压中反并联晶闸管光纤触发方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 97-101.

Zhao Yulin, Song Wei. Optical trigger scheme of inverse-

parallel thyristor in contactless on-load tap-changing voltage for distribution transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 97-101. (in Chinese)

[8] 陈朋, 李磊, 颜世凯. 基于电力电子器件的配电变压器有载调压技术研究[J]. 变压器, 2021, 58(2): 30-35.
Chen Peng, Li Lei, Yan Shikai. Research on on-load tap-changing technology of distribution transformer based on power electronic devices [J]. Transformer, 2021, 58(2): 30-35. (in Chinese)

[9] 胡小换. 磁控调压器及其仿真研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
Hu Xiaohuan. Magnetic controllable voltage regulator and its simulation research [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese)

[10] 陈磊磊, 谢卫, 王文会, 等. 新磁阀结构磁控电抗器磁损特性研究[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 195-202.
Chen Leilei, Xie Wei, Wang Wenhui, et al. Research on magnetic loss characteristics of magnetic controllable reactor with novel magnetic valve structure [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 195-202. (in Chinese)

[11] 田铭兴, 陈华泰, 杨秀川, 等. 基于饱和变压器的磁饱和式可控电抗器分析[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 705-708.
Tian Mingxing, Chen Huatai, Yang Xiuchuan, et al. Analysis of magnetically-saturated controllable reactor based on saturation transformer [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 705-708. (in Chinese)

[12] 袁剑, 田翠华, 田成, 等. 新型磁控电抗器快速响应技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 166-170.
Yuan Jian, Tian Cuihua, Tian Cheng, et al. Fast response technology of MCR [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 166-170. (in Chinese)

[13] 敬佩, 田铭兴, 张慧英. 他励式磁控电抗器的响应速度改善研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 94-98.
Jing Pei, Tian Mingxing, Zhang Huiying. Study on response speed improvement of separate excitation magnetically controlled reactor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 94-98. (in Chinese)

[14] 赵国生, 孙彬, 李培, 等. 基于 Simplorer 与 Maxwell 的磁控电抗器特性仿真分析[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 91-95.
Zhao Guosheng, Sun Bin, Li Pei, et al. Simulation analysis of magnetically controlled reactors characteristic based on Simplorer and Maxwell [J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 91-95. (in Chinese)

[15] 李思楠, 高金峰. 基于 Ansoft Maxwell 与 Simplorer 的磁控电抗器建模方法研究[J]. 电气传动, 2020, 50(11): 122-128.
Li Sinan, Gao Jinfeng. Research on modeling method of the MCR based on Ansoft Maxwell and Simplorer [J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 122-128. (in Chinese)

[16] 田铭兴, 励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 64-67.
Tian Mingxing, Li Qingfu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 64-67. (in Chinese)

[17] 付勉, 刘志涵, 宋振浩, 等. 配电网络电能质量综合治理设备优化配置策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 336-344.
Fu Mian, Liu Zhihan, Song Zhenhao, et al. Optimal allocation strategy for comprehensive control equipment of power quality in distribution area [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 336-344. (in Chinese)

[18] 赵国生, 张高升. 新型混合型磁控电抗器的特性研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 37-44.
Zhao Guosheng, Zhang Gaosheng. Characteristic research on a novel hybrid magnetically controlled reactor [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 37-44. (in Chinese)

[19] 赵国生, 孙可钦, 姚珂. 基于新型磁控电抗器的静止无功补偿装置[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(6): 75-78, 91.
Zhao Guosheng, Sun Keqin, Yao Ke. Static reactive compensation device based on the novel magnetic controllable reactor [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(6): 75-78, 91. (in Chinese)

[20] 陈绪轩, 田翠华, 陈柏超, 等. 多级饱和磁阀式可控电

抗器谐波分析数学模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 57-64.
Chen Xuxuan, Tian Cuihua, Chen Baichao, et al. Mathematical model for harmonics analysis of the multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 57-64. (in Chinese)

[21] 张高升. 新型磁控电抗器的特性研究与分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
Zhang Gaosheng. Research and analysis on the characteristics of new magnetic control reactor [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)



赵国生

作者简介：

赵国生(1965—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力电子与磁控电抗器。E-mail：zgs410@126.com。

高权威(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与磁控变压器。E-mail：1285479405@qq.com。

郑晓雷(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与磁控调压器。E-mail：877545118@qq.com。

潘俊鹏(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与磁控调压器。E-mail：Panjp1995@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)

关于《电源学报》2024 年度优秀论文的表彰(二)

标题	所有作者 (标*为通信作者)	作者单位	刊期信息	详细信息
锁相并网设备的独立激励-响应机制及基于幅频运动方程的设备特性表征方法	袁小明, 王思成*, 贠阳阳	华中科技大学电气与电子工程学院	2024,22(5):1-14	
考虑非线性阻尼效应的孤岛微电网暂态稳定性分析及提升策略研究	唐英杰, 查晓明, 田震*, 李翼翔, 胡宇飞, 万子镜	武汉大学电气与自动化学院	2024,22(5):182-192	
一种采用柔性缓冲垫块的双面散热 SiC MOSFET 双向开关模块研究	李靖[1], 曹君临[1,2], 陆国权[3], 梅云辉[2*]	1.天津大学材料科学与工程学院 2.天津工业大学电气工程学院 3.美国弗吉尼亚理工大学电气与计算机科学系	2024,22(1):140-146	
基于分裂-叠加结构的部分功率主动调控型准单级直流变换方法	侍良东[1], 程钰杰[1,2], 杨帆[3], 吴红飞[1*]	1.南京航空航天大学自动化学院 2.南京电子器件研究所 3.南京邮电大学自动化学院	2024,22(2):98-105	
基于一种新型导通压降采样电路的 IGBT 器件结温在线监测方法	赵蕤, 杨柯欣, 唐涛, 宋文胜*	西南交通大学电气工程学院	2024,22(6):295-303	

《电源学报》对优秀论文及其作者表示热烈祝贺！