

大功率忆阻器的实现方法及应用

陈艳峰, 丘东元, 张 波, 袁昌海, 谭斌冠, 卢日海, 韦兆华  
(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 由于纳米尺度的忆阻器件不能直接用于电路研究, 目前仍通过搭建等效电路的方法实现忆阻元件的功能。有别于采用模拟器件的忆阻器等效电路模型, 本文提出了几种基于电力电子变换器的大功率忆阻器实现方法, 这些方法的共同特点是电路模型的功率等级由功率半导体器件参数决定。接着, 本文制作了一台磁控型忆阻器原理样机, 仿真和实验结果证明该忆阻器电路模型具有功率调节范围大、忆阻特性易于调整等优点。最后, 本文探讨了忆阻器在直流断路器等大功率场合的应用, 为拓展忆阻器今后的应用提供了参考。

**关键词:** 忆阻器; 电路模型; 功率半导体器件; 直流断路器

**DOI:** 10.12067/ATEEE1903009      **文章编号:** 1003-3076(2019)05-0005-08      **中图分类号:** TN60

1 引言

1971年, 华裔科学家蔡少棠教授发现在电压、电流、电荷和磁通量四种基本电量之间, 缺失了电荷与磁通量之间的关系, 如图1所示。根据电路完备性原理, 蔡教授论证了除电阻、电容、电感之外第四种基本电路元件忆阻器的存在, 并将忆阻  $M$  和忆导  $W$  分别定义为<sup>[1]</sup>:

$$M(q) = d\phi(q)/dq = v(t)/i(t) \tag{1}$$

$$W(\phi) = dq(\phi)/d\phi = i(t)/v(t) \tag{2}$$

式中,  $q$  为电荷量,  $q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$ ;  $\phi$  为磁通量,  $\phi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau$ 。

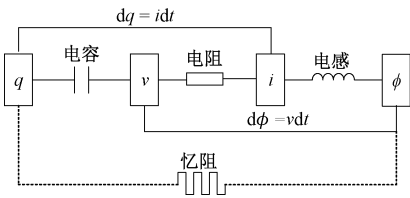


图1 四种基本电路元素的关系

Fig. 1 Relationship of four fundamental circuit elements

满足式(1)的元件被称为荷控型忆阻器, 满足式(2)则为磁控型忆阻器。当磁通  $\phi(t)$  和电荷

$q(t)$  呈线性关系时, 有  $M(q) = R$  或  $W(\phi) = G$ 。

由于一直没有在现实中找到符合忆阻器特性的物理器件, 所以忆阻器提出后并没有引起广泛的关注。直到2008年, 惠普公司首次在实验室中成功地制作出忆阻元件<sup>[2,3]</sup>, 激发了国内外学者的研究兴趣。由于忆阻器具有随时间记忆的电阻特性, 近十年来, 忆阻器的研究主要集中在非线性电路<sup>[4,5]</sup>、逻辑和存储器件<sup>[6,7]</sup>、神经网络<sup>[8-10]</sup>等方面。

然而, 惠普公司生产的忆阻元件属于纳米尺度的器件, 不能直接用于电路研究, 目前主要通过搭建等效电路的方式实现忆阻器的功能。如果一个电路的输入电压和输入电流满足式(1)或式(2)所描述的关系, 那么该电路可等效为一个荷控型或磁控型忆阻器。常见的忆阻器电路模型由运算放大器、模拟乘法器等模拟元件构成<sup>[11-13]</sup>, 即使在采用微控制器的忆阻器实现方案<sup>[14-16]</sup>中, 模数、数模转换器也是必不可少的。由于这些有源元件的功率通常为毫瓦级, 因此上述忆阻器模型仅限于小功率应用场合。

针对现有忆阻器等效电路模型功率等级低的问题, 有必要提出新的电路模型来提高忆阻器等效电路的功率等级。为此, 本文基于功率半导体器件, 研究了几种大功率忆阻器的实现方法, 为探讨大功率忆阻器在大功率场合的应用提供了理论基础。

收稿日期: 2019-03-05  
基金项目: 广东省自然科学基金团队项目(2017B030312001)  
作者简介: 陈艳峰(1970-), 女, 湖南籍, 教授, 博导, 博士, 研究方向为电力电子变换器的建模与稳定性分析;  
丘东元(1972-), 女, 广东籍, 教授, 博导, 博士, 研究方向为电力电子装置与系统及其可靠性(通讯作者)。

## 2 大功率忆阻器的电路模型

### 2.1 基于受控电压源的忆阻器

文献[17]提出了一种基于受控电压源的忆阻器等效电路。如图2(a)所示,忆阻器的电路模型是由一个受控电压源  $v_c$  和一个固定电阻  $R$  串联而成,控制电压  $v_c$  使得输入电压  $v_{in}$  和输入电流  $i_{in}$  满足荷控型忆阻器的定义,即有:

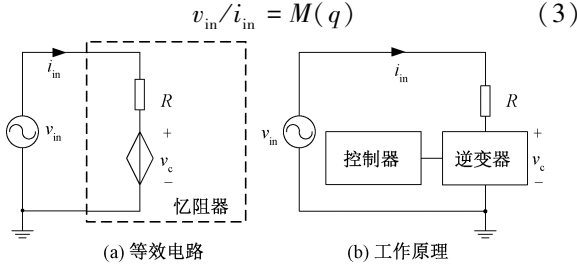


图2 基于受控电压源的忆阻器等效电路模型

Fig.2 Circuit model of controlled voltage source based memristor

对于荷控型忆阻器,图2(a)的荷控型受控电压源需满足:

$$\begin{aligned} v_{cq} &= v_{in} - Ri_{in} = v_{in} - R \frac{v_{in}}{M(q)} \\ &= v_{in} \left[ 1 - \frac{R}{M(q)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

同理,对于磁控型忆阻器,输入电流和电压的关系为:

$$i_{in}/v_{in} = W(\phi) \quad (5)$$

相应地,图2(a)的磁控型受控电压源需满足:

$$v_{c\phi} = v_{in} - Ri_{in} = v_{in} [1 - RW(\phi)] \quad (6)$$

如果用一个电压源型逆变器作为受控电压源,如图2(b)所示,则整个忆阻器电路模型的功率等级主要由逆变器决定。采用PWM控制技术,令逆变器的输出电压跟随由式(4)或式(6)定义的指令信号,从而实现不同类型的忆阻器特性。

### 2.2 基于可变电阻的忆阻器

文献[18]提出了一种基于可变电阻的忆阻器等效电路。如图3所示,该电路包括无源低通滤波器、由电阻和功率开关管构成的可变电阻<sup>[19]</sup>。

开关S导通时,可变电阻等效为  $R_{on} = \frac{RR_1}{R + R_1}$ ;

当S关断时,可变电阻等效为  $R_{off} = \frac{R(R_1 + R_2)}{R + R_1 + R_2}$ 。

对输入电压  $v_{in}$  采样并积分,得到磁通信号  $v_\phi$ :

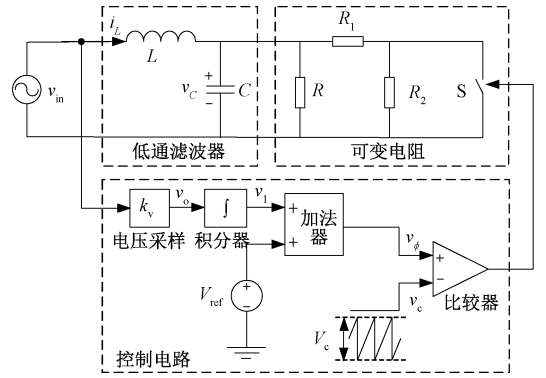


图3 基于可变电阻的忆阻器等效电路模型

Fig.3 Circuit model of variable resistor based memristor

$$v_\phi = V_{ref} + k_v k_i \int v_{in} dt = V_{ref} + k_v k_i \phi(t) \quad (7)$$

式中,  $V_{ref}$  为控制电路中参考电压的幅值;  $k_v$  为采样系数;  $k_i$  为积分系数。

将磁通信号  $v_\phi$  与三角载波  $v_c$  进行比较,得到开关S的驱动信号。选择合适的电路参数,使得  $1/(\omega C) \gg R_1, R_2 \gg \omega L, R_{off} \gg R_{on}$ 。当载波比足够大时,一个载波周期  $T$  内电感电流的平均值为:

$$i_L = v_{in} [G_1 + G_2 \phi(T)] \quad (8)$$

式中,系数  $G_1, G_2$  与电路参数有关,由式(9)确定:

$$\begin{cases} G_1 = \frac{\left(\frac{1}{2} - \frac{V_{ref}}{V_c}\right) R_{on} + \left(\frac{1}{2} + \frac{V_{ref}}{V_c}\right) R_{off}}{R_{on} R_{off}} \\ G_2 = \frac{k_v k_i}{V_c} \frac{R_{on} - R_{off}}{R_{on} R_{off}} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $V_c$  为三角载波的峰峰值。

可见,该电路模型的输入电流即电感电流和输入电压的关系可表示为:

$$\frac{i_{in}}{v_{in}} = G_1 + G_2 \phi(t) \quad (10)$$

显然式(10)满足磁控型忆阻器的忆导定义,即图3所示电路等效于一个磁控型忆阻器,电路模型的功率和忆阻特性由电路元件的功率等级及其参数大小决定。

### 2.3 基于不可控整流器的忆阻器

文献[20]提出了一种基于不可控整流器的忆阻器等效电路。如图4所示,该电路由一个输入低通滤波器和一个不可控桥式整流电路构成。

假设所有二极管特性一致,根据基尔霍夫电压定律,该电路模型的输入电压为:

$$v_{in} = L \frac{di_L}{dt} + v_{R2} + 2v_D \quad (11)$$

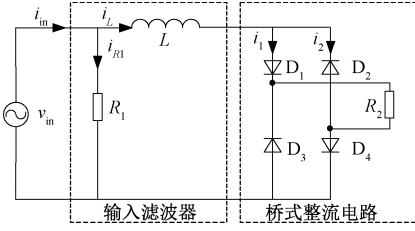


图4 基于不可控整流器的忆阻器等效电路

Fig. 4 Circuit model of uncontrollable rectifier based memristor

式中,  $i_L$  为流过滤波电感  $L$  的电流;  $v_{R2}$  为负载  $R_2$  的电压;  $v_D$  为二极管的正向压降。

根据基尔霍夫电流定律, 输入电流为:

$$i_{in} = i_{R1} + i_L = \frac{v_{in}}{R_1} + i_L \quad (12)$$

已知二极管电流  $i_D$  和两端电压  $v_D$  之间的关系为:

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{U_T}} - 1) \quad (13)$$

式中,  $U_T$  为温度的电压当量;  $I_S$  为反向饱和电流。

由于  $i_L = i_D$ , 将式(11)代入式(13), 图4中二极管电流由式(14)决定:

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_{in} - L \frac{di_D}{dt} - R_2 i_D}{2U_T}} - 1) \quad (14)$$

因此, 输入电流与输入电压的关系表示为:

$$\frac{i_{in}}{v_{in}} = \frac{1}{R_1} + \frac{i_D}{v_{in}} = \frac{1}{R_1} + \frac{I_S}{v_{in}} (e^{\frac{v_{in} - L \frac{di_D}{dt} - R_2 i_D}{2U_T}} - 1) \quad (15)$$

选择合适的电路参数, 可以发现该电路的输入电流和电压关系符合磁控型忆阻器的定义。显然, 该忆阻器模型的功率由不可控整流电路决定, 而忆阻特性由所选择的电路参数大小决定。

## 2.4 基于多倍压整流器的忆阻器

文献[21]利用二极管的受控源特性和电容的积分特性, 提出了一种基于倍压整流电路的忆阻器等效电路。如图5所示, 该电路由若干相同的子模块首尾相接组成, 每个子模块由一个二极管和一个电容串联而成。考虑两个子模块, 即采用二倍压整流电路时, 二极管  $D_1$ 、 $D_2$  的电压为:

$$\begin{cases} v_{D1} = v_{in} - v_{C1} \\ v_{D2} = v_{C1} - v_{C2} - v_{in} \end{cases} \quad (16)$$

根据二极管的端电压和电流之间的关系, 即式(13), 可得:

$$i_{in} = i_1 + i_2 = I_S (e^{\frac{v_{in} - v_{C1}}{U_T}} - e^{\frac{v_{C1} - v_{C2} - v_{in}}{U_T}}) \quad (17)$$

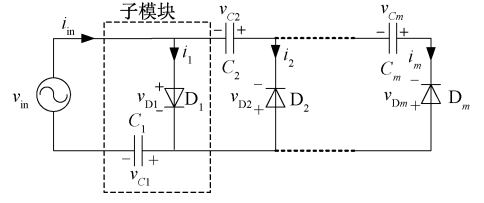


图5 基于多倍压整流器的忆阻器等效电路

Fig. 5 Circuit model of voltage multiplying rectifier based memristor

对式(17)中的指数函数进行泰勒展开, 得:

$$i_{in} = I_S \left[ e^{\frac{-v_{C1}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^n}{U_T^n n!} - e^{\frac{v_{C1} - v_{C2}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^n}{(-U_T)^n n!} \right] \quad (18)$$

从式(18)可得该电路的输入电流和输入电压关系为:

$$\frac{i_{in}}{v_{in}} = I_S \left[ e^{\frac{-v_{C1}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^{n-1}}{U_T^n n!} - e^{\frac{v_{C1} - v_{C2}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^{n-1}}{(-U_T)^n n!} \right] \quad (19)$$

选择合适的电路参数, 可以发现该电路的输入电流和电压关系同样符合磁控型忆阻器的定义。此外, 当采用  $m$  个子模块级联时, 也可以获得类似的忆阻特性。显然, 该等效电路模型的功率和忆阻特性分别由电路元件的功率等级及其参数大小决定。

## 2.5 基于二极管和电容串并联的忆阻器

文献[22]提出了一种基于二极管和电容串并联结构的忆阻器等效电路。如图6所示, 该电路包含反并联的两条支路, 每条支路均由二极管和电容串联而成。二极管  $D_1$  和  $D_2$  的电压分别为:

$$\begin{cases} v_{D1} = v_{in} - v_{C1} \\ v_{D2} = -v_{C2} - v_{in} \end{cases} \quad (20)$$

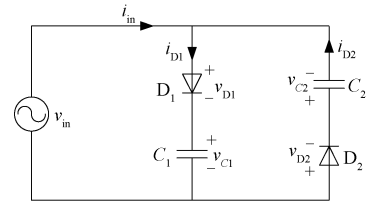


图6 基于二极管和电容串并联的忆阻器等效电路

Fig. 6 Circuit model of diode and capacitor's parallel connection based memristor

根据二极管的特征方程式(13), 输入电流可表示为:

$$i_{in} = i_{D1} - i_{D2} = I_S (e^{\frac{-v_{C1} + v_{in}}{U_T}} - e^{\frac{-v_{C2} - v_{in}}{U_T}}) \quad (21)$$

对式(21)中的指数函数进行泰勒展开,得到:

$$i_{in} = I_s \left[ e^{\frac{-v_{C1}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^n}{U_T^n n!} - e^{\frac{-v_{C2}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^n}{(-U_T)^n n!} \right] \quad (22)$$

从式(22)可得,该电路的输入电流和输入电压关系为:

$$\frac{i_{in}}{v_{in}} = I_s \left[ e^{\frac{-v_{C1}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^{n-1}}{U_T^n n!} - e^{\frac{-v_{C2}}{U_T}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{in}^{n-1}}{(-U_T)^n n!} \right] \quad (23)$$

类似基于多倍压整流电路的忆阻器电路模型,选择合适的电路参数,图6所示电路的输入电流和电压关系将符合磁控型忆阻器的定义。

### 3 大功率磁控型忆阻器模型的验证

本节将选取2.1节提供的基于受控电压源忆阻器模型,构造一个磁控型忆阻器电路,并进行仿真和实验验证。

#### 3.1 基于受控电压源忆阻器的工作原理

参考忆阻器在文献[2]中的表述,忆阻  $M(q)$  和忆导  $W(\phi)$  分别表示为:

$$M(q) = R_0 + k_q q \quad (24)$$

$$W(\phi) = G_0 + k_\phi \phi \quad (25)$$

式中,  $R_0$ 、 $k_q$ 、 $G_0$ 、 $k_\phi$  均为常数。

根据式(4)和式(6),荷控型和磁控型受控电压源的输出电压需分别满足:

$$v_{cq} = v_{in} \left( 1 - \frac{R}{R_0 + q} \right) = v_{in} \left( 1 - \frac{1}{\frac{R_0}{R} + \frac{k_q}{R} q} \right) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} v_{c\phi} &= v_{in} [1 - R(G_0 + k_\phi \phi)] \\ &= v_{in} [1 - (RG_0 + Rk_\phi \phi)] \end{aligned} \quad (27)$$

式中,电荷量  $q$  可通过对输入电流  $i_{in}$  积分获得;磁通量  $\phi$  可通过对输入电压  $v_{in}$  积分得到。

本文采用一个单相全桥逆变器作为受控电压源,如图7所示。  $V_{DC}$  为逆变器的输入直流电压,  $S_1 \sim S_4$  为功率开关管,  $L_f$  和  $C_f$  组成一个低通滤波器。

根据双极性 PWM 控制方法,将逆变器输出电压  $v_o$  的基波成分  $v_c$  视为所需的控制电压,且与调制信号  $v_r$  成比例,即

$$v_c = \zeta v_r \quad (28)$$

式中,  $\zeta$  为幅值放大系数,  $\zeta = V_{DC}/V_{tri}$ ,  $V_{tri}$  为三角载波  $v_{tri}$  的幅值。

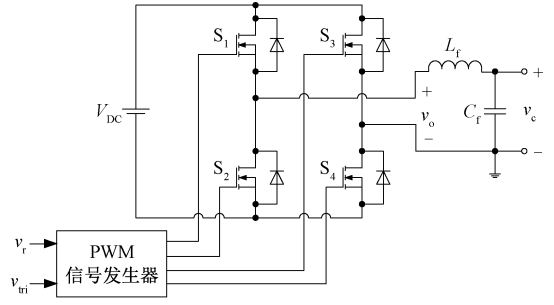


图7 一种受控电压源拓扑

Fig. 7 Topology of a controlled voltage source

由上述分析可见,若设计调制信号  $v_r$  使得  $v_c = \zeta v_r = v_{c\phi}$  时,则逆变器将呈现磁控型受控源特性,模型的输入电压、电流将满足磁控型忆阻器的定义。

#### 3.2 磁控型忆阻器的实现方案

磁控型受控电压源的调制信号生成原理如图8所示,其工作原理概述如下。

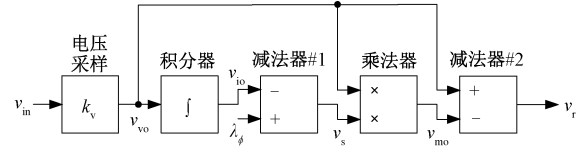


图8 磁控型受控电压源调制信号生成原理图

Fig. 8 Schematic for modulation signal of flux-controlled voltage source

首先,输入电压  $v_{in}$  经过采样系数为  $k_v$  的电压采样器,得到输入电压采样信号  $v_{vo}$  为:

$$v_{vo} = k_v v_{in} \quad (29)$$

对电压采样信号进行积分,获得磁通量,积分器的输出电压信号  $v_{io}$  为:

$$v_{io} = k_i \int v_{vo} dt = k_i k_v \int v_{in} dt = k_i k_v \phi \quad (30)$$

根据式(27),先对  $v_{io}$  进行偏置处理,即将  $v_{io}$  与一个常值  $\lambda_\phi$  相减,则减法器#1 输出电压信号  $v_s$  为:

$$v_s = \lambda_\phi - v_{io} = \lambda_\phi - k_i k_v \phi \quad (31)$$

然后  $v_s$  与电压采样信号  $v_{vo}$  经过乘法器相乘得到  $v_{mo}$ :

$$v_{mo} = k_v v_{in} (\lambda_\phi - k_i k_v \phi) \quad (32)$$

最后  $v_{mo}$  与  $v_{vo}$  经过减法器#2 得到所需要的调制信号  $v_r$ :

$$v_r = k_v v_{in} (1 - \lambda_\phi + k_i k_v \phi) \quad (33)$$

根据式(28),逆变器的输出电压基波分量为:

$$v_c = \zeta k_v v_{in} (1 - \lambda_\phi + k_i k_v \phi) \quad (34)$$

当满足  $\zeta = 1/k_v$  时,有:

$$v_c = v_{in} (1 - \lambda_\phi + k_i k_v \phi) \quad (35)$$



此时输入电流  $i_{in}$  为:

$$i_{in} = \frac{v_{in} - v_c}{R} = \frac{v_{in}(\lambda_\phi - k_i k_v \phi)}{R} \tag{36}$$

则磁控型忆阻器的忆导表示为:

$$W(\phi) = \frac{i_{in}}{v_{in}} = \frac{\lambda_\phi}{R} - \frac{k_i k_v}{R} \phi \tag{37}$$

因此,合理选择  $\lambda_\phi$ 、 $k_v$ 、 $k_i$  和  $R$  的大小可以得到不同特性的磁控型忆阻器。

3.3 仿真验证

为了验证 3.2 节大功率磁控型忆阻器的实现方案,本节采用 PSIM 软件进行了仿真验证。假设输入电压是一个正弦信号  $v_{in} = V_{in}\sin(2\pi ft)$ , 根据式 (37) 可得忆导值为:

$$\begin{aligned} W(\phi) &= \frac{\lambda_\phi - k_i k_v \int_0^T V_{in} \sin(2\pi ft) dt}{R} \\ &= \frac{\lambda_\phi}{R} - \frac{k_i k_v V_{in}}{2\pi f R} + \frac{k_i k_v V_{in}}{2\pi f R} \cos(2\pi ft) \end{aligned} \tag{38}$$

同时,忆阻器模型的功率计算如下:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{in} i_{in} dt = \frac{1}{T} \int_0^T W(\phi) v_{in}^2 dt \\ &= \frac{V_{in}^2}{R} \left( \frac{\lambda_\phi}{2} - \frac{k_i k_v V_{in}}{4\pi f} \right) \end{aligned} \tag{39}$$

为了验证该大功率忆阻器模型,选择了 5 组不同的仿真参数,如表 1 所示。

表 1 大功率磁控型忆阻器模型各组仿真参数

Tab. 1 Different simulation parameters of high-power flux-controlled memristor model

参数	数值				
	#1	#2	#3	#4	#5
$V_{in}/V$	100	100	80	100	100
$f/Hz$	50	20	50	50	50
$R/\Omega$	100	100	100	100	100
$V_{DC}/V$	100	100	100	100	100
$L_t/mH$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$C_t/\mu F$	20	100	20	20	20
$f_s/kHz$	10	4	10	10	10
$V_{tri}/V$	1	1	1	1	1
$\lambda_\phi$	2	2	2	1	2
$k_v$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$k_i$	100	100	100	100	250
$P/W$	84.1	60.2	55.9	34.1	60.2

注:参数  $P$  的计算结果基于式 (39)。

采用#1 组仿真参数,调制信号  $v_r$  和受控电压源  $v_c$  的仿真波形如图 9(a) 所示,两者波形一致。由于

$\zeta=100$ ,显然  $v_c$  的幅值是  $v_r$  的 100 倍。5 组不同仿真参数对应的输入电压  $v_{in}$  和输入电流  $i_{in}$  波形分别如图 9(b)~图 9(f) 所示,可见,仿真结果均满足磁控型忆阻器的定义。

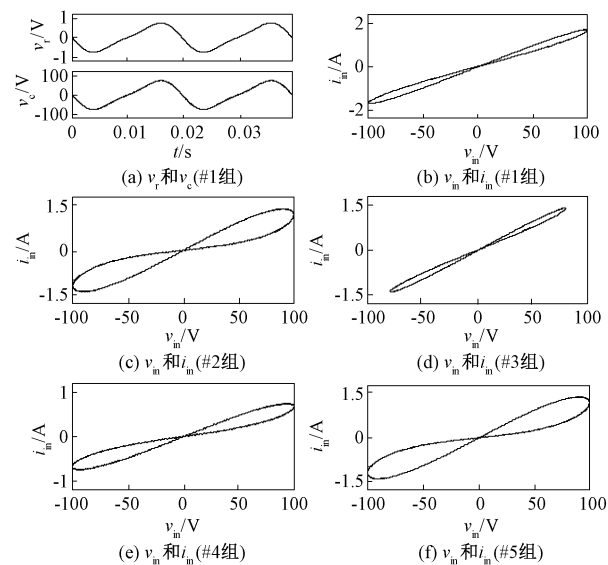


图 9 基于受控电压源的磁控型忆阻器仿真波形  
Fig. 9 Simulation waveforms of flux-controlled memristor

3.4 实验验证

本文搭建的磁控型忆阻器实验样机如图 10 所示,由 DSP (TMS320F28335) 对输入电压进行采样并产生控制信号。由于主开关管的最大电压应力为  $V_{DC}$ ,本文选取 Power MOSFET IRF830 作为开关管。

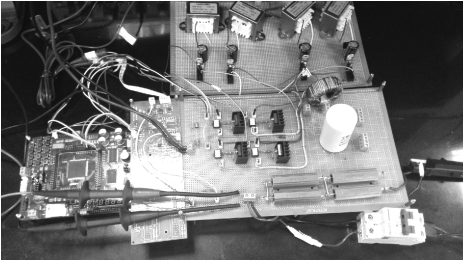


图 10 磁控型忆阻器实验样机  
Fig. 10 Experimental prototype of flux-controlled memristor

图 11~图 13 分别为采用表 1 中参数组#1、#3 和#5 时所测得的输入电压  $v_{in}$  和输入电流  $i_{in}$  波形。基于实测的电压、电流有效值,可得电路的实际功率分别为 82.8W、55.2W 和 59.9W,由于元件损耗的存在,实际值略低于表 1 中的理论值。此外,图 11 (b)、图 12(b)、图 13(b) 的波形与仿真结果一致,验证了本文所提忆阻器等效电路方案的可行性和正确

性。

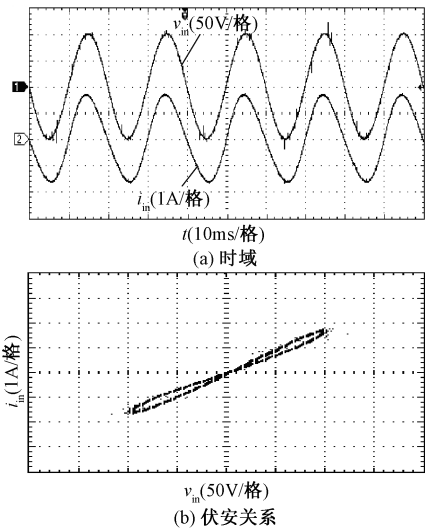


图 11  $v_{in}$  和  $i_{in}$  的实验波形 (#1 组)

Fig. 11 Experimental waveforms of  $v_{in}$  and  $i_{in}$  of Group #1

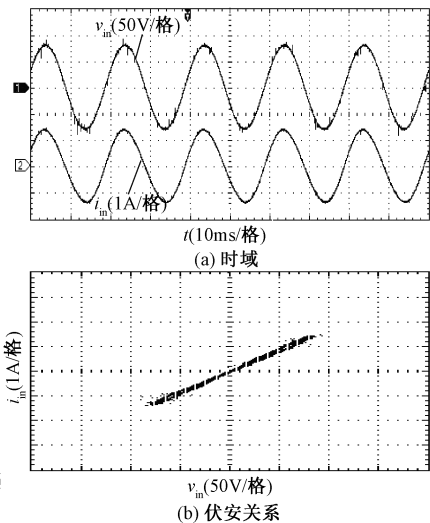


图 12  $v_{in}$  和  $i_{in}$  的实验波形 (#3 组)

Fig. 12 Experimental waveforms of  $v_{in}$  and  $i_{in}$  of Group #3

4 大功率忆阻器的应用

比较第 2 节 5 种不同的大功率忆阻器等效电路模型,可以发现它们的共同之处是模型的功率由电路元件如功率开关管、功率二极管、电感、电容和电阻等决定,因此不再受限于小功率等级。对于基于受控电压源和基于可变电阻的忆阻器等效电路,其忆阻性能主要由控制电路参数和主电路元件参数决定,因此可根据需要灵活调节忆阻器的特性,尤其适用于需要可变忆阻的场合。但是,当受控电压源采用逆变器实现时,需要外加一个直流电源。对于基

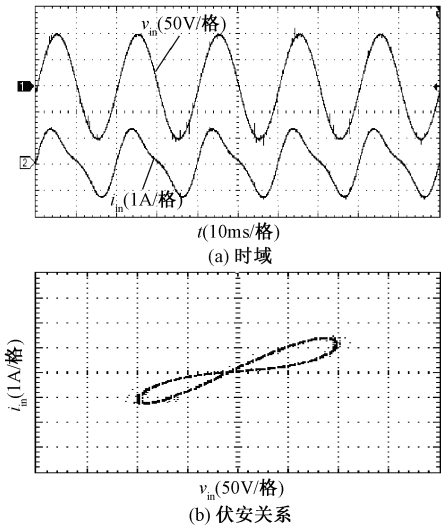


图 13  $v_{in}$  和  $i_{in}$  的实验波形 (#5 组)

Fig. 13 Experimental waveforms of  $v_{in}$  and  $i_{in}$  of Group #5

于不可控整流器、多倍压整流器或二极管和电容串并联的忆阻器等效电路模型,它们的共同点是忆阻性能主要取决于所选二极管的伏安特性,因此具有结构简单、无需控制的优点,但是忆阻特性无法灵活调节。此外,采用二极管的忆阻器在原点处可能存在死区,该缺陷是二极管的死区电压造成的,而采用开关管的基于受控源和基于可变电阻的忆阻器等效电路则不存在这个问题。

随着大功率忆阻器等效电路的研究不断深入,相关应用的研究和设计也得到了有力的支撑。考虑到忆阻器阻值会随着电流的增大而不断增大,本文尝试将大功率忆阻器应用于直流断路器<sup>[23,24]</sup>,探讨忆阻器在大功率场合的应用前景。

由于基于受控电压源或可变电阻的忆阻器具有忆阻值可调的特性,因此,可以根据直流断路器的工作需要来设计忆阻值的大小。基于忆阻器的直流断路器原理图如图 14 所示<sup>[25]</sup>,包括过电流检测装置、开关 K、忆阻控制器和忆阻器等效电路,其中 A、B 为忆阻器等效电路的外接端子。基于忆阻器的直流断路器串联在电路中,当电路正常运行时,开关 K 闭合,忆阻控制器输出信号到忆阻器等效电路,令忆阻器维持在低阻态;当电路出现过电流时,过电流检测装置动作,开关 K 关断,忆阻控制器不工作,此时忆阻器的阻值随着流过的电流增大而不断增大,短时间内忆阻器呈现出高阻态,有效地限制了电流的上升,保护了整个电路。

本文利用 Matlab/Simulink 搭建了上述基于忆

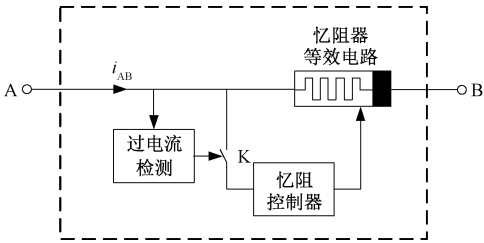


图 14 基于忆阻器的直流断路器原理图  
Fig. 14 Schematic of memristor based DC breaker

阻器的直流断路器仿真模型,仿真结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,在 0.08s 之前,系统正常运行(流过直流断路器模型的电流  $i_{AB}$  保持在 15.5A);在 0.08s 时制造短路故障,这时  $i_{AB}$  迅速上升;当达到设定的临界值(如 18A)时,忆阻控制器不工作,忆阻值上升, $i_{AB}$  迅速下降到零。

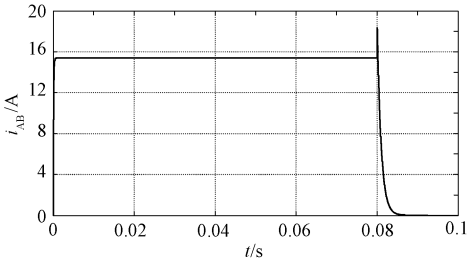


图 15 基于忆阻器的直流断路器仿真波形  
Fig. 15 Simulation waveform of memristor based DC breaker

5 结论

针对目前忆阻器电路模型整体功率受有源器件的限制,无法应用于大功率场合的问题,本文总结和归纳了几种大功率忆阻器等效电路模型的实现方法,并以基于受控电压源实现忆阻器的方法为例进行了仿真和实验验证。理论分析和实验结果证明,大功率忆阻器等效电路模型具有两方面的优点:①模型的功率范围宽,适用于各种场合;②忆阻特性可以通过控制器或电路参数灵活调整。本文所总结的大功率忆阻器实现方法为今后忆阻器在各种功率场合的实际应用提供了参考。

参考文献 (References):

[ 1 ] Chua L. Memristor - The missing circuit element [ J ]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18 ( 5 ): 507-519.  
[ 2 ] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found [ J ]. Nature, 2008, 453 ( 7191 ): 80-83.

[ 3 ] Williams R S. How we found the missing memristor [ M ]. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2013.  
[ 4 ] Zhang G, Wu F, Hayat T, et al. Selection of spatial pattern on resonant network of coupled memristor and Josephson junction [ J ]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2018, 65: 79-90.  
[ 5 ] Li Chuang, Min Fuhong, Li Chunbiao. Multiple coexisting attractors of the serial-parallel memristor-based chaotic system and its adaptive generalized synchronization [ J ]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94 ( 4 ): 2785-2806.  
[ 6 ] Shin Sangho, Kim Kyungmin, Kang Sung-Mo. Memristor applications for programmable analog ICs [ J ]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2011, 10 ( 2 ): 266-274.  
[ 7 ] Shin Sangho, Kim Kyungmin, Kang Sung-Mo. Resistive computing: Memristors-enabled signal multiplication [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60 ( 5 ): 1241-1249.  
[ 8 ] Liu Yunfeng, Song Zhiqiang, Tan Manchun. Multiple  $\mu$ -stability and multiperiodicity of delayed memristor-based fuzzy cellular neural networks with nonmonotonic activation functions [ J ]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 159: 1-17.  
[ 9 ] Hu Miao, Graves Catherine E, Li Can, et al. Memristor-based analog computation and neural network classification with a dot product engine [ J ]. Advanced Materials, 2018, 30 ( 9 ): 1705914.  
[ 10 ] Yu Shimeng. Neuro-inspired computing with emerging nonvolatile memories [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106 ( 2 ): 260-285.  
[ 11 ] Sodhi A, Gandhi G. Circuit mimicking TiO2 memristor: A plug and play kit to understand the fourth passive element [ J ]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2010, 20 ( 8 ): 2537-2545.  
[ 12 ] Wang Xiaoyuan, Fitch Andrew L, Iu Herbert H C, et al. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor [ J ]. Chinese Physics B, 2012, 21 ( 10 ): 108501.  
[ 13 ] Valsa J, Bialek D, Bialek Z. An analogue model of the memristor [ J ]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2011, 24 ( 4 ): 400-408.  
[ 14 ] Kim H, Sah M P, Yang C, et al. Memristor emulator for memristor circuit applications [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59 ( 10 ): 2422-2431.  
[ 15 ] Xu Quan, Lin Yi, Bao Bocheng, et al. Multiple attractors in a non-ideal active voltage-controlled memristor based

- Chua's circuit [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2016, 83: 186-200.
- [16] Pershin Y V, Di Ventra M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2010, 57 (8): 1857-1864.
- [17] 丘东元, 韦兆华, 张波 (Qiu Dongyuan, Wei Zhaohua, Zhang Bo). 一种大功率忆阻器 (A high power memristor) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN201320575257.0. 2014-04-02.
- [18] 谭斌冠, 陈艳峰, 张波, 等 (Tan Binguan, Chen Yanfeng, Zhang Bo, et al.). 一种基于SPWM控制实现的磁控型忆阻器等效电路 (An equivalent circuit of flux-controlled memristor based on SPWM control) [J]. *中国科学: 信息科学 (Science China: Information Sciences)*, 2017, 47 (7): 134-146.
- [19] 张广溢, 王军, 余建华 (Zhang Guangyi, Wang Jun, Yu Jianhua). 斩波式可变电阻器及其应用 (Chopper controlled variable resistor and its application) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 1999, 18 (1): 64-68.
- [20] 丘东元, 张书洋, 谭斌冠 (Qiu Dongyuan, Zhang Shuyang, Tan Binguan). 一种基于无源滤波和桥式整流的忆阻器等效实现电路 (A memristor equivalent implementation circuit based on passive filtering and bridge rectification) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN201720624779.3. 2018-01-16.
- [21] 陈艳峰, 谭斌冠, 张波, 等 (Chen Yanfeng, Tan Binguan, Zhang Bo, et al.). 一种基于倍压整流电路实现的忆阻器等效电路 (Memristor equivalent circuit realized by voltage doubler rectifier circuit) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN201720125645.7. 2017-02-10.
- [22] 陈艳峰, 谭斌冠, 张波, 等 (Chen Yanfeng, Tan Binguan, Zhang Bo, et al.). 一种基于二极管和电解电容串联实现忆阻功能的电路 (Circuit for realizing memristive function based on diode and electrolytic capacitor in series) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN201710073284.0. 2017-05-31.
- [23] 陈超, 刘文君, 俞天毅, 等 (Chen Chao, Liu Wenjun, Yu Tianyi, et al.). 基于直流系统故障保护的三端口直流断路器拓扑研究 (Topology research of three-port solid state circuit breaker based on DC system fault protection) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2018, 37 (6): 58-64.
- [24] 张翀, 邱清泉, 张志丰, 等 (Zhang Chong, Qiu Qingquan, Zhang Zhifeng, et al.). 直流混合型断路器与直流故障限流器的匹配研究 (Research on matching of DC hybrid circuit breaker and DC fault current limiter) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2016, 35 (9): 21-28.
- [25] 陈艳峰, 谭斌冠, 张波 (Chen Yanfeng, Tan Binguan, Zhang Bo). 一种基于忆阻器的直流断路器电路 (Memristor-based DC circuit breaker circuit) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN105846393A. 2016-08-10.

## Realization approach of high-power memristor and its application

CHEN Yan-feng, QIU Dong-yuan, ZHANG Bo, YUAN Chang-hai, TAN Bin-guan,

LU Yue-hai, WEI Zhao-hua

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** As the nanoscale memristor cannot be applied to circuit research directly, the existing approaches to realize memristor are still using circuit models. Different from the existing approaches based on analog components, several high-power models of memristor using power electronic converters have been proposed in this paper, which power level is dependent on the parameters of power semiconductor devices. The proposed high-power memristor models have the advantages of wide power range and easy adjustment, which are verified by the simulation and experimental results of a flux-controlled memristor prototype. Finally, the possible utilization of memristor in DC circuit breaker has been discussed, which provides a reference for expanding the future application of memristors.

**Key words:** memristor; circuit model; power semiconductor device; DC circuit breaker