

## 新型开关磁阻电机功率变换器

徐秋芳<sup>1</sup> 张京军<sup>2</sup> 张海军<sup>3</sup> 高瑞贞<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 信电学院 河北邯郸 056038; 2. 河北工程大学 机电工程学院 河北邯郸 056038;

3. 河北工程大学 水电学院 河北邯郸 056021)

**摘要:** 本文在经典功率变换器的基础上设计了一种含谐振电路的新型功率变换器,该功率变换器每相仅需一个功率开关管和一个功率二极管,实现了用最少数功率开关管使开关磁阻电机稳定运行的目的。通过 MATLAB 仿真,与不对称半桥型和公共开关型功率变换器进行比较,结果表明本文设计的新型功率变换器具有高性能、经济和高效的特点。

**关键词:** 开关磁阻电机; 功率变换器; 谐振电路; MATLAB

**中图分类号:** TM 301.2

**文献标识码:** A

### A new power converter for switched reluctance motors

XU Qiu - fang<sup>1</sup>, ZHANG Jing - jun<sup>2</sup>, ZHANG Hai - jun<sup>3</sup>, GAO Rui - zhen<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

3. School of Water Conservancy and Electric Power, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on classic power converters, a new power converter containing resonant circuits is developed in this paper, which requires one controllable semiconductor switch and one power diode for per phase. MATLAB has been used for the modeling and analysis of the new converter and compared with asymmetric bridge converters and miller converters. It is shown that the converter is high performance, economical and efficient.

**Key words:** switched reluctance motor; power converter; resonant circuit; MATLAB

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 结构简单、坚固、可靠性强使其逐渐受到广泛重视。SRM 调速系统是典型的机电一体化系统,具有调速范围宽和系统效率高等优点。其重要组成部分功率变换器是驱动 SRM 的电路装置,对整个系统的性能起着关键的作用,应满足与电动机结构匹配、高效率、控制方便、结构简单、成本低等基本要求<sup>[1-7]</sup>。随着电力电子器件的快速发展,功率变换器也有了迅速发展的基础。文献[8]提出了一种不对称半桥型功率变换器电路模型,其控制方法灵活稳定性高,但需要元件数量较多,成本高。文献[9]在其基础上进行了改进,减少元件使用数量,提出用  $N + 1$  个开关控制的功率变换器电路模型。文献[10]设计了用一个开关控制的

功率变换器电路模型,虽然在最大程度上减少开关使用数量,但其运行稳定性不理想。文献[11]设计一种双电源每相单管开关的开关磁阻电机功率变换器,有效的降低成本,有良好的可行性。文献[12]以公共开关型功率变换器为研究对象,为解决系统重载和高速运转时调速性能的下降,设计了几种新型的功率变换器,加快了绕组的放电过程,改善了系统的调速性能。本文针对目前功率变换器存在的问题,设计了一种成本低、稳定性好的含谐振电路的新型功率变换器,并利用 Matlab 进行了建模和仿真实验。通过和经典功率变换器的仿真结果比较,验证了本文设计的功率变换器的有效性。

## 1 经典功率变换器主电路拓扑

### 1.1 不对称半桥型

不对称半桥型功率变换器控制方式简单灵活,可靠性高<sup>[13]</sup>。在 SRM 的功率变换器中,不对称半桥型功率变换器应用最为广泛,其拓扑结构如图 1 所示。

在不对称半桥型功率变换器中,每一相绕组都需要两个功率开关管 T1 和 T2,两个功率二极管 D1 和 D2。以第一相为例,当 T1 和 T2 同时闭合时,绕组 A 得电;当 T1 和 T2 同时断开后,绕组 A 通过 D1 和 D2 回馈电能。若出现两相同时工作的情况,由于各相互为独立结构,互不影响,稳定性高。由于此类型功率变换器所需元件数多,成本较高,主要适用于相数少、功率大、电压高的 SRM。

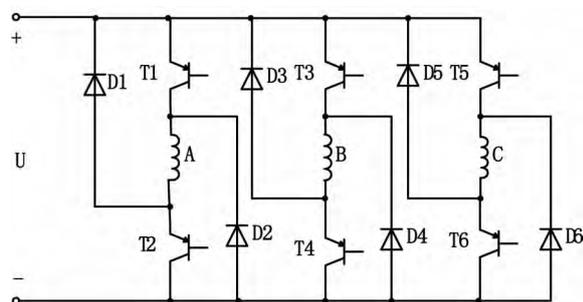


图1 不对称半桥型功率变换器

Fig.1 Asymmetric half bridge converter

### 1.2 公共开关型

为了保持高效率,又尽量减少器件的使用数量,在不对称半桥型的基础上进行改进得到公共开关型功率变换器<sup>[14-15]</sup>,如图 2 所示。公共开关型功率变换器最主要的特点是有一个公共开关 T0。以 A 相为例,当 T0 和 T1 同时闭合时,A 相导通;T1 断开,T0 导通时,绕组 A 与 D1 和 T0 形成通路,电流自由衰减;当 T0 和 T1 同时断开时,绕组 A 经过 D1 和 D0 回馈能量至电源。

公共开关型功率变换器几乎保留了桥式电路的优点,但作为公共开关的功率开关管,流经各相电流,其功率大,容易损坏。另外,当转速较高时,导通区域发生重叠,使得公共开关持续开通,绕组无法通过二极管回馈能量,造成电流激增,转矩脉动变大。因此公共开关型功率变换器适用于小功率、低转速的 SRM。

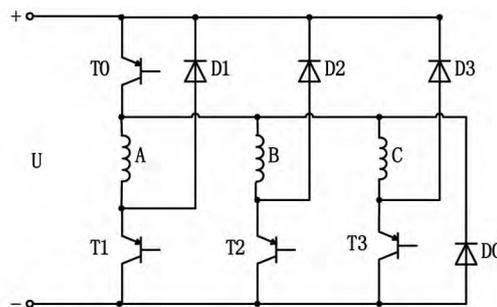


图2 公共开关型功率变换器

Fig.2 Miller converter

## 2 新型功率变换器

### 2.1 新型功率变换器简介

如今,不对称半桥型功率变换器是 SRM 功率变换器的标准。其控制模式灵活,稳定性高,然而其所需功率元件多、成本过高,限制了 SRM 的进一步应用。通过分析现有的功率变换器,本文设计了每相仅需一个功率开关管和一个功率二极管的新型功率变换器,如图 3 所示。

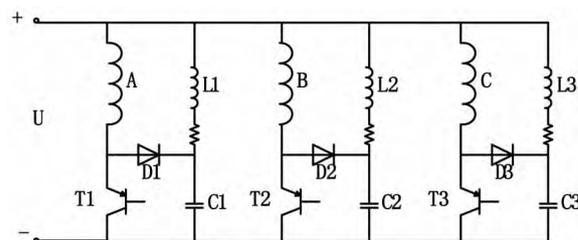


图3 新型功率变换器

Fig.3 New power converter

如图可以看出每一相绕组都由一个功率开关管控制,在绕组以及电感之间有一个功率二极管,用于提供绕组释放能量传输路径。绕组右侧由电阻、电感和电容组成串联谐振电路,当电路接近谐振时,电容电压会远远超过电源电压,提供较大的反向电压使绕组电流迅速下降。

### 2.2 运行原理

新型的功率变换器主要利用谐振电路的特点,来实现对绕组电流的有效控制。

对于任何含有电感和电容而不含独立源的二端网络,在一定频率下,端口电压与端口电流相位相同,即电路呈现电阻性,这种工作状态称作谐振<sup>[15-16]</sup>。谐振条件为

$$\omega L - \frac{1}{\omega c} = 0 \tag{1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

式中  $\omega_0$  - 串联谐振电路的谐振角频率;  $f_0$  - 谐振频率。

谐振时各元件的电压向量为

$$\dot{U}_R = R \dot{I}_0 = R \frac{\dot{U}}{R} = \dot{U} \quad (4)$$

$$\dot{U}_L = j\omega_0 L \dot{I}_0 = j\omega_0 L \frac{\dot{U}}{R} = jQ \dot{U} \quad (5)$$

$$\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega_0 C} \dot{I}_0 = -j \frac{1}{\omega_0 C R} \dot{U} = -jQ \dot{U} \quad (6)$$

式中  $Q$  - 谐振电路的品质因数;  $U$  - 电源电压。

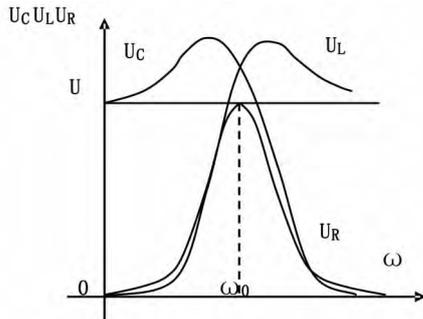


图4 RLC谐振曲线

Fig. 4 The resonance of RLC

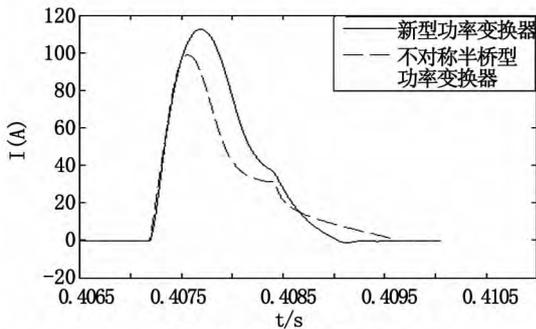


图5 SRM电流波形比较

Fig. 5 Comparison of current waveforms for SRM

如图4所示,当电路频率  $\omega < \omega_0$  时,电容电压始终大于电源电压,当  $\omega$  接近  $\omega_0$  产生谐振时,电感和电容电压有效值为  $U_L = U_C = QU$ ,当  $Q \gg 1$  时,电容的电压会远远超过电源电压。当续流时,加在绕组两端的反向电压绝对值为  $QU \gg U$ ,而传统的不对称半桥型功率变换器绕组两端的续流电压绝对值为  $U$ ,其续流电流对比图如图5所示(采用的是6/4极240V开关磁阻电机,在导通角为  $45^\circ$  关断角  $75^\circ$  转速  $n = 5000 \text{ r/min}$  时的仿真曲线)。可以看出新型功率变换器的续流时间较短,

较高的反向电压加快了绕组的放电过程,当PWM占空比较大时,快速的放电过程有利于消除续流时间过长导致的转矩死区,并减少负转矩的产生降低转矩脉动。续流的加快使得系统在不产生负转矩的情况下绕组可以相对增加关断角,从而延长相绕组电流维持最大的时间,增加了系统的输出功率,提高运转效率。

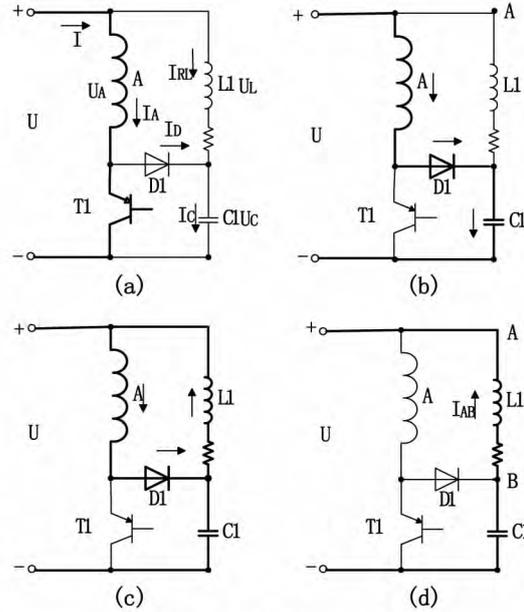


图6 新型功率变换器运行模式

Fig. 6 Modes of operation for new converter

新型功率变换器共有四种运行模式,如图6所示。本文主要以A相绕组为例简要介绍新型功率变换器的四种运行模式:

当  $\theta \geq \theta_{on}$  时, T1 闭合,绕组A得电,电流上升,如图6(a)所示。

当  $\theta = \theta_{off}$  时, T1 关断,绕组A通过功率二极管给电容迅速充电,电容两端电压迅速升高,提高A点电位,如图6(b)所示。

当  $\theta > \theta_{off}$  时,绕组A通过功率二极管使电阻消耗绕组中剩余能量,较大的反向电压使绕组电流迅速降低,如图6(c)所示。

当绕组电流下降至0时,功率二极管关断,电容中剩余能量回馈电源,如图6(d)所示。

当初始条件绕组电流为0时,各模式的数学表达式如下所示,电流电压在图6(a)中标注,电流标注方向为正:

1)  $U_A = U; I = I_A$  在运行期间,由于电感在电路中缓冲电流变化,电感中还有剩余电流回馈电源,总电流  $I = I_A - I_{RL}$ ,其中  $I_{RL}$  为电感中剩余缓冲电流。

- 2)  $U = U_A; I_A = I_D = I_C; I_{RL} = 0。$
- 3)  $-U_A = -U_{RL} = U_C = QU; U_A + U_C = 0; I_A = I_D = -I_C - I_{RL}。$
- 4)  $U_C = -U_{RL}; I = -I_{RL} = -I_C; I_D = I_A = 0。$

### 2.3 元件选取标准

通过功率变换器的运行原理可知,新型功率变换器主要由串联谐振电路构成。根据 SRM 的工作原理可知,各个绕组依次供电形成一个与转速成正比的通电频率为谐振的形成提供基础。其中一相绕组的通电频率为

$$f = \frac{N_r n}{60} \quad (7)$$

式中  $N_r$  - 转子齿数;  $n$  - 转速。

由电机的额定转速和电机参数计算出绕组通电频率,即谐振电路通电频率  $f_0$ 。为达到良好的运行状态,令绕组通电频率  $f$  公式略小于谐振频率  $f_0$ 。根据式 (3) 和式 (7) 计算所需的电感及电容规格。

### 3 仿真及结果分析

为更直观观测功率变换器的性能,本系统采用直流斩波控制最大电流 200A,并且轻载运行。电机本体利用 MATLAB/Simulink 模块建立,选用 6/4 极 240V 开关磁阻电机。功率变换器环节直接采用 SimPowerSystems 模块搭建。各功率变换器开关器件统一采用绝缘栅双极晶体管 (Insulated - Gate Bipolar Transistor, IGBT)。新型功率变换器参数设置如下:电阻  $R$  为  $10\Omega$ ,电感  $L$  为  $1e-4H$ ,电容  $C$  为  $1e-4F$ ,其控制图如图 7 所示。

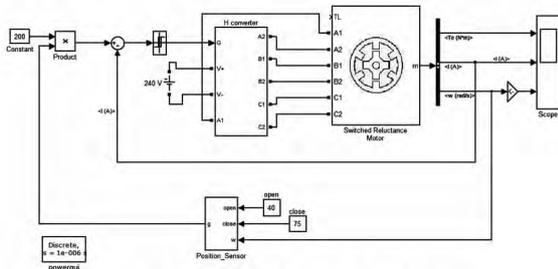


图7 开关磁阻电机调速系统框图  
Fig.7 MATLAB model of SRM drive

图 8 - 图 10 分别显示了不对称半桥型 (图 8)、公共开关型 (图 9) 以及新型功率变化器 (图 10) 在本系统中搭载运行,启动到 0.4s 时转矩、相电流、速度的仿真图形,其中导通角  $\theta_{on} = 35^\circ$ ,关断角  $\theta_{off} = 75^\circ$ 。

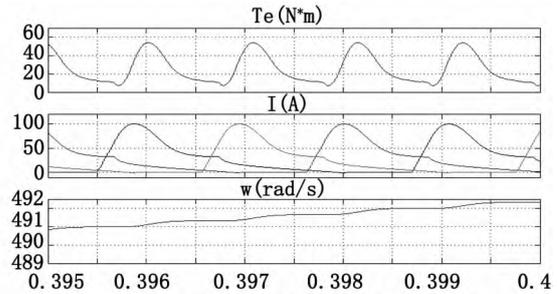


图8 不对称半桥型功率变换器

Fig.8 Simulation result showing various wave-forms of SRM using asymmetric bridge converter

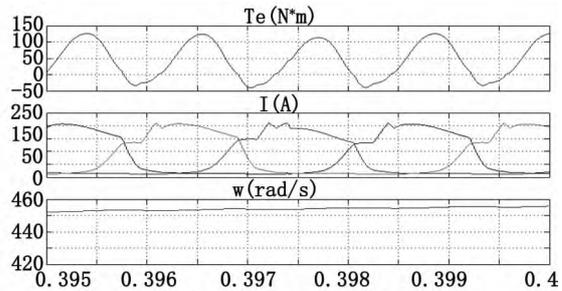


图9 公共开关型功率变换器

Fig.9 Simulation result showing various waveforms of SRM using miller converter

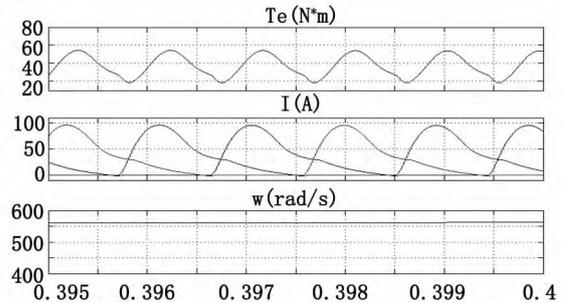


图10 新型功率变换器

Fig.10 Simulation result showing various waveforms of SRM using new type converter

根据各仿真结果图可以看出,使用不对称半桥型功率变换器,转矩脉动幅值  $47.43 N \cdot m$  ( $7.113 N \cdot m - 54.54 N \cdot m$ ) 转矩平均值为  $25.31 N \cdot m$  转矩脉动为 1.87 (转矩脉动 = 转矩脉动幅值/转矩平均值)。转矩脉动较小,电流波形稳定,但此变换器每一相都需要两个开关管控制,成本较高。

当使用公共开关型功率变换器时,转矩脉动幅值  $168.2 N \cdot m$  ( $-41.24 N \cdot m - 126.9 N \cdot m$ ), 转矩平均值  $41.03 N \cdot m$ , 转矩脉动为 4.10, 转矩脉动较大且电流波形不稳定,容易产生较大噪声。在运行过程中可以看出产生负转矩,使得整个系统的效率降低。虽然公共开关型功率变换器使用较少的功率开关节约成本,但性能较弱。

使用新型功率变换器时,转矩脉动幅值  $36.5 \text{ N} \cdot \text{m}$  ( $18.29 \text{ N} \cdot \text{m} - 36.93 \text{ N} \cdot \text{m}$ ),转矩平均值  $36.93 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,转矩脉动为  $0.99$ ,转矩脉动小,电流波形较为稳定。根据图 11 可以看出,相同的仿真时间,新型功率变换器提速最快,效率较高。

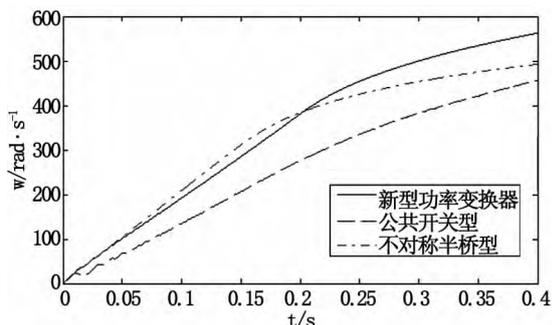


图11 各功率变换器启动速度对比

Fig. 11 Startup time comparison of each converter

根据仿真结果,各功率变换器主要性能对比如表 1 所示。

表 1 功率变换器性能对比表

Tab. 1 Performance comparison of each converter

类型	功率开关管/个	转矩脉动	相电流
不对称半桥型	6	1.87	稳定
公共开关型	4	4.1	较小波动
新型	3	0.99	较稳定

根据表格可以看出,新型功率变换器使用最少的功率开关管,使开关磁阻电机转矩脉动最小,电流稳定性高,并且提高了效率。

#### 4 结论

新型功率变换器转矩脉动较小,电流稳定,效率高,并且所需的功率管个数最少,达到了高效节能目的。

#### 参考文献:

[1] BALAJI M, KAMARAJ V. Evolutionary computation based multi-objective pole shape optimization of switched reluctance machine [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012(43): 63-69.

[2] 孙立志,白宏哲,尚静. 两相开关磁阻电机转矩特性的研究[J]. *电机与控制学报*, 2003, 39(1): 186-191.

[3] 王振民. 开关磁阻电动机的研究[J]. *煤炭学报*, 1992, 17(2): 74-79.

[4] 杨晋岭,张英俊,谢斌红. 一种新型开关磁阻电机软开关功率电路[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 179-185.

[5] 吕品,张京军,张海军. 基于改进遗传算法的开关磁阻电机优化设计[J]. *河北工程大学: 自然科学版*, 2013, 30(1): 91-94.

[6] 刘旭,潘再平. 煤矿输送机用开关磁阻电机驱动系统[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(2): 280-283.

[7] 马晓妮,张海军,高瑞贞,等. 开关磁阻电机磁固耦合建模与分析[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2014, 31(1): 94-97.

[8] DAVIS R D, BLAKE R J. Inverter drive for switched reluctance motor circuits and component ratings [J]. *IEEE Proceedings B*, 1981, 128(2): 126-136.

[9] MILLER T J E. Brushless reluctance motor drives [J]. *IEEE Power Engineering Journal*, 1987, 1(6): 325-331.

[10] STALEY A M, KRISHNAN R. Single controllable switch power converter for SRM drive systems [J]. *IEEE*, 2005, 6(6): 1425-1430.

[11] 吴建华,丁伟东. 一种双电源每相单管开关磁阻电机功率变换器[J]. *电机与控制学报*, 2013, 17(12): 7-12.

[12] 甘醇. 开关磁阻电机新型功率变换器的研究与设计[J]. *电机与控制应用*, 2011, 38(3): 12-16.

[13] 张全柱,郝荣泰,邓新华. 开关磁阻电机几种功率变换器拓扑的性能分析[J]. *电气传动自动化*, 1995, 17(4): 51-54.

[14] 王喜莲,王旭东,刘宇华,等. 开关磁阻电机新型功率变换器及仿真分析[J]. *电机与控制学报*, 2000, 4(2): 102-105.

[15] 李莺,钟洪声,罗毅. 异步电动机六边形磁链直接转矩控制系统研究[J]. *四川理工学院学报: 自然科学版*, 2011, 24(6): 649-651.

[16] 汪建. 电路原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(责任编辑 刘存英)