

一种新型四相 SR 电机功率变换器的分析与设计

孙冠群, 林辉, 齐蓉
(西北工业大学自动化学院 西安 710072)

摘要: 功率变换器是开关磁阻电动机调速系统 (SRD) 中的重要组成部分, 现有的各种功率变换器大都有这样或那样的问题与不足, 关键是不能保证较好的性能价格比。本文通过对两种常用的四相开关磁阻电动机 (SR) 功率变换器主电路进行分析, 优化、综合常用的主电路, 给出了目前最优的四相 SR 电机功率变换器主电路型式——最少主开关型, 提高了经济性和实用性。结合作者的研制实践, 又给出了 5.5KW 的 SR 电机新型功率变换器的实际电路、主要器件及其定额的选择。通过实验成功地应用此方案, 基于降低 SR 电机转矩波动的有效手段, 同时实现电机实时双相绕组通电稳定运行。

关键词: 开关磁阻电动机; 功率变换器; 最少主开关; 绕组双相运行

中图分类号: TM301.2 文献标识码: A

Analysis and Design of New Power Converter for Four Phase Switched Reluctance Motor

Sun GuanQun, Lin Hui, Qi Rong

(College Of Automation Of NorthWestern Polytechnical University, xi' an
710072, China)

Abstract: Power converter is important part of switched reluctance motor, in present, most of power converter have many shortcoming, they of the best pivotal is that they have not outstanding rates. In the article, two traditional power converter main circuit for four phase switched reluctance motor are analyzed, optimized and synthesized. The paper gives the main circuit of new power converter for four phase SR motor—the main circuit of the least central switch. With the project practice, the paper gives the practical circuit, key component and it's parameter. With experiment, the project is applied successfully. In order to reduce torque-ripple of electric machine also, secure locomotion is achieved with simultaneous electrify two phase loop.

Key words: switched reluctance motor; power converter; the least central switch; simultaneous electrify two phase loop

1. 引言

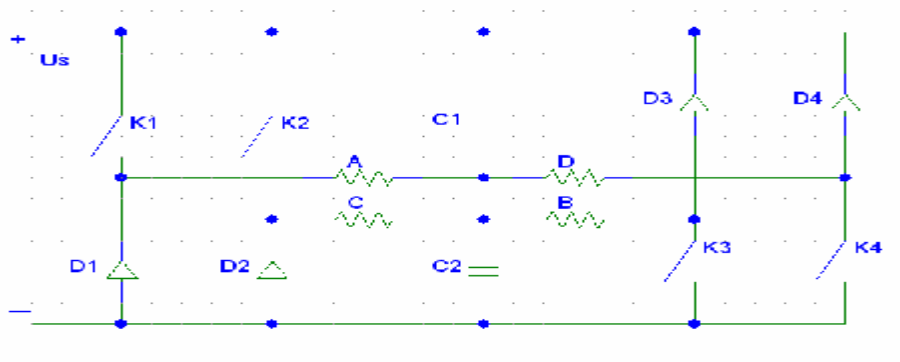
开关磁阻电动机 (SR) 因其结构简单、制造成本低、效率高、可靠性好, 在某些应用领域完全可以与直流电机、感应电机及永磁电机争雄, 特别是在国民经济中应用最广的感应电动机, SR 电动机与其相比在某些领域已显示出相当的优势。SR 电动机的功率变换器相当于 PWM 变频调速感应电动机的变频器一样, 在调速系统中占有重要地位, 功率变换器设计是提高开关磁阻电动机调速系统 (SRD) 性能价格比的关键之一。由于

SR 电动机工作电压、电流波形并非正弦波，且波形受系统运行条件及电机设计参数的制约，变化很大，难以准确预料，因此，SRM 功率变换器的设计是与 SR 电动机、控制器的设计密切相关的，适用于所有 SR 电动机及不同控制方式的“理想功率变换器”是没有的。事实上，SRD 的一些参数，如相数、定转子级数、定转子极弧尺寸、绕组匝数、功率变换器主电路、运行方式及其控制变量等在设计中均有很大的选择余地，所以必须从优化整体性能价格比的角度综合地考虑三者的设计。

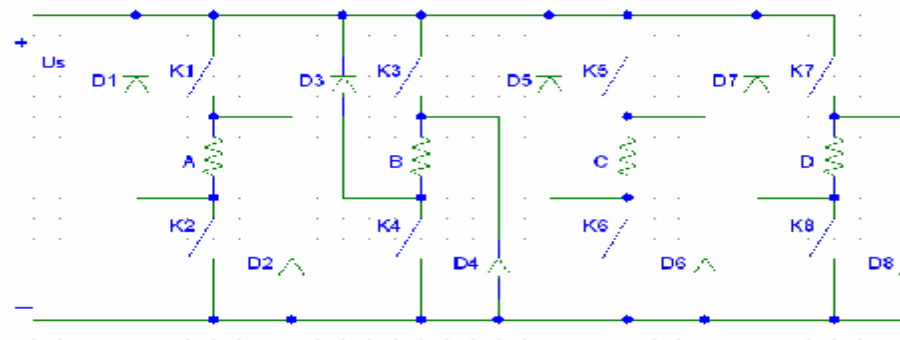
本文针对一台 5.5KW 的四相 SR 电动机展开功率变换器的设计工作。将新型四相功率变换器主电路结构应用于实践，通过实验还实现了电机双相稳定运行。

2. 功率变换器主电路分析与设计

拓扑结构设计是 SR 电动机功率变换器设计的关键之一。围绕处理放电绕组磁场能量问题，已出现多种不同的主电路结构形式，如不对称半桥型、双绕组型、双极性直流电源型、带储能电容的、Miller 型等等，其中在四相（8/6）SRD 系统中应用最广的是图 1 所示不对称半桥型和双极性直流电源型。



(a) 双极性电源型



(b) 不对称半桥型

图 1 两种常用功率变换器主电路型式

双极性电源型功率变换器每相只用一只主开关是其主要优点，但主开关和续流二极管的电压定额为 $U_s + \Delta U$ (ΔU 系因换相引起的任一瞬变电压)，而加给励磁绕组的电压仅为 $U_s/2$ ，未能用足开关器件的额定电压和电源的容量。另外，这种结构的功率变换器，当电机单相运行时， C_1 、 C_2 交替出现较大的波动。采用双相运行方式可以解决这一问题（前提是电路上、下两部分同时有一相绕组导通），但在双相运行时，相电流可能流过 $dL/d\theta < 0$ 的区域，这时电动转矩的有效性将降低，而且，两相同时通电，电机磁路饱和加剧，进一步降低了电流产生电动转矩的有效性。

不对称半桥型的优点是：各主开关管的电压定额为 U_s ，与电机绕组的电压定额近似相等，所以这种线路用足了主开关管的额定电压；由于每相绕组接至各自的不对称半桥，在电路上，相与相之间的电流控制是完全独立的；可给相绕组提供 3 种电压回路，即上、下主开

关同时导通时的正电压回路，一只主开关保持导通另一只主开关关断时的零电压回路，上、下主开关均关断时的负电压回路；这样，低速斩波控制（CCC）方式时可采用能量非回馈式斩波方式，即在斩波续流期间，相电流在“零电压回路”中的续流，避免了电机与电源间的无功能量交换，这对增加转矩、提高功率变换器容量的利用率、减少斩波次数、抑制电源电压波动、降低转矩脉动都是有利的。缺点是：每相需 2 只主开关，未能充分体现单极性的 SRM 功率变换器较其他交流调速系统变流器固有的优势。

通过以上分析可看出，从性能上看，不对称半桥型较双极性电源型有很大优势，其唯一不足是所用开关器件数量多，明显增加了功率变换器的成本，经济性差。对作者本项目的四相（8/6）SRD 而言，采用双相运行时，因为 A 相和 C 相、B 相和 D 相的电流一般不会重叠，因此，传统不对称半桥结构中，A 相和 C 相、B 相和 D 相分别可共用一只上臂主开关（共用一只下臂时相对需多增加两套独立的驱动电路供电电源，增加了成本），从而减少 2 个主开关，构成如图 2 所示的四相功率变换器主电路^[3]。

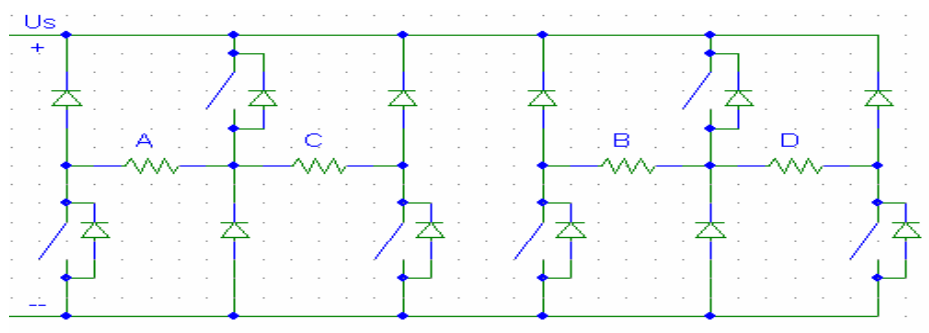


图 2 最少主开关型功率变换器主电路

这种主电路方案保留了不对称半桥型的优点，使开关器件降到最少，具有较高的性能价格比。只是在应用中要注意，要保证在双相运行时，A 相与 C 相或 B 相与 D 相之间不能同时导通，否则上部的开关管将承受更大的压力。

3. 本项目 SR 电机功率变换器设计

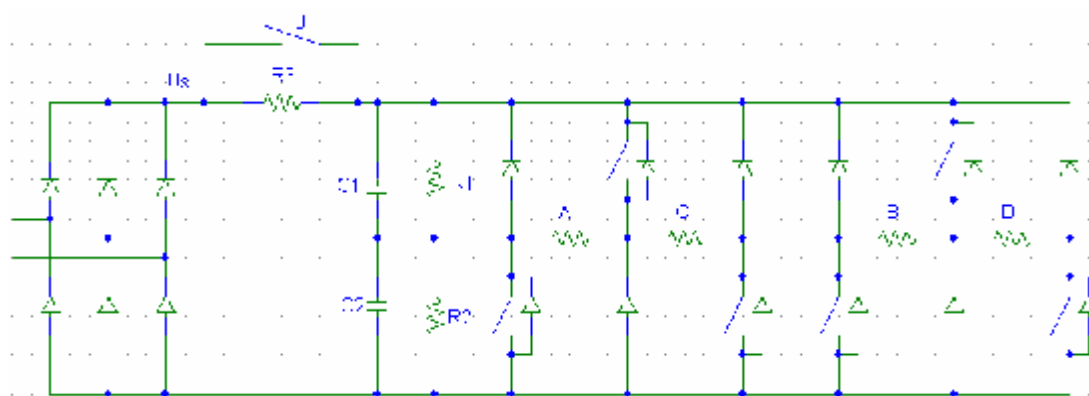


图 3 本文所用功率变换器实用主电路

图 3 为本项目所采用的功率变换器主电路，在实用中又进行了优化。

系统采用三相交流电源（线电压 380V、50Hz）供电，系统中使用的整流电路为三相三线制电路，分为二极管整流部分和电容滤波部分。电解电容 C1、C2 对整流电路的输出电压起到平滑滤波作用，同时作相绕组能量回馈、电机换相和制动运行时能量回馈的储能元件。

而电阻 R1、R2 起到平衡两个电容上的电压及整个系统关闭时对 C1、C2 电容放电的作用。

在系统加电开始工作的瞬间，为了防止滤波电容开始充电所引起的过大的浪涌电流，需要采取一定的保护措施，本系统采用了电阻-继电器并联网络。当充电电压小于某一值时，继电器 J 断开，电阻 R3 流过电流，把浪涌电流限制到一个安全的范围。当充电电压大于此值时，J 闭合，把电阻 R3 短路。

SR 电动机功率变换器主开关器件的选择与电动机的功率等级、供电电压、峰值电流、成本等有关；另外还与主开关器件本身的开关速度、触发难易、开关损耗、抗冲击性、耐用性及市场普及性有关系。

对于 SR 电机而言，开关管的选取应基于以下原则：

- 1、满足系统电压、电流值的要求，并留有一定的余量；
- 2、尽可能低的导通压降和关断以后的漏电流，以降低系统。损耗；
- 3、足够的安全工作区和二次击穿耐量有利于提高系统运行的可靠性；
- 4、尽可能小的驱动功率，驱动方便。

绝缘栅双极晶体管（IGBT）综合了 MOSFET 控制极输入阻抗高和 GTR 通态饱和压降低的优点，其工作频率较高、驱动电路简单，目前是中、小功率开关磁阻电机功率变换器较理想的主开关元件。本课题选用 IGBT 做为系统的主开关元件。

直流主电源电压最高为 537V, 主开关管承受的电压最大值等于直流电源电压最大值，考虑到 2 倍的电压裕量，则主开关器件的耐压定额为：

$$U_r = 2U_s = 2 \times 537 = 1074V$$

对于电流定额的计算，根据经验公式和电机已知参数（额定电压 260V），其最大峰值电流为：

$$I_{MAX} = 2.1P_N / U_n = 2.1 \times 5.5 \times 1000 / 260 = 44.4A$$

根据市场已有规格，选取 50A/1200V 的 IGBT 作为系统的主开关器件。

功率变换器中所用续流二极管必须正向导通和反相截止均具有快恢复特性。正向快恢复特性能保证主开关器件断开时，相电流迅速从主开关器件转换到二极管续流；而反向快恢复特性则能保证二极管以足够快的速度从导通变为截止。特别是 SR 电动机高速运行和以较高斩波频率运行时，允许续流二极管反向恢复时间较短，反向快恢复特性尤为重要。为此，均选用快恢复二极管作为续流管。

整流部分采用常用的三相全波二极管整流桥，根据课题所用 SR 电动机的原始数据，整

流桥的定额选为为 60A/1200V。具有滤波与储能作用的电容值根据公式 $C=T \times 10^5 / 3 R_f$ 计算, 其中 R_f 为电机绕组电阻, $R_f=0.47 \Omega$, $T=1/(6 \times 50)$ ms, 所以 $C=2250 \text{ mF}$ 。

对于 IGBT 的驱动电路的选择须遵循以下原则:

1、IGBT 是电压驱动, 具有一个 2.5V—5V 的阈值电压, 有一个容性输入阻抗, 因此 IGBT 对栅极电荷聚集很敏感, 要保证有一条低阻抗的放电回路, 即驱动电路与 IGBT 的连线要尽量短。

2、用小内阻的驱动源对栅极电容充放电, 以保证栅极控制电压有足够陡的前后沿, 使 IGBT 的开关损耗尽量小。

3、驱动电平增大时, IGBT 通态压降和开通损耗均下降, 但负载短路时流过的电流增大, IGBT 能承受的短路电流的时间减少, 对其安全不利, 一般选为+12V—+15V。

4、在关断过程中, 为尽快抽取存储的电荷, 须施加一个负偏压, 但此负压受 IGBT 的 G、D 极间最大反向耐的限制, 一般取-2V—5V。

5、大电感负载下, IGBT 的开关时间不能过分短, 以限制 di/dt 所形成的尖峰电压, 保护 IGBT 的安全。

6、由于 IGBT 在电力电子设备中多用于高压场合, 故驱动电路应与整个控制电路在电位上严格隔离。

7、IGBT 的栅极驱动电路应尽可能简单实用, 最好自身带有对 IGBT 的保护功能, 并具有较强的抗干扰能力。

综合上述因素, 选择日本富士的 EXB840 作为驱动模块比较合适。

EXB840 是日本富士公司提供的 150A/600V 和高达 75A 的 1200V 快速型 IGBT 专用驱动模块。整个电路信号延迟时间不超过 $1 \mu \text{S}$, 最高工作频率可达 40KHz-50KHz, 它只需外部提供一个+20V 的单电源, 内部自己产生一个-5V 反偏压。对本系统比较适用。

4 实验结果

设计的功率变换器已在 5.5KW 的 SRD 系统中运行, 转速、电流双闭环, 控制方式采用电压 PWM 方式, 控制器是基于 DSP F240 为核心, 基于 PI 自整定算法调节转速。实验电机参数为: 功率 5.5KW, 额定转速 1500r/min, 额定电压直流 260V, 调速范围 50—2000r/m。

由于 SR 电机的特点, 当电机在单相运行时, 绕组电流、转矩波动、径向单边磁拉力较大。以前相关的一些实验是采用双相启动, 以利于减小单绕组启动电流并加大启动转矩, 启动后转入单相运行。本项目成功实现了电机的双相启动、双相稳定运行, 减小了转矩波动与

绕组电流。图 4 显示了在典型电压 PWM 控制方式下的双相运行时两相绕组的电流波形。

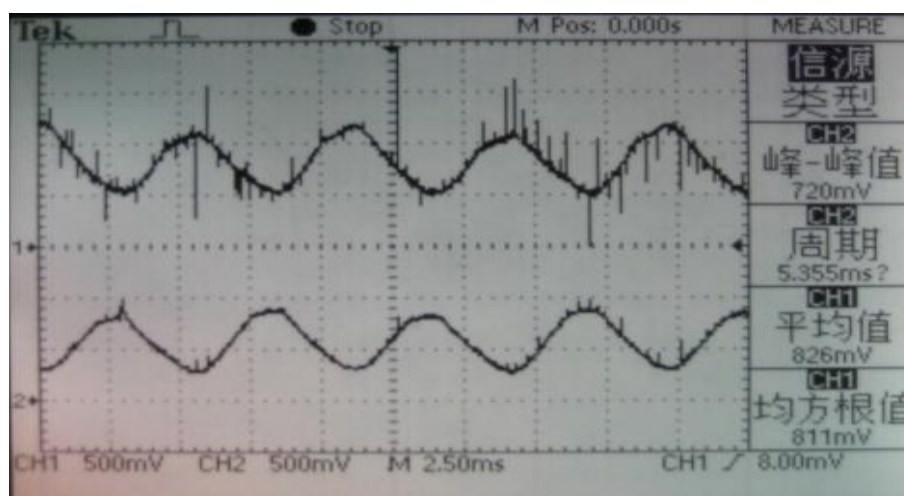


图 4 电机双相运行电流波形

图中横坐标每格 2.5ms，纵坐标每格 500mV，电流波形参数如图中右侧所示，CH1 和 CH2 间的值有些差异，源于绕组实际电流经传感器（1000：1）、采样电阻、隔离放大等所产生的线性变化差异，实际电流有效值（均方根值）为 0.97A。

通过电流波形图可见，绕组电流是在正半周之上的脉动电流波形，合成绕组电流高低互补，则他们最终的合成电流趋于平稳，因此，电机的转矩波动性大大降低；另外，由于同时有两相绕组产生转矩，对于径向磁拉力也有一定的分解。电机的噪声获得明显的下降。

5 结论

对于 SR 电机的功率变换器来说，其在整个系统中所占比重最大，所以对它的第一个要求就是尽量有较高的性能价格比；另外，它能最大限度的支持系统的各种方案，实现多种调速控制模式。那么，本文所述的此型功率变换器主电路符合这两个要求，具有优秀的性能价格比，很好的支持了电机的双相稳定运行，而电机双相运行的重大意义已被国内外所公认。目前国内外对 SR 电机的研究重点，已经不是单独的某一部分内容，而是整个 SRD 系统的总体的模型、设计、控制策略等，功率变换器作为当中的一部分，也会随着系统对它新的要求而进步。

参考文献：

- 【1】 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术. 机械工业出版社, 1995
- 【2】 胡崇岳. 现代交流调速系统. 机械工业出版社, 1998 年 10 月, 70-88, 390-442
- 【3】 Zhong Lianfang. An Investigation on Switched Reluctation Motor and Its Power Converter Circuits. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 1996, 24(1). 373-384.

作者简介：

孙冠群（1974-），男，山西永济人，工程师，硕士研究生。研究方向为电机调速及电力电子技术。

林辉（1957-），男，福建人，教授，博导。研究方向为现代交流调速、现代控制理论及应用等。

联系方式：

联系人：孙冠群

邮箱：sgq741129@126.com

第一作者（孙冠群）联系地址：（变更后的）

浙江杭州下沙高教园中国计量学院机电工程学院电气工程及自动化教研室
（邮编：310018）