

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0215

Yang Jinling, Zhang Yingjun, Xie Binhong. A new SRM soft switching power circuit[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 179-185. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0215

一种新型开关磁阻电机软开关功率电路

杨晋岭¹, 张英俊², 谢斌红²

(1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 计算机学院, 山西 太原 030024)

摘 要:针对开关磁阻电机调速系统的开关器件在工作过程中,会产生大的电磁干扰和大的功率损耗问题,提出了一种基于新型电容分压并联谐振直流环的功率变换电路拓扑。该电路是在传统的硬开关不对称逆变桥的各开关器件上并联缓冲电容,实现对相开关的零电压关断;同时,在直流母线上加入一个由二个电感与一个电容为主要组成元件的谐振环,通过对此谐振环中谐振开关的合理控制,即可实现对相开关的零电压开通及对谐振开关的零电流或零电压软通断。通过对功率电路工作原理和动作模式过程的分析,得出需满足的软开关条件。具有此谐振环的软开关变换器,有效区间大、功率损耗小,因而提高了开关磁阻电机调速系统的效率和性能。用 Matlab 仿真实验验证了此电路的正确性与有效性。

关键词:开关磁阻电机;软开关;并联准谐振直流环;功率变换电路

中图分类号:TM352

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2014)01-0179-07

A new SRM soft switching power circuit

YANG Jin-ling¹, ZHANG Ying-jun², XIE Bin-hong²

(1. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: With regard to the electromagnetic interference and power loss generated in the operation of the switches in switched reluctance motor drive (SRD) system, the paper proposed a converter with a new kind of capacitor divider parallel resonant DC link (CDPRDCL). The converter was to realize the zero-voltage-turn-off of the phase switches by connecting one buffer capacitor to each switch in conventional asymmetric inverters; and to realize the zero-voltage-turn-on of the phase switches, and the soft operation of the resonant switches, by adding a resonant link containing, as the main components, two inductors and one capacitor and through reasonably controlling the resonant switches in this link. The required condition for soft-switching was obtained by analyzing the working principle and operation process of the circuit. The soft-switching converter with such a resonant link has a larger effective interval and a lower power loss, thereby enhancing the efficiency and performances of SRD. Finally, the validity and efficiency of the converter are verified by MATLAB simulation.

Key words: switched reluctance motor; soft-switching; parallel resonant DC link; converter circuit

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)采用双凸极结构,转子无线圈,具有结构简单、工作可

靠、容错能力强的特点^[1-3]。由其构成的开关磁阻电机调速系统(SRD),已被越来越多地应用于环境恶劣

收稿日期:2013-02-25 责任编辑:许书阁

基金项目:山西省科技重大专项计划基金资助项目(20121101001);山西省科技攻关基金资助项目(20100322004);山西省国际合作计划基金资助项目(20110081033)

作者简介:杨晋岭(1971—),男,山西河津人,讲师。Tel:0351-2354881, E-mail: yjlyl98@sina.com

而要求安全性能高的煤矿领域。如应用于采煤机、局部通风机和带式输送机等^[4-7]。但是,作为组成 SRD 的重要部件—功率器件,在开关过程中,会产生电磁干扰($du/dt, di/dt$)和开关损耗($p=ui$)问题。这些问题不仅会降低逆变器效率,还会增加功率器件热量,降低系统的可靠性。尤其在频率较高、功率较大时,此问题更为突出。对此,一种有效地解决手段是采用软开关技术。

近些年,研究人员提出了许多软开关的拓扑结构,但能应用于 SRD,或有关 SRD 方面软开关技术的文献报道较少^[8-14],因此还需在这方面,进一步丰富和完善。如文献[8]提出的电路拓扑,在一定程度上改善了系统的性能,但其相开关没能完全实现软通断。文献[9-10]提出的电路拓扑仅适用于单开关 SR 电机变换器。文献[11]采用谐振电感与逆变桥串联方式,电机绕组及谐振回路所需电流均须经过谐振电感,使电感本身的容量、体积和损耗都较大,效率较低。文献[12-13]提出了并联准谐振直流环变换器,在直流母线上并联谐振环,提高了通用性及母线的利用率,但跨接在母线上的开关影响系统的可靠性。

鉴于以上问题,笔者提出了一种新型基于电容分压并联谐振直流环的 SRD 软开关变换器电路。该电路具有以下特点:① 直流母线电压充放电的过渡期短,有效保持区间大;② 谐振电感和谐振电容的容量较小,功率损耗小;③ 所有开关均实现了软通断,且其承受的电压不超过直流电源电压;④ 直流母线零

电压槽的持续时间可根据实际情况自由选择,具有良好的可控性能;⑤ 辅助开关器件没有直接跨接在直流母线上,从而克服了母线电压不为零时,因其误导通而发生短路的可能;⑥ 谐振元件的参数不随负载参数的变化而变化,有良好的通用性。

1 软开关变换器电路拓扑分析

1.1 电路拓扑

新型的电容分压并联谐振直流环(Capacitor Divider Parallel Resonant DC Link, CDPDCL)SRD 软开关变换器如图 1 所示,电路由新型电容分压并联谐振直流环①和改进的不对称逆变桥②组成。其中,电容分压并联谐振直流环包括:4 个相同的电解电容 $CF_1 \sim CF_4$, 4 个相同的均压电阻 $R_1 \sim R_4$, 实现电源电压均分平衡;1 个谐振电容 C_r , 2 个相同的谐振电感 L_r 和 L_{r1} , 2 个辅助二极管 V_{Dr2} 和 V_{Dr3} , 3 个辅助开关器件 $V_{a1} \sim V_{a3}$ 及其反并联二极管 $V_{Da1} \sim V_{Da3}$, 组成谐振回路,为其后的逆变桥提供零电压开通条件。改进的不对称逆变电桥,是在硬开关不对称电桥的基础上^[14-15],给每个相开关并联了一个缓冲电容,分别为 $C_1 \sim C_6$,实现对各相开关的零电压软关断。直流电源 U_d 经此变换器给 6/4 极 SRM 相绕组驱动电路供电。为了简化分析,本电路做了以下假设:电路中所有开关元件及二极管均作为理想器件。由于负载电感值远大于谐振电感值,且 PWM 频率较高,因此在一个开关周期中,可近似认为负载电流为恒流 I_0 ,其数值取决于各相电流及 PWM 的占空比。

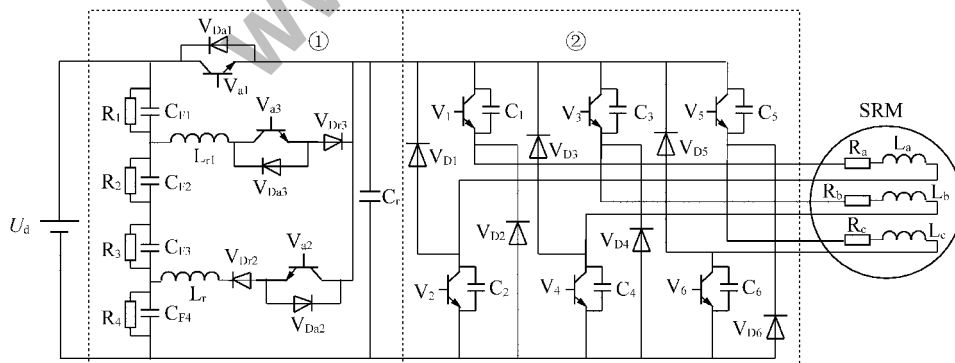


图 1 电容分压并联谐振直流环节 SRD 功率变换电路

Fig. 1 The circuit structure of CDPDCL SRD converter

1.2 谐振工作模式分析

此谐振电路工作过程可分为两大阶段:PWM 工作模式阶段和换相阶段。

1.2.1 PWM 工作模式阶段

以图 1 的 A 相为例说明其 PWM 软开关控制过程。电路采用单管斩波方式,即在 V_2 保持开通条件

下, V_1 采用 PWM 斩波方式。图 2 为一个 PWM 斩波周期,7 种模式阶段的控制时序及谐振波形。其中, S_{V1} 为开关 V_1 的触发信号; S_{Va1} , S_{Va2} , S_{Va3} 分别为开关 V_{a1} , V_{a2} , V_{a3} 的触发信号; i_{Lr} , i_{Lr1} 为谐振电感 L_r 及 L_{r1} 电流; u_{Cr} 为谐振电容 C_r 电压。

(1) 模式 a ($\sim t_0$), 初始阶段。开关 V_{a2} , V_{a3} 保持

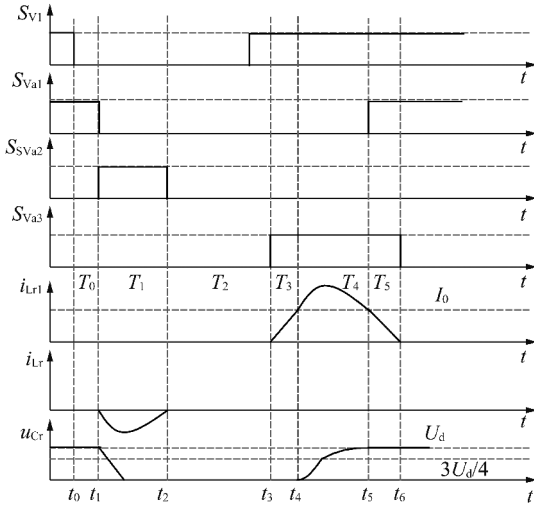


图 2 时序及谐振波形

Fig. 2 The time sequence and resonant waveforms of CDPRDCL converter

断态,开关 V_{a1} , V_1 保持通态, u_{Cr} 为 U_d , 电源给 A 相供电。

(2) 模式 b ($t_0 \sim t_1$), 延迟阶段。在 t_0 时刻, 关断开关 V_1 。由于电容 C_1 与开关 V_1 并联, 所以此关断为 ZVS 关断。此时, 负载电流经开关 $V_2 \rightarrow V_{D2}$ 续流, 母线回路电流为零。 t_1 时刻, 关断辅助开关 V_{a1} 。因电容电压 u_{Cr} 初始为 U_d , 不能突变, 所以开关 V_{a1} 关断为 ZVZCS 关断。设延迟时间为 $T_0 = t_1 - t_0$ 。

(3) 模式 c ($t_1 \sim t_2$), 放电阶段。在关断开关 V_{a1} 的同时, 开通辅助开关 V_{a2} 。 u_{Cr} 由 U_d 通过 $V_{a2} \rightarrow V_{D2} \rightarrow L_r \rightarrow C_r$ 回路放电。因 i_{Lr} 不能突变, 所以辅助开关 V_{a2} 为 ZCS 开通。 i_{Lr} 由 0 逐渐增大, 同时 u_{Cr} 由 U_d 逐渐减小。当 u_{Cr} 降为 $U_d/4$ 时, i_{Lr} 达负的最大值。之后, u_{Cr} , i_{Lr} 都衰减。 t_2 时刻, u_{Cr} , i_{Lr} 分别减小至 0。由于二极管 V_{D2} 的反向截止作用, 使 C_r 与 L_r 谐振结束。此时, 关断 V_{a2} , 此关断属 ZVZCS 关断。模式表达式为

$$i_{Lr}(t) = \frac{3U_d}{4Z_0} \sin \omega_0 t \quad (1)$$

$$u_{Cr}(t) = \frac{3U_d}{4} \cos \omega_0 t + \frac{U_d}{4} \quad (2)$$

其中, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$, $Z_0 = \omega_0 L_r = \frac{1}{\omega_0 C_r} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ 。电流最大值为

$$I_{Lrmax} = \frac{3U_d}{4Z_0} \quad (3)$$

谐振为半个谐振周期, 所以, 持续时间为

$$T_1 = t_2 - t_1 = \pi \sqrt{L_r C_r} \quad (4)$$

(4) 模式 d ($t_2 \sim t_3$), 零电压阶段。在此阶段, 直

流母线电压已为零。闭合开关 V_1 , 属 ZVS 闭合。此段时长可通过触发 V_{a3} 的时刻自由调节。设该时段时长 $T_2 = t_3 - t_2$ 。

(5) 模式 e ($t_3 \sim t_4$), 谐振电感电流与负载电流平衡阶段。 t_3 时刻, 开通开关 V_{a3} , 此为 ZCS 开通。此时电感电流流经的路径为: $L_{r1} \rightarrow V_{a3} \rightarrow V_{D3} \rightarrow V_1 \rightarrow A$ 相 $\rightarrow V_2$ 。在随 i_{Lr1} 线性增加的同时, 续流二极管 V_{D1} 的电流 i_{VD1} 线性减小。 t_4 时刻, i_{Lr1} 与 A 相负载电流 I_0 相等, V_{D1} 被反向截止。此模式表达式为

$$i(t) = \frac{3U_d}{4L_r} t \quad (5)$$

此时段时长,

$$T_3 = t_4 - t_3 = L_r \frac{4I_0}{3U_d} \quad (6)$$

(6) 模式 f ($t_4 \sim t_5$), 谐振电容充电阶段。 t_4 之后, 电感电流 i_{Lr1} 开始大于负载电流 I_0 且继续增加。其中, i_{Lr1} 一部分电流与负载电流 I_0 相平衡; 另一部分电流流经电容 C_r , 并产生谐振。此时, 电容电压 u_{Cr} 由零开始上升。此模式表达式为

$$u_{Cr}(t) = \left(\frac{3U_d}{4Z_0 C_r} + \frac{I_0}{C_r Z_0} \right) \sin \omega_0 t + \frac{I_0}{C_r} \cos \omega_0 t - \frac{I_0}{C_r} t \quad (7)$$

当 u_{Cr} 上升至 $3U_d/4$ 时, L_{r1} 两端电压为零, i_{Lr1} 达到最大值。之后, i_{Lr1} 开始减小, L_{r1} 开始释放能量, 使 u_{Cr} 继续上升。 t_5 时刻, 即 u_{Cr} 升至 U_d 时, 反并联二极管 V_{D1} 被正向导通, 且 u_{Cr} 保持为 U_d 不变。此状态持续至 i_{Lr1} 降至负载电流 I_0 结束。此过程用时半个谐振周期, 时长表达式为

$$T_4 = t_5 - t_4 = \pi \sqrt{L_r C_r} \quad (8)$$

(7) 模式 g ($t_5 \sim t_6$), 电源供电阶段。 t_5 时刻, 因 u_{Cr} 已升为 U_d , 所以开通 V_{a1} 属 ZVZCS 开通。此时, 负载电流 I_0 由直流电源和电感电流 i_{Lr1} 共同提供。由于谐振电感 L_{r1} 两端反向施加 $U_d/4$, 所以其电流 i_{Lr1} 衰减速度较快。 t_6 时刻, 电感电流 i_{Lr1} 降为零, 负载电流 I_0 开始全由电源提供。此时, 在反向电压作用下, 二极管 V_{D3} 被反向截止。关断开关 V_{a3} , 属 ZVZCS 关断。表达式为

$$i(t) = I_0 - \frac{U_d}{4L_r} t \quad (9)$$

该段时长,

$$T_5 = t_6 - t_5 = \frac{4I_0 L_r}{U_d} \quad (10)$$

之后, 电路状态又回到初始模式 a, 准备开始下一周期的工作。

1.2.2 换相模式阶段

当需换相,如需 A 相切换到 B 相时,存在两种可能的工作模式:① 单管模式,即 V_1 为断态,开关 V_2 需关断。此时,由于 C_2 与 V_2 并联,故此关断为 ZVS 关断。② 双管模式,即开关 V_1, V_2 同时由通态需关断。由于 V_1, V_2 分别并联电容 C_1, C_2 ,故此关断为 ZVS 关断。无论哪一种工作模式,关断后, A 相绕组续流的路径均为: A 相 $\rightarrow V_{D1} \rightarrow V_{Da1} \rightarrow$ 电源 $U_d \rightarrow V_{D2}$ 。对于 B 相 V_3, V_4 的开通时刻,应该在开关 V_4 已由位置传感器触发,且母线电压谐振为零期间开通,属 ZVS 开通。依此方式,可分别对 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 换相。

2 实现软开关的条件

根据以上各工作模式过程分析,在元件参数确定的情况下,除了 T_0, T_2 可调整外,其它模式时间都是确定的。设,

$$T = T_1 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (11)$$

相开关最高频率应满足: $f_{\max} \leq 1/T$ 。

在充电过程中,为了满足谐振条件,要求谐振电容 C_r 充电至 $3U_d/4$ 时,谐振电感 L_{rl} 所存储的能量 $L_r I_{\max}^2/2$,应大于等于电容 C_r 的电压由 $3U_d/4$ 升至 U_d 时所需要的能量 $\frac{1}{2}C_r\left(1 - \frac{9}{16}\right)U_d^2$,以及与负载在此段时间内所消耗的能量 $I_0^2 Z_a T_x$ 之和,即,

$$\frac{1}{2}L_r I_{\max}^2 \geq \frac{1}{2}C_r\left(1 - \frac{9}{16}\right)U_d^2 + I_0^2 Z_a T_x \quad (12)$$

式中, $I_{\max}$ 为充电谐振支路对应的最大电流值; T_x 为电容电压由 $3U_d/4$ 升至 U_d 时所用的时间; Z_a 为负载阻抗。

否则,谐振开关 V_{a1} 不能满足零电压软开通, V_{a3} 不能零电流关断。

当然, L_r 与 C_r 的比值也不宜过大,否则会影响系统性能,甚至会使 V_{a1}, V_{a2} 不能实现软通断。

综上所述, L_r 与 C_r 的参数选择,应综合考虑 PWM 周期、式(12)及 i_{Va2} 应在关断 V_{a2} 之前已衰减为零等条件。

3 仿真及结果分析

为了验证电路拓扑的可行性与理论分析,本文采用 Matlab 软件对 SRM 功率电路进行了数字仿真。谐振元件参数和电机一组参数值见表 1。

设 $T_0 = 3 \mu s, T_2 = 15 \mu s$,并根据各模式的结果和元件参数,得其时间参数,见表 2。

由式(11)得,最小周期不能低于 $29.81 \mu s$ 。选 PWM 开关周期 T 为 $100 \mu s$,即频率为 10 kHz 。

表 1 实验电路元件参数

Table 1 A set of circuit parameter of CDPRDCL circuit

$R_i/$ Ω	$L_i/$ mH	$U_d/$ V	$L_r, L_{rl}/$ μH	$C_r/$ nF	$C_i/$ pF
2	15	280	10	25	0.1

表 2 各模式时间值

Table 2 The calculating values of intervals in every mode

μs					
T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
3	1.57	15	6.67	1.57	20

3.1 开关元件仿真结果分析

在一个开关周期内,各开关元件的控制信号、 u_{Cr}, i_{Lr} 及 i_{Lrl} 的仿真波形如图 3 所示。可以看出,当辅助开关 V_{a1} 关断, V_{a2} 闭合时,电容电压 u_{Cr} 由 U_d 开始放电至零;谐振电感 L_r 电流迅速增至最大值约 10.45 A ,而后衰减至零。在母线电压为零期间,相开关 V_1 开通。当辅助开关 V_{a3} 闭合后,电源开始经 L_{rl} 给相绕组供电, i_{Lrl} 由零直线上升至相绕组电流 I_0 。随着 i_{Lrl} 的进一步增加, u_{Cr} 开始由零迅速上升至 U_d 。之后,辅助开关 V_{a1} 闭合, i_{Lrl} 经过峰值电流约为 112.9 A 后开始减小。当谐振电感电流 i_{Lrl} 衰减至零后, V_{a3} 关断。可见,此仿真结果与理论分析一致。

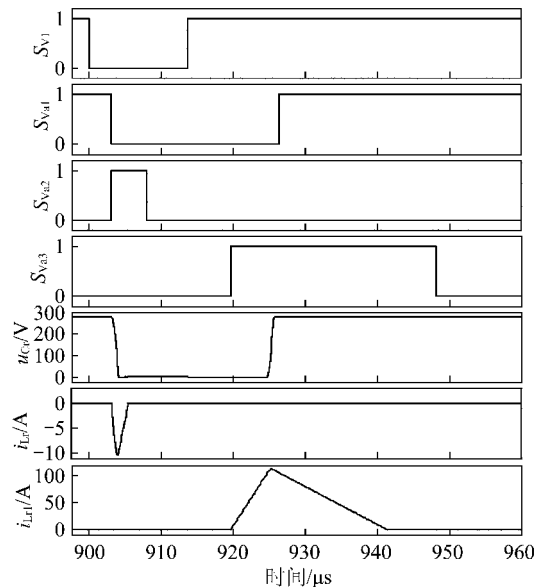


图 3 SRD 变换器的控制时序及谐振波形

Fig. 3 The resonant simulation waveforms of SRD converter

图 4(a)为相开关 V_1 通断时的控制信号、电流和电压波形。在 S_{V1} 变为高电平时, u_{V1} 已为零; i_{V1} 突变为负载电流的一半(这是因为在 V_1 开通时,一半负载续电流经 $V_{D1} \rightarrow V_1$ 支路;另一半负载续电流经 $V_2 \rightarrow V_{D2}$ 支路),故 V_1 在 ZVS 条件下开通。 V_1 关断

时的时间轴局部放大如图4(b)所示。可以看出,当 i_{V1} 降为零后, u_{V1} 由零开始上升,所以 V_1 在ZVS条件下关断。

谐振电路3个开关 V_{a1} 、 V_{a2} 、 V_{a3} 的触发信号、电流和电压波形如图5所示。可以看出, V_{a1} 为ZVZCS关断,ZVZCS开通; V_{a2} 为ZCS开通,ZVZCS关断; V_{a3} 为ZCS开通,ZVZCS关断。

以上结果得知,此变换器的所有开关器件都实现

了软通断。

3.2 谐振元件功率损耗及过渡速度分析

电路功率损耗一般由两部分组成:开关损耗和导通损耗。由以上分析得知,电路中所有开关元件的开关损耗为零。因此,在负载参数相同,且忽略谐振电感及谐振电容损耗的条件下,电路的功率损耗大小,是由谐振开关及二极管的导通损耗来确定。谐振电路总功 Δp_r 耗表达式为

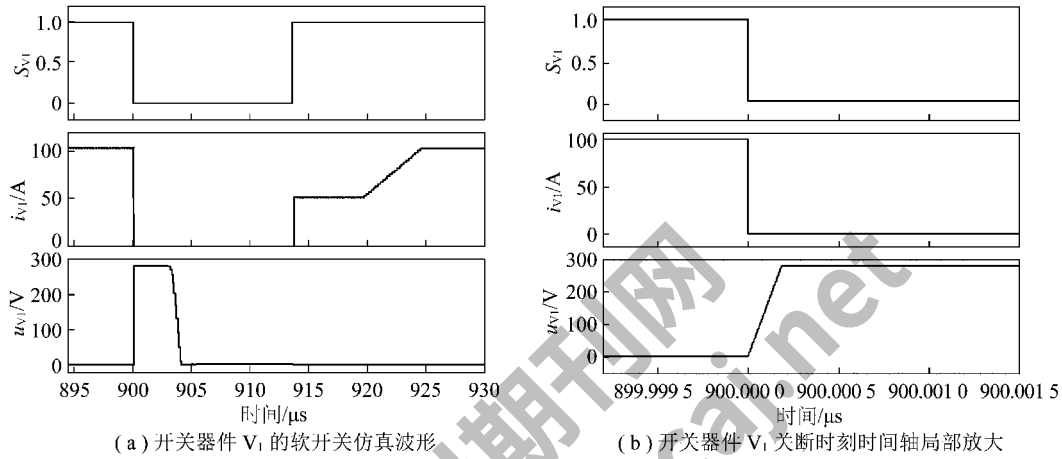


图4 相 V_1 开关软开关波形

Fig. 4 The soft-switching simulation waveforms of V_1

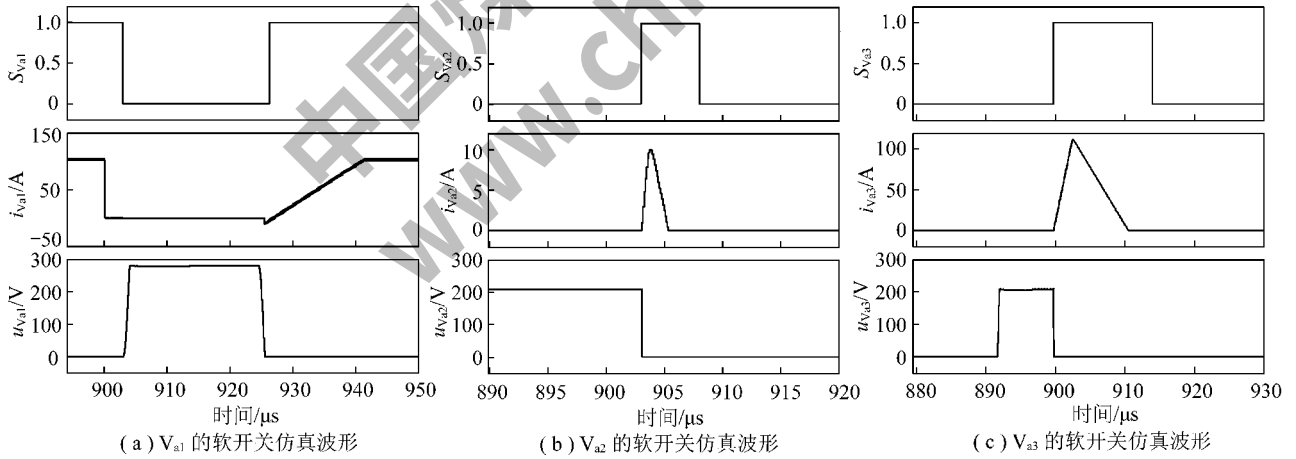


图5 辅助开关 V_{a1} 、 V_{a2} 及 V_{a3} 波形

Fig. 5 Auxiliary-switch waveforms of V_{a1} , V_{a2} and V_{a3}

$$\Delta p_r = f_c u_{CE} \int_{t_1}^{t_6} i(t) dt \quad (13)$$

式中, f_c 为开关频率; u_{CE} 为开关或二极管的通态电压; $i_{Lr}(t)$ 为随时间变化的谐振电流。

针对功率损耗,在频率、负载、谐振开关及二极管参数相同的条件下,本电路与文献[14]提出的软开关功率电路进行了比较。图6(a)为文献[14]的谐振电压和电流波形,图6(b)为本设计的谐振电压和电

流波形。由两图的仿真结果,可以看出:图6(a)的谐振元件在直流母线零电压阶段和母线电压过渡阶段(即母线电压由 U_d 过渡到0及由0过渡到 U_d)有功耗,而在高电平保持阶段无功耗;本电路的谐振元件仅在母线电压过渡阶段有功耗,而在零电压凹陷阶段和高电平保持阶段无功耗。并在此基础上,得出了二谐振电路不同负载条件下的功率损耗,如图7所示。可以看出,文献[14]的谐振功耗随负载的变化不明显,其值约为51.1 W。本设计电路,满负载时,谐振

损耗约为 42.79 W, 小于文献[14]的功耗。并且随着负载的减小, 谐振功耗进一步减小。这是由于谐振电感 L_{r1} 的导通时长及最大电流值与负载电流 I_0 有关。因此, 与文献[14]的软开关变换器相比, 本电路的功率损耗较小。

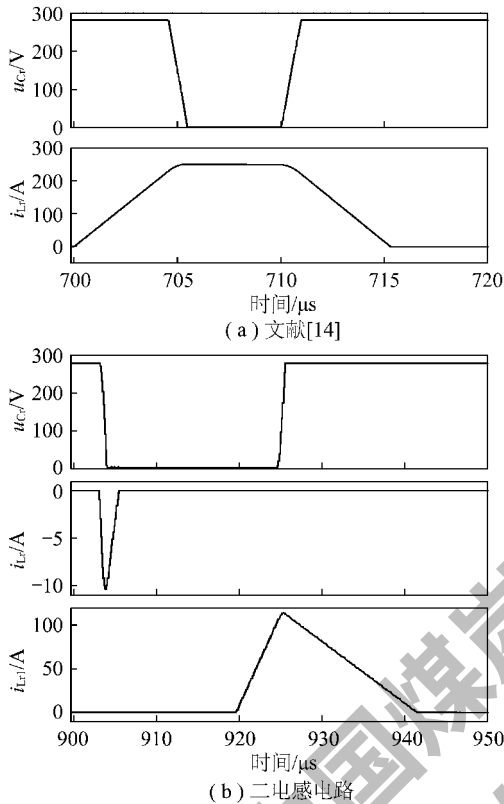


图6 谐振电容电压及电感电流波形

Fig. 6 The waveforms of u_{Cr} and i_{Lr}

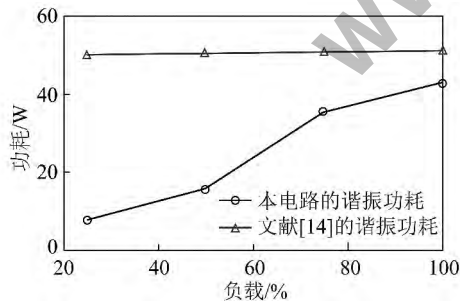


图7 谐振环功耗曲线

Fig. 7 Power loss curves of resonant link

在一个 PWM 斩波周期内, 母线电压的高、低电平所占区间的大小与 PWM 的占空比有关。减小母线电压的过渡时间, 有利于扩大 PWM 的有效区间, 改善系统的工作性能。由图 6 可知, 母线电压的过渡时间分别为: $1.05 \times 2 = 2.1 \mu s$ 和 $0.85 \times 2 = 1.7 \mu s$ 。可见, 图 6(b) 中的电压过渡时间较短, 即在相同周期内, 本设计电路的母线电压有效区间大, 系统性能佳。

4 结 论

提出的新型分压并联谐振直流环软开关逆变电路, 与相关文献提出的逆变电路相比, 其谐振电感在充、放电回路中接于不同母线分压处, 可有效地缩短直流母线充、放电的过渡时间, 扩大其有效区间, 从而提高了系统工作的性能。此辅助谐振电路与逆变桥并联, 且仅在母线充、放电的过渡期被导通, 使谐振元件在减小容量的同时, 也减小了导通时间, 降低了变换电路的功率损耗, 提高了效率。

参考文献:

- [1] 孙剑波, 詹琼华, 黄 进. 开关磁阻电机的定子振动模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 148-151.
Sun Jianbo, Zhan Qionghua, Huang Jin. Modal analysis of stator vibration for switched reluctance motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 148-151.
- [2] 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.
- [3] Muhammad Rafiq, Saeed-ur Rehman, Fazal-ur Rehman, et al. A second order sliding mode control design of a switched reluctance motor using super twisting algorithm[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 25: 106-117.
- [4] 刘送永, 谭国俊, 张旭龙, 等. 采煤机开关磁阻调速系统的无位置传感器控制技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1408-1411.
Liu Songyong, Tan Guojun, Zhang Xulong, et al. Control technology for no-position sensor of shearer switched reluctance motors drive[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1408-1411.
- [5] 张旭隆, 谭国俊, 崩松岩, 等. 基于径向神经网络的无位置传感器开关磁阻电机采煤机牵引系统[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1570-1574.
Zhang Xulong, Tan Guojun, Kuai Songyan, et al. Position sensor less control of switched reluctance motor for shearer traction system based on RBF neural network[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1570-1574.
- [6] 霍红义, 李雷军. 基于开关磁阻电机智能瓦斯排放系统的研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 600-603.
Huo Hongyi, Li Leijun. Study of intelligent gas discharging system based on switch resistance motor[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 600-603.
- [7] 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.
Liu Xu, Pan Zaiping. Switched reluctance motor driver system for underground mining conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 280-283.
- [8] Murai Y, Cheng J, Sugimoto S, et al. A capacitor-assisted, soft-switched switched reluctance motor drive[A]. Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Piscataway: IEEE Inc., 1999: 424-429.
- [9] Gallegos López G, Kjaer P C, Miller T J E, et al. Simulation study of

- resonant DC link inverter for current-controlled switched reluctance motors[A]. Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems[C]. Piscataway: IEEE, 1997: 757-761.
- [10] Murai Y, Ji Cheng, Yoshida M. New soft-switched/switched-reluctance motor drive circuit[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(1): 78-85.
- [11] 罗建武, 詹琼华, 邓 琼. 一种新型开关磁阻电机软开关功率变换器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 142-149.
- Luo Jianwu, Zhan Qionghua, Deng Qiong. Study of a novel soft-switching converter for switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 142-149.
- [12] 孟润泉, 王振民, 许春雨. 新型开关磁阻电机驱动系统软开关功率变换器原理分析与仿真[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1563-1568.
- Meng Runquan, Wang Zhenmin, Xu Chunyu. Principle analysis and simulation of a novel soft switching converter for switched reluctance motor drive[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1563-1568.
- [13] 孟润泉, 王振民, 许春雨. 软开关技术在 SRD 系统中的应用研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 403-406.
- Meng Runquan, Wang Zhenmin, Xu Chunyu. Study on the application of soft-switching technique in switched reluctance motor drive system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(4): 403-406.
- [14] 孟润泉, 王振民, 卜庆华. 开关磁阻电机功率电路的软开关策略及仿真[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 323-327.
- Meng Runquan, Wang Zhenmin, Bu Qinghua. Strategy and simulation for switched reluctance motor converters to achieve soft switching[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2010, 31(3): 323-327.
- [15] 李 睿, 马智远, 徐德鸿. 一种新型 40 kW 软开关三相脉宽调制整流器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 93-100.
- Li Rui, Ma Zhiyuan, Xu Dehong. A novel 40 kW soft switching three-phase pulse width modulation rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 93-100.

《煤炭学报》综合排名挺进前十名

2013 年 9 月 27 日, 中国科技期刊论文统计结果发布,《中国科技期刊引证报告(核心版)》统计指标显示:《煤炭学报》总被引频次达到了 3 812, 影响因子达到了 1.238, 综合评价总分为 93.8 分, 综合评价总分在统计的 1 994 种科技核心期刊中名列第 9 位。相比 2012 年的各项指标(总被引频次 3 191 次、影响因子 1.119、综合评价总分 82 分、综合排名第 34 位等), 2013 年又上了一个新台阶。