

基于辅助谐振换流的矩阵变换器研究

对辅助谐振换流矩阵变换器的工作原理和换流问题进行研究。首先根据输入电压分区和输出电流方向，得出了辅助谐振换流矩阵变换器双向开关换流序列表。然后在此基础上，分析了基于辅助谐振换流的矩阵变换器的工作原理及双向开关换流的实现过程。最后采用PSpice软件进行仿真验证。结果表明，理论分析的正确性和矩阵变换器采用辅助谐振换流的可行性。

李建霞 李艳艳/燕山大学(河北省电力电子节能与传动控制重点实验室)

0 引言

全球经济迅速发展，能源问题和环境问题日益突出。矩阵变换器作为一种具有优良控制性能和发展前途的新型绿色电力变换器，能够实现交流-交流的直接变换，克服了传统交-直-交变频调速系统中谐波污染严重、功率因数低及含有直流环节等缺点，在国内外引起了广泛的重视^[1]。但由于矩阵式变换器特殊的结构，要求输入端不能短路，输出端不能开路，因此安全可靠换流成为矩阵变换器的关键问题之一^[2-3]。辅助谐振换流矩阵变换器通过在变换器负载侧设定谐振单元来实现双向可控开关软换流，这种软换流方法大大降低了双向开关的功率损耗和电磁干扰。随着数字化控制技术的成熟，辅助谐振换流控制复杂的问题也变得相对简单，故已经引起广大学者的重视，辅助谐振换流型矩阵变换器已经成为一个研究热点^[4-5]。

本文针对辅助谐振换流矩阵变换器拓扑进行研究。首先，对主电路拓扑的

工作原理进行了详细的分析，然后，对主电路的换流策略进行了详细分析，最后在PSpice软件平台上搭建基于双线电压调制的辅助谐振换流矩阵变换器仿真模型。仿真结果验证了理论分析的正确性。

1 主电路拓扑及工作原理分析

基于辅助谐振换流的矩阵变换器主电路拓扑如图1所示。

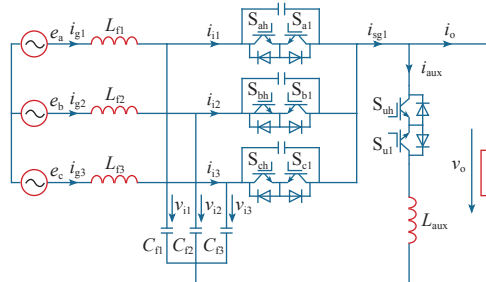


图1 基于辅助谐振换流的矩阵变换器主电路拓扑

辅助谐振换流型矩阵变换器比传统矩阵变换器多了一组辅助桥臂，用来为主电路提供双向开关换流通路。由一组双向开关和辅助续流电感串联而成，具有双向导通和阻断电压的能力，仅在主开关短暂的换流过程才需要导通。输入滤波电容 C_{f1} 、 C_{f2} 和 C_{f3} 为输出电压提供虚拟地电位，辅助换流桥臂连接在输出电压和虚拟地之间。

1.1 主电路换流策略分析

辅助谐振换流矩阵变换器的工作原理建立在对输入电压的分区和输出电流的方向上，输入电压分区示意图如图2所示。

每个工作周期内，根据输入三相相电压瞬时值的大小，将输入电压分区。



李建霞/实验师

关键词/Keywords

辅助谐振换流极 ·
软开关 ·
矩阵变换器 ·

秦皇岛市科学技术研究与发展计划(201401A009)。

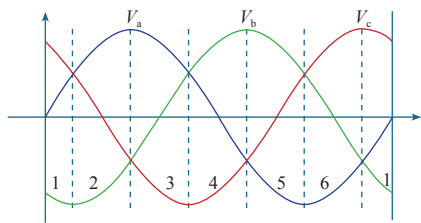


图2 电压分区示意图

分区原则为：三相电压的瞬时值大小关系保持不变，即每个工区间内，在三相电压的交叉点作区间划分。具体分区如表1所示。

表1 输入电压区间划分表

电压区间	输入电压相位	三相电压关系
1	$330^\circ < \omega t < 30^\circ$	$V_c > V_a > V_b$
2	$30^\circ < \omega t < 90^\circ$	$V_a > V_c > V_b$
3	$90^\circ < \omega t < 150^\circ$	$V_a > V_b > V_c$
4	$150^\circ < \omega t < 210^\circ$	$V_b > V_a > V_c$
5	$210^\circ < \omega t < 270^\circ$	$V_b > V_c > V_a$
6	$270^\circ < \omega t < 330^\circ$	$V_c > V_b > V_a$

辅助谐振换流矩阵变换器的换流过程由以下两种换流方式完成，即ARCP辅助谐振换流过程和吸收电容强迫换流过程（Capacitive commutation）。ARCP换流过程有辅助换流开关参与换流过程。吸收电容强迫换流过程中，辅助谐振开关不参与，双向开关并联电容参与换流过程。换流原则为：换流相电压差 $V_{cha} > 0$ 、输出电流 $I_o > 0$ 时，采用吸收电容强迫换流。电压差 $V_{cha} > 0$ 、输出电流 $I_o < 0$ 时，采用ARCP辅助谐振换流方法。电压差 $V_{cha} < 0$ 、输出电流 $I_o < 0$ 时，采用吸收电容强迫换流。电压差 $V_{cha} < 0$ 、输出电流 $I_o > 0$ 时，采用ARCP辅助谐振换流方法。具体开关换流序列列表如表2所示。表2中，a表示ARCP换流，c表示吸收电容强迫换流过程。

1.2 主电路工作原理

以输入电压在第一扇区为例分析主电路拓扑工作原理。因为输出电流为正与输出电流为负两种状态下的工作状态是对称的。故只分析输出电流 $I_o > 0$ 的工作状态。

工况条件为 $V_c > V_a > V_b$ ， $I_o > 0$ ；换流过程为 $S_{bh} \xrightarrow{a} S_{ch} \xrightarrow{c} S_{ah} \xrightarrow{c} S_{bh}$ 。

为分析简单，作如下假设：①输入滤波电容

表2 双向开关换流序列表

输入电压 区间	输出电流 方向	开关序列及换流方式	
		a (ARCP)	c (Capacitive commutation)
1	$I_o > 0$	$S_{bh} \xrightarrow{a} S_{ch} \xrightarrow{c} S_{ah} \xrightarrow{c} S_{bh}$	
	$I_o < 0$	$S_{cl} \xrightarrow{a} S_{bl} \xrightarrow{c} S_{al} \xrightarrow{c} S_{cl}$	
2	$I_o > 0$	$S_{bh} \xrightarrow{a} S_{ah} \xrightarrow{c} S_{ch} \xrightarrow{c} S_{bh}$	
	$I_o < 0$	$S_{al} \xrightarrow{a} S_{bl} \xrightarrow{c} S_{cl} \xrightarrow{c} S_{al}$	
3	$I_o > 0$	$S_{ch} \xrightarrow{a} S_{ah} \xrightarrow{c} S_{bh} \xrightarrow{c} S_{ch}$	
	$I_o < 0$	$S_{al} \xrightarrow{a} S_{cl} \xrightarrow{c} S_{bl} \xrightarrow{c} S_{al}$	
4	$I_o > 0$	$S_{ch} \xrightarrow{a} S_{bh} \xrightarrow{c} S_{ah} \xrightarrow{c} S_{ch}$	
	$I_o < 0$	$S_{bl} \xrightarrow{a} S_{cl} \xrightarrow{c} S_{al} \xrightarrow{c} S_{bl}$	
5	$I_o > 0$	$S_{ah} \xrightarrow{a} S_{bh} \xrightarrow{c} S_{ch} \xrightarrow{c} S_{ah}$	
	$I_o < 0$	$S_{bl} \xrightarrow{a} S_{al} \xrightarrow{c} S_{cl} \xrightarrow{c} S_{bl}$	
6	$I_o > 0$	$S_{ah} \xrightarrow{a} S_{ch} \xrightarrow{c} S_{bh} \xrightarrow{c} S_{ah}$	
	$I_o < 0$	$S_{cl} \xrightarrow{a} S_{al} \xrightarrow{c} S_{bl} \xrightarrow{c} S_{cl}$	

C_{f1} 、 C_{f2} 和 C_{f3} 无限大，主电路虚拟地电位无偏移；②负载电流 I_o 在整个换流过程中幅值和方向保持不变，等效为一个理想电流源；③忽略谐振支路等效串联阻抗的影响。

基于以上假设，主电路拓扑一个工作周期可以分为八个工作状态，如图3所示。

1) 初始阶段 ($t_0 \sim t_1$)。B相开关 S_{bh} 处于开通状态，负载电流流经 S_{bh} 、二极管VD，然后流经负载，主电路拓扑处于稳定工作状态。

2) 充电阶段 ($t_1 \sim t_2$)。 t_1 时刻，给辅助开关 S_{ul} 开通信号， S_{ul} 开通， V_b 电压加到谐振电感 L_{aux} 两端，随着谐振电感上的电流 i_{aux} 被逐步充电到 I_o ， S_{bh} 上的电流 I_{i2} 逐步减小为零。然后， i_{aux} 继续被充电到 I_{ch} ， I_{ch} 超过 I_o 的部分被称为过冲电流 I_{boost} 。 I_{boost} 对于软开关的实现十分必要，其可以确保电容上电压可以谐振到零。

3) 谐振阶段 ($t_2 \sim t_3$)。 S_{bh} 在 t_2 时刻关断，然后 L_{aux} 与电容 C_c 、 C_b 形成谐振， i_{aux} 放电。

4) 放电阶段 ($t_3 \sim t_4$)。 t_3 时刻， C_c 上电压 V_c 谐振为零时，打开开关 S_{ch} ，C相开关实现零电压开通。 I_c 上电流逐渐加大，同时， i_{aux} 继续放电至零，实现辅助开关零电流关断。至此，由B相到C相的辅助谐振换流过程完成。

5) 稳态阶段 ($t_4 \sim t_5$)。 C相开关 S_{ch} 处于开通

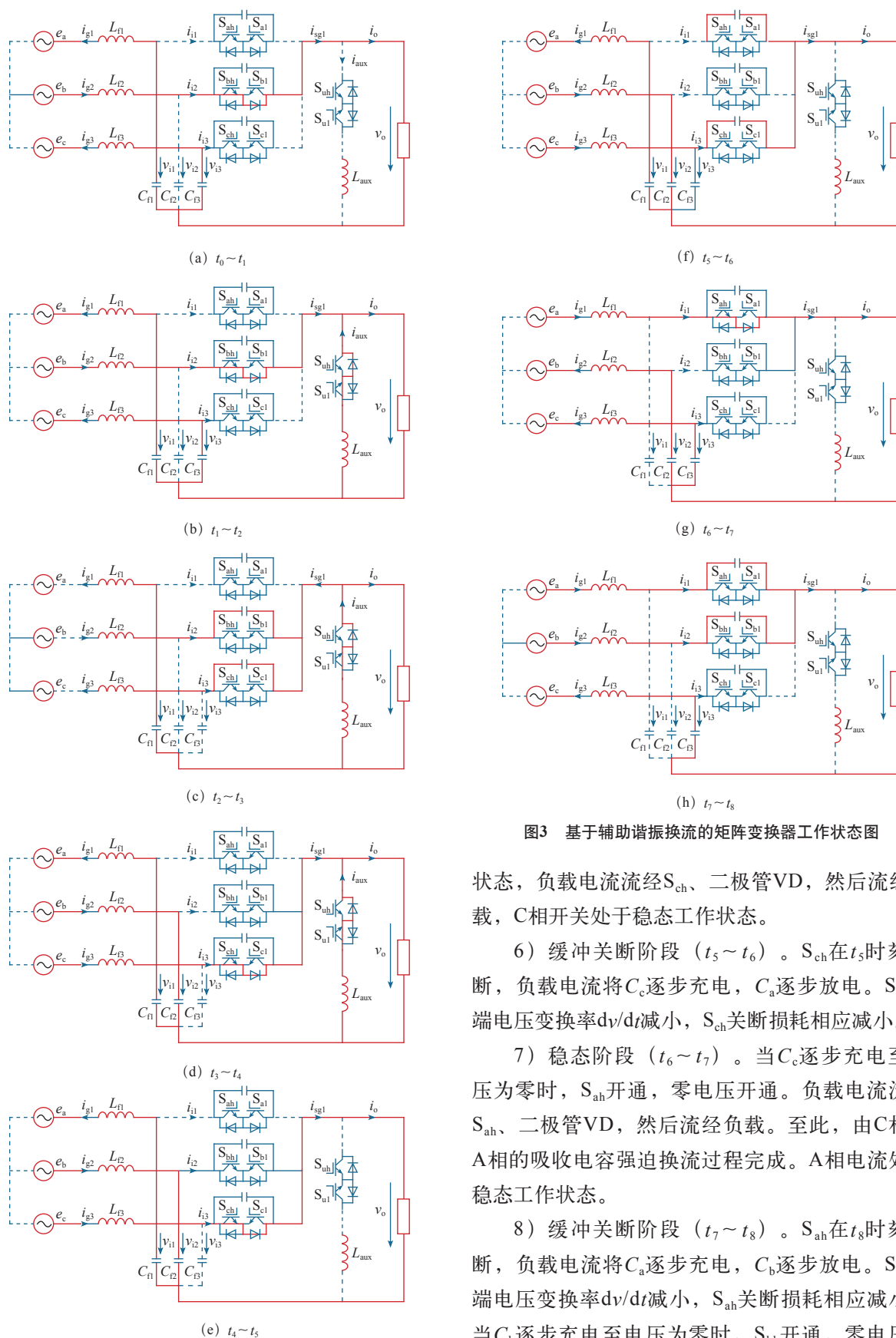


图3 基于辅助谐振换流的矩阵变换器工作状态图

状态, 负载电流流经 S_{ch} 、二极管 VD , 然后流经负载, C 相开关处于稳态工作状态。

6) 缓冲关断阶段 ($t_5 \sim t_6$)。 S_{ch} 在 t_5 时刻关断, 负载电流将 C_c 逐步充电, C_a 逐步放电。 S_{ch} 两端电压变换率 dv/dt 减小, S_{ch} 关断损耗相应减小。

7) 稳态阶段 ($t_6 \sim t_7$)。 当 C_c 逐步充电至电压为零时, S_{ah} 开通, 零电压开通。 负载电流流经 S_{ah} 、二极管 VD , 然后流经负载。 至此, 由 C 相到 A 相的吸收电容强迫换流过程完成。 A 相电流处于稳态工作状态。

8) 缓冲关断阶段 ($t_7 \sim t_8$)。 S_{ah} 在 t_8 时刻关断, 负载电流将 C_a 逐步充电, C_b 逐步放电。 S_{ah} 两端电压变换率 dv/dt 减小, S_{ah} 关断损耗相应减小。 当 C_b 逐步充电至电压为零时, S_{bh} 开通, 零电压开

通,进入下一个稳定工作状态。至此,由A相到B相的吸收电容强迫换流过程完成。B相电流处于稳态工作状态。一个工作周期完成。

综上所述,整个主电路拓扑的工作过程中,辅助开关为零电流关断,主开关为零电压开通,能实现矩阵变换器的软开关换流,从而降低主电路拓扑的开关损耗,提高效率。

2 仿真结果分析

根据以上分析,采用矩阵变换器调制策略中常用的双线电压调制策略,利用PSpice软件平台,搭建基于辅助谐振换流的矩阵变换器仿真模型,进行仿真研究。仿真参数:输入电压有效值为110 V,开关频率为8 kHz,辅助谐振电感 $L_{aux}=4\text{ }\mu\text{H}$,输入滤波电容 $C_{f1}=C_{f2}=C_{f3}=3.3\text{ nF}$ 。仿真结果如图4所示。从图4a可以看出,输入三相电流正弦度很高,且能达到电流给定值。图4b为负载上输出电压和输出电流波形,可以看出,电流可以较好地跟踪电网电压,输出电压波形能够满足给定要求,输出电压、电流性能比较理想。

3 结束语

针对基于辅助谐振换流的矩阵变换器进行研究。首先分析了辅助谐振换流的原理及特点,依据输入电压分区和输出电流的方向,推导出基于辅助谐振换流的矩阵变换器双向开关换流序列列表。然后对辅助谐振换流矩阵变换器的工作原理和软换流过程进行了详细分析。PSpice软件仿真结果表明,采用辅助谐振换流的开关换流策略,矩阵变换器可以实现稳定的工作状态,对矩阵式逆变器换流技术的研究有一定的参考价值。

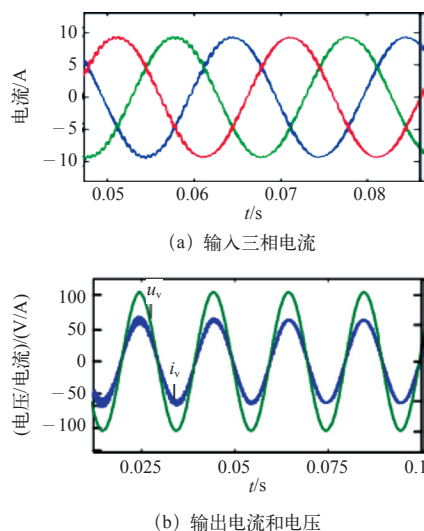


图4 基于辅助谐振换流的矩阵变换器仿真结果

参考文献

- [1] 张承慧,周廷,杜春水,等.基于FPGA的高频链逆变器控制电路的设计[J].电力电子技术,2006,40(3):39-41.
- [2] 孙向东,钟彦儒,任碧莹,等.三相高频链周波变流器的控制方法研究[J].电工电能新技术,2003,2(4):65-68,76.
- [3] 闫朝阳,王亚林,李建霞,等.三相高频环节逆变器带BLDCM负载原理研究[J].电力电子技术,2014,48(6):56-58.
- [4] De Doncker R W, Lyons J P. The auxiliary resonant commutated pole converter [C]. Industry Applications Society Meeting, 1990(2):1228-1235.
- [5] Teichmann R, Oyama J, Yamada E. Control design for auxiliary resonant commutated matrix converter [C]. EPE-PEMC, Kosice, Slovakia, 2000:15-23.

(收稿日期:2016-03-31) EA

www.eage.com.cn

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告