一种三重化三相桥式全控整流电路的研究

三相桥式全控整流电路的输出电压在一个电源周期内有6个脉波，而三重化三相桥式全控整流电路能将一个周期内的脉波次数提高到18次。由于脉波数的提高，基于所提出的三重化整流电路构成的交－交变频电路的输出频率也相应地得到提高，因此可以适应更大调速范围的要求。利用Matlab对三重化三相桥式全控整流电路进行建模，并对不同控制角情况下的电路输出电压波形进行仿真分析，推导出串联三重化三相桥式全控整流电路输出电压与触发移相角之间的关系。

汪　满[1,2]　许正望[1,2]　吴铁洲[1,2]/1.湖北工业大学电气与电子工程学院
2.湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

汪　满/硕士研究生

关键词/Keywords
三重化·
整流电路·
交－交变频·
Matlab·

在变频器领域，利用以IGBT为代表的全控器件为核心构成的产品具有功率因数高、谐波少等优点，但也存在着器件价格高、比较娇气的缺点；以传统晶闸管为核心构成的产品则正好与之相反，尤其在国内完全掌握晶闸管制造技术的情况下，以晶闸管构成的变频器在某些场合具有优势[1-3]。

以晶闸管构成的交－交变频器传统的电路构成形式为反并联的三相零式整流电路或三相桥式整流电路，其输出波形中每个电源周期（20 ms）内脉波数目较少（分别为3和6个），在保证输出波形中谐波含量较少的情况下，变频器输出频率受到限制，一般最高只能输出到20 Hz左右[4]。

为了确保交－交变频器能够输出最高频率，需要使整流电路在每个电源周期内输出的脉波数增加。达到这样的目的需要使用多重化技术，多重化技术除了可以提高变频器输出频率外，还可以同时提高变频器容量。选择并联多重化可提高输出电流能力，而选择串联多重化则可以提高系统工作电压等级。

国家自然科学基金资助项目（51247004）。

本文以串联三重化三相桥式全控整流电路为例，对多重化整流电路进行分析，利用 Matlab对该串联三重化三相桥式全控整流电路建模[5-7]，对不同控制角情况下的电路输出电压波形进行仿真分析，并推导出整流电路输出电压与触发移相角之间的关系。

串联三重化三相桥式全控整流电路

为简化分析，首先将交－交变频器中反并联的两组晶闸管中的一组（如P组）独立出来，如图1所示，可以看出此电路为3个三相桥式全控整流电路串联在一起，组成串联三重化三相桥式全控整流电路。

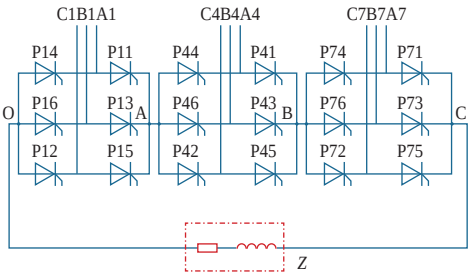

图1　串联三重化三相桥式全控整流电路简图

图中，Z为阻感负载；C1B1A1、C4B4A4和C7B7A7为三组互差20°的三相电源，分别给三重晶闸管供电，相序均为ABC。按照传统三相全控整流桥中晶闸管的导通顺序对电路中各个晶闸管编号，用P表示P组晶闸管，其后的第一个数字与对应三相电源序号相同，第二个

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数字为组内编号。

为叙述方便，将第一、二和三重分别按三相电源序号称为1、4和7。从晶闸管编号的第一个数字即可看出该晶闸管是属于第几重，第二个数字则可看出该晶闸管为该重中第几号，比如P14为P组第1重第4号管。

晶闸管的导通顺序分析

由于串联三重化三相桥式全控整流电路结构比较复杂，含有众多晶闸管，在没有任何文献介绍该电路工作原理的情况下，在研究过程中甚至不知道各个晶闸管的导通顺序。由于不了解导通顺序，就不可能正确地给各个晶闸管发送触发脉冲，而没有正确的触发脉冲则电路不可能正常工作，即使是仿真也无法进行。

为了解决这个问题，将图1所示的串联三重化三相桥式全控整流电路中所有的晶闸管更换为二极管，即将全控整流电路变成不控整流电路，从而模拟全控整流电路在触发延迟角$\alpha=0°$时的工作情况，通过这种情况下的仿真分析确定各个晶闸管的导通顺序。

应用Matlab的可视化仿真工具Simulink对修改过的串联三重化三相桥式不控整流电路进行建模，仍使用各个晶闸管的标号标注取代其对应的二极管，通过仿真将每个二极管上的电压波形取出并组合，最终结果如图2所示。

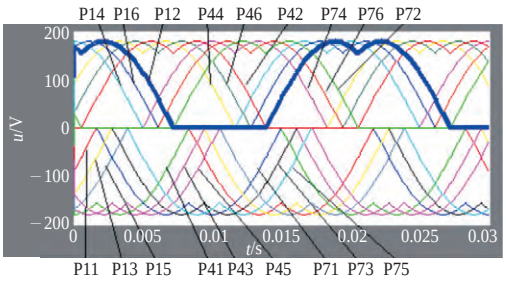

图2　二极管上的电压波形

蓝色粗线波形是P12号管子上的电压波形，相邻左边两波形是P14和P16，为第一重中共阳的3只二极管上的波形，其他波形如图中标注所示。

当电压为0时，说明二极管是导通的，那么由此图可得到所有管子的导通情况如表1所示。

表1　串联三重化三相桥式不控整流电路二极管导通情况

1	P16	P12	P14	P16
	P11	P13	P15	
2	P46	P42	P44	P46
	P45	P41	P43	P45
3	P76	P72	P74	P76
	P75	P71	P73	P75

表1中，第1部分以两行的形式表示第一重整流桥中6只二极管的工作顺序，上面一行表示该重中共阳的3只二极管轮流导通情况，下面一行则为共阴的3只二极管轮流导通情况，任何时候在该三相不控整流桥中有共阳和共阴的各一只二极管导通；第2部分以两行的形式表示第二重二极管的工作顺序，较第一重滞后20°（表中每个最小的小格占电角度20°）；第3部分以两行的形式表示第三重二极管的工作顺序，较第二重再滞后20°。

可以看出，在各重之内二极管按1、2、3、4、5和6的顺序投入工作，三重的二极管则轮流间隔投入工作，每当有新的二极管投入工作时，会有一个原工作中的二极管退出工作。

根据以上分析可知，各重的整流桥工作方式与独立的三相整流桥工作方式一致，因此将所有二极管恢复成晶闸管后，各重的工作方式与独立的三相全控整流桥工作方式也一致，再综合表1中二极管导通情况，可以得到串联三重化三相桥式全控整流电路晶闸管导通顺序，其工作情况如表2所示。

表2中，第1部分为串联三重化三相桥式全控整流电路中新投入工作晶闸管的标号，为一个完整周期，可知在各重之内需要对晶闸管按1、2、3、4、5和6的顺序进行触发，三重的晶闸管则轮流间隔触发，与不控整流电路中二极管导通顺序一致。

第2部分为一个周期中各个时间段中工作的晶闸管情况，结合表1中三重二极管工作顺序可知，串联三重化三相桥式全控整流电路中任何时刻都有6只晶闸管导通。由于是串联电路，为保持电流通路连续，防止因某个晶闸管断流导致触发新晶闸管无法触通的情况，则每次发送触发脉冲时给电流通路上6只晶闸管（含原导通晶闸管和新导通晶闸管）均发一次触发脉冲，从而保证电流通路的完整。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 串联三重化三相桥式全控整流电路晶闸管工作情况

1	P11	P41	P71	P12	P42	P72	P13	P43	P73	P14	P44	P74	P15	P45	P75	P16	P46	P76
2	P16	P16	P16	P12	P12	P12	P12	P12	P12	P14	P14	P14	P14	P14	P14	P16	P16	P16
	P11	P11	P11	P11	P11	P11	P13	P13	P13	P13	P13	P13	P15	P15	P15	P15	P15	P15
	P46	P46	P46	P46	P42	P42	P42	P42	P42	P42	P44	P44	P44	P44	P44	P44	P46	P46
	P45	P41	P41	P41	P41	P41	P41	P43	P43	P43	P43	P43	P43	P45	P45	P45	P45	P45
	P76	P76	P76	P76	P76	P72	P72	P72	P72	P72	P72	P74	P74	P74	P74	P74	P74	P76
	P75	P75	P71	P71	P71	P71	P71	P71	P73	P73	P73	P73	P73	P73	P75	P75	P75	P75

串联三重化三相桥式全控整流电路建模及仿真分析

1. 建模

根据以上分析，串联三重化三相桥式全控整流电路中的3个三相桥式全控整流电路工作方式与独立的三相桥式全控整流电路工作方式一致，可以将3个三相桥式全控整流电路的仿真模型串联起来，从而得到串联三重化三相桥式全控整流电路的仿真模型，如图3所示。

2. 参数设置

在本仿真模型中，三相电源电压设置为126.67 V，频率设置为50 Hz，三相之间相位互差120°，三重之间相位互差20°。变换器桥设置相当于6个晶闸管，只要有适当的触发信号，便可以使变换器在对应的时刻导通。设置同步电压的频率跟脉冲宽度分别为50 Hz和10°，“alpha_deg”是移相控制角信号输入端，通过设置输入信号给其常数模块参数便可以得到不同的触发角α，从而产生间隔60°的双脉冲去触发变换器桥。

选择算法为ode23tb，Stop Time 设为0.03。设置电路负载为阻感性，$R=5\ \Omega$，$L=0.03$ H。根据串联三重三相桥式全控整流电路的原理设置不同的触发延迟角，并对输出电压的影响进行仿真分析。

3. 仿真结果及分析

当触发延迟角α分别为0°、30°、60°和90°时，三重电路各输出端（分别对应图1中A、B、C点相对与O点）电压波形如图4所示。

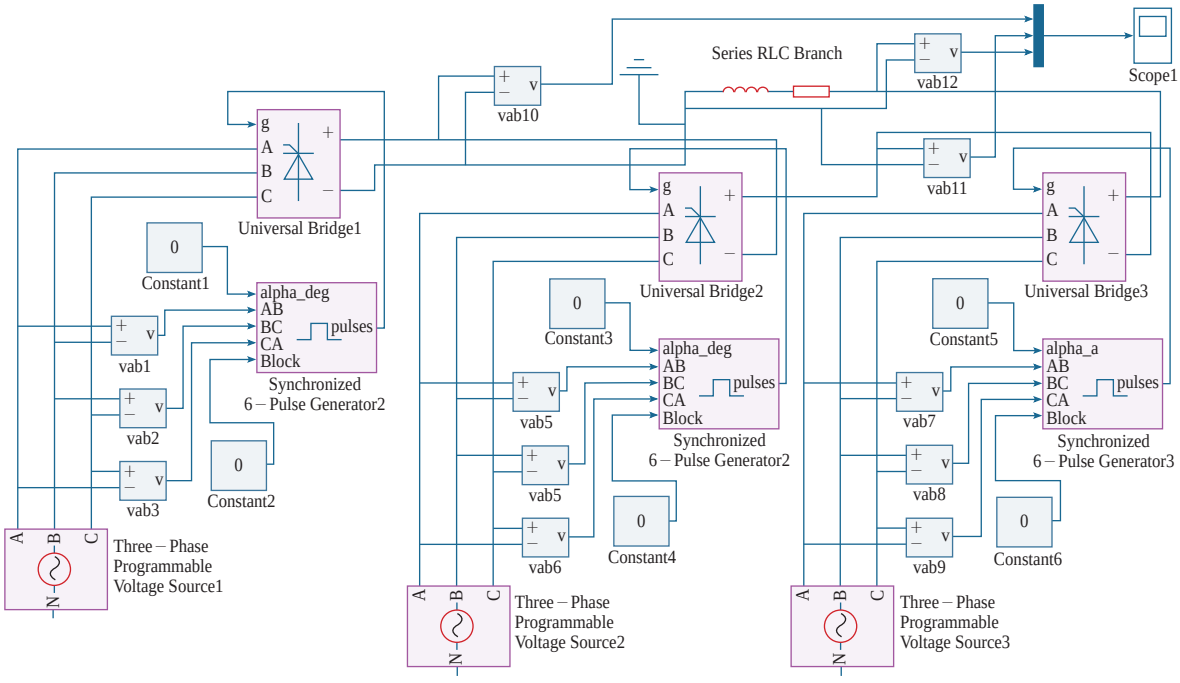

图3 串联三重化三相桥式全控整流电路仿真模型

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

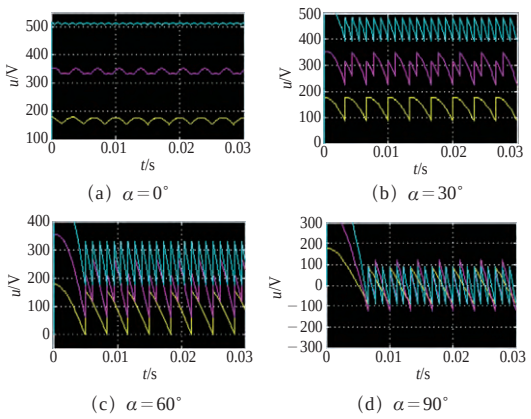

图4　三重电路各输出端电压波形

观察不同触发角情况下的三重电路输出端电压波形可以看出，随着触发角的增加，各重输出电压均减小。第一重的输出电压在一个电源周期（20 ms）内有6个波头，且各个波头大小均相同；第二重的输出电压在一个电源周期内有12个波头，各个波头呈现一大一小间隔排列的规律，其成因在于三重的三相电源之间互差20°，对应到二重则互差为20°和40°，在工作中有一重的晶闸管导通20°，而另一重的晶闸管则导通40°，故波头一大一小；第三重的输出电压在一个电源周期内有18个波头，由于各重的三相电源之间互差20°，这18个波头均大小相同。

三重化后整流电路的输出脉波次数为原来的3倍，由此可知，以三重化后的整流电路为基础构成的交－交变频电路可以将最高输出频率提高到原来的3倍，即60 Hz左右。

串联三重化三相桥式全控整流电路输出电压分析

1. 三相桥式全控整流电路输出电压

通过上述仿真分析可以直观地看出，随着触发角的增加，串联三相桥式全控整流电路输出电压会减小，但不能看出其具体的函数关系。根据传统三相桥式全控整流电路分析理论，三相桥式全控整流电路输出电压的波形在一周期内脉动6次，且每次脉动的波形相同，因此在计算其平均值时，只需要对一个脉波（即1/6周期）进行计算即可[1]。于是可得到当整流输出电流连续时（即阻感负载时）的平均值为

$$U_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t \, d\omega t = 2.34 U_2 \cos \alpha \qquad (1)$$

式中，U_2为变压器二次侧线电压有效值；α为触发延迟角。

2. 串联三重化三相桥式全控整流输出电压

由于三重化后输出电压在一个周期内脉动18次，使用类似于传统三相桥式全控整流电路的推导方法可以推导出三重化后的电压输出平均值。根据前述仿真分析可知，在串联三重化三相全控整流桥中，3个三相全控整流桥的工作方式与独立的三相全控整流桥一致，整个三重化电路的输出电压为3个整流桥独立输出电压的叠加。当触发角$\alpha=30°$时，由Matlab仿真得到3个整流桥各自输出电压波形如图5所示，分别为图1中A点对O点、B点对A点以及C点对B点的电压，各个波形形状与独立三相全控整流桥输出电压波形一致，只是由于各个三相整流电路的电源互差20°，使这三个整流桥输出电压的波形也互差20°。

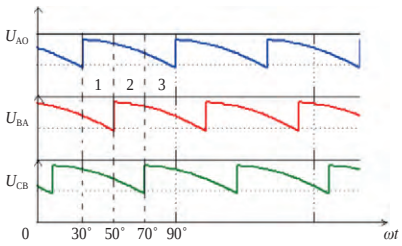

图5　触发延迟角为30°时各重输出电压波形

由图5可知，当各重电源电压相等时，在一个电源周期（20 ms）内，三重化整流电路输出电压波形有18个脉波，计算该整流电路输出电压平均值时只需要计算一个脉波即可。取图5中对应脉波的一个时间片段，如图中“1”所标记的区间（即图中30°～50°范围），在这个区间里三重化电路的输出电压平均值为图中3个波形在这个区间的积分之和对积分区间的平均。从图中很容易看出，3个波形在区间“1”内积分之和等于第一个波形在区间1、2和3内的积分之和，因此，当整流输出电流连续时（即带阻感负载时），串联三重化三相全控整流桥输出电压的平均值为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$
\begin{aligned}
U_{\mathrm{d}} &= \frac{1}{\frac{\pi}{9}}\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{\pi}{9}}[\sqrt{6}U_2\sin\omega t+\sqrt{6}U_2\sin(\omega t-\frac{\pi}{9})+\sqrt{6}U_2\sin(\omega t-\frac{2\pi}{9})]\mathrm{d}\omega t \\
&= \frac{1}{\frac{\pi}{9}}[\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{\pi}{9}}\sqrt{6}U_2\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t+\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{\pi}{9}}^{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{2\pi}{9}}\sqrt{6}U_2\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t+\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{2\pi}{9}}^{\frac{\pi}{3}+\alpha+\frac{\pi}{9}}\sqrt{6}U_2\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t] \\
&= \frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha}\sqrt{6}U_2\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t \\
&= 7.02U_2\cos\alpha
\end{aligned}
\tag{2}
$$

可以看出，在变压器二次电压相同的情况下，串联三重化三相桥式全控整流电路的输出电压为普通三相桥式全控整流电路输出电压的3倍，因此通过串联多重化技术可以提高电路的工作电压；或者在输出电压相等的情况下，降低变压器二次电压，从而可以降低对晶闸管及相关器件的耐压要求。

结束语

通过将串联三相全控整流电路中的所有晶闸管替换为二极管并仿真的方法，得到了串联三相整流电路中各管导通的顺序，从而解决了阻碍后续研究的问题。在Matlab/Simulink中对串联三重化三相桥式全控整流电路进行建模，并在不同触发延迟角的情况下，仿真该电路各重输出的电压波形，从而获得该电路工作情况的一个直观认识，也从侧面验证了前述晶闸管导通顺序分析的正确性。在仿真研究的基础上，结合传统三相全控整流电路的理论分析方法，对串联三重化三相桥式全控整流电路的输出电压与触发角之间的关系进行了理论推导，得到了二者之间的函数关系式。

将另外一组和P组一样的电路（N组）与P组电路反并联相连接，组成了三重化单相交－交变频电路。按照类似传统交－交变频的方法控制触发角的变化，可以得到想要的输出正弦波。将3个这样的单相交－交变频电路以三角形或星形方式联结，则可以得到三相交－交变频电路[8-11]。三重化后的变频电路输出频率可以提高到约60 Hz，其适应的工作范围更广。

参考文献

[1] 王兆安，刘进军．电力电子技术 [M]．5版．北京：机械工业出版社，2009：34-37．

[2] 徐德鸿，陈治明，李永东，等．现代电力电子学 [M]．北京：机械工业出版社，2013：70-77．

[3] 潘孟春，张玘，陈长明，等．电力电子与电气传动 [M]．长沙：国防科技大学出版社，2006：21-23．

[4] 陈坚，康勇．电力电子学 [M]．3版．北京：高等教育出版社，2011：189-207．

[5] 李传琦．电力电子技术计算机仿真实验 [M]．北京：电子工业出版社，2006：86-92．

[6] 王晶，翁国庆，张有兵．电力系统的MATLAB/SIMULINK仿真与应用 [M]．西安：西安电子科技大学出版社，2008：166-171．

[7] 洪乃刚．电力电子和电力拖动控制系统MATLAB的仿真 [M]．北京：机械工业出版社，2006：144-155．

[8] Ghosh R，Narayanan G．Control of three-phase，four-wire PWM rectifier [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2008，23 (1)：96-106．

[9] Bimal K Bose．现代电力电子学与交流传动 [M]．王聪，译．北京：机械工业出版社，2013：119-144．

[10] 华明，胡海兵，邢岩，等．一种变频器并联运行的分布式控制方法 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (24)：48-53．

[11] 刘华林，冯高明，王海军．基于Matlab的双变量6脉波交-交变频器特性研究 [J]．电气传动，2009，39 (231)：32-35．

（收稿日期：2015－12－15）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net