「建模仿真」

基于DSP的中心点钳位型三电平逆变器仿真控制研究

文/浪潮电子信息产业股份有限公司　张立功　殷飞平　张明智　范长征　杨　辰

针对中心点钳位型三电平逆变器进行了研究，建立了系统的高频数学模型，采用优化的三电平SVPWM算法，使用MATLAB／Simulink进行了仿真试验，并在DSP中将两电平逆变器的电压空间矢量控制算法应用于三电平逆变器中。采用优化的SVPWM算法，减小了开关损耗。简化了参考电压矢量所在扇区的确定及基本矢量的选择和作用时间的计算，为有效控制三电平逆变器奠定了基础。根据负载电流方向和直流侧电容电压的大小，通过改变电压调整系数调整正负小矢量的作用时间来控制中点电位平衡。

在电压型逆变器中，传统的基本都是两电平逆变器。两电平逆变器的最大缺点是要受开关管功率和耐压的限制，对于高压大功率场合不适用。随着电力系统直流输电、有源电力滤波器、无功补偿及高压大功率交流电动机变频调速和新能源发电等系统发展的需要，20世纪80年代，多电平逆变器开始出现，并受到人们的关注。

三电平逆变器作为一种高压大容量功率设备，在电路拓扑结构上克服了传统两电平逆变器的诸多缺点，具有输出波形质量高，开关频率低，开关器件承受的电压应力小，系统效率高等优点，而且其较小的du/dt对电机绝缘也十分有利。

三电平逆变器的拓扑结构

中心点钳位三电平逆变器是由日本学者A.Kira Nabae 等人1980年提出的，其三相电路的拓扑结构如图1所示。

图中是一个三相二极管中点钳位三电平逆变器主电路结构，图中U_{dc}为直流侧电压，V_{x1}、V_{x2}、V_{x3}、V_{x4}（$x=a$，b，c）为功率开关管，每个功率开关管均带有一个续流二极管，D_{x1}、D_{x2}（$x=a$，b，c）为钳位二极管，C_{dc1}、C_{dc2}为分压电容，A、B、C、O点分别为A相、B相、C相的电压输出端和输出电压参考点，R_x、L_x分别为输出端的电阻和电容。由于分压电容$C_{dc1}=C_{dc2}$，在系统均压平衡时，有$V_{dc1}=V_{dc2}=U_{dc}/2$，带有反并联二极管的开关V_{x1}、V_{x2}、V_{x3}、V_{x4}（$x=a$，b，c）中，V_{x1}和V_{x3}、V_{x2}和V_{x4}互补。

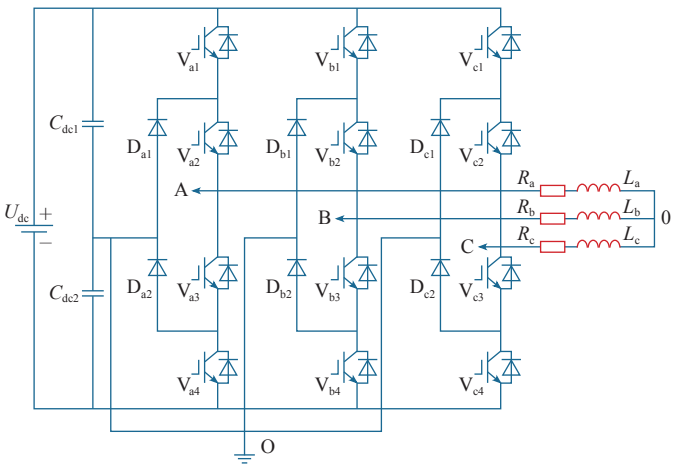

图1　二极管钳位型三电平三相逆变电路拓扑结构

桥臂相对于O点的电压和开关管的导通状态的对应关系如表1所示。由表1可以看出，当开关管的开关状态不同时，桥臂可以输出三种电位，$U_{dc}/2$、0、$-U_{dc}/2$。采用合适的PWM调制方法，就可以获得显著优于两电平逆变器的输出波形。

表1　桥臂相对于O点的电压和开关管的导通状态的对应关系

开关状态	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{x4}
$U_{dc}/2$	开	开	关	关
0	关	开	开	关
$-U_{dc}/2$	关	关	开	开

所谓三电平逆变器就是指逆变器的桥臂电压输出有三种电平——“+1”、“−1”和“0”。下面以A相桥臂为例，对上表的数据进行解释，4个功率开关管V_{a1}、V_{a2}、V_{a3}、V_{a4}的不同开关组合决定了桥臂输出点A点的电平，以分压电容的中点O作为电压参考点。当V_{a1}、V_{a2}开关管导通，V_{a3}、V_{a4}开关管关断时，用U_{AO}表示A相桥臂的输出状态，U_{AO}等于$U_{dc}/2$，以此类推可得另外两种情况和另外两个桥臂的状态。

定义三电平电压空间矢量为

$$U=\frac{2}{3}\left(U_a+U_b e^{j2\pi/3}+U_c e^{j4\pi/3}\right) \qquad (1)$$

每相桥臂输出电压有3个值，因此三相三电平逆变器有27种电压状态组合，对应27种不同的逆变器开关状态。我们采用空间矢量分析方法将每种状态定义成一个矢量形式，这样就有了27个空间矢量，进一步进行*abc*坐标到*αβ*坐标变换做解耦分析，参考两电平逆变器空间矢量的分析方法，同样采用坐标变换的方法将*abc*坐标系中的矢量转换到*αβ*坐标系，即

$$\begin{pmatrix}U_\alpha\\U_\beta\end{pmatrix}=\frac{2}{3}\begin{pmatrix}1&-\frac{1}{2}&-\frac{1}{2}\\0&\frac{\sqrt{3}}{2}&-\frac{\sqrt{3}}{2}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}U_a\\U_b\\U_c\end{pmatrix} \qquad (2)$$

每一个桥臂矢量在*abc*坐标系中的坐标代入式（2）进行坐标变换，就可以得到27个桥臂矢量在*αβ*坐标平面中的矢量，将相同的矢量进行合并，发现在*αβ*坐标系中只有有19种不同的矢量。

逆变器系统的整体设计

逆变器系统由主电路、DSP2812控制器、驱动电路、AD信号采集电路等组成。其中，主电路采用DC/DC，DC/AC 两级结构；控制器以DSP2812为控制核心，一方面控制DC/DC 环节，以实现发电组件的最大功率点跟踪，另一方面控制DC/AC环节，以使直流母线电压稳定，并将电能转化为负载所需幅值和相位的电压。系统保证离网逆变器输出的正弦电流与电网的相电压同频同相。控制结构如图2所示。

上图中：U_N为负载所需电压，U_{dc}为发电组件

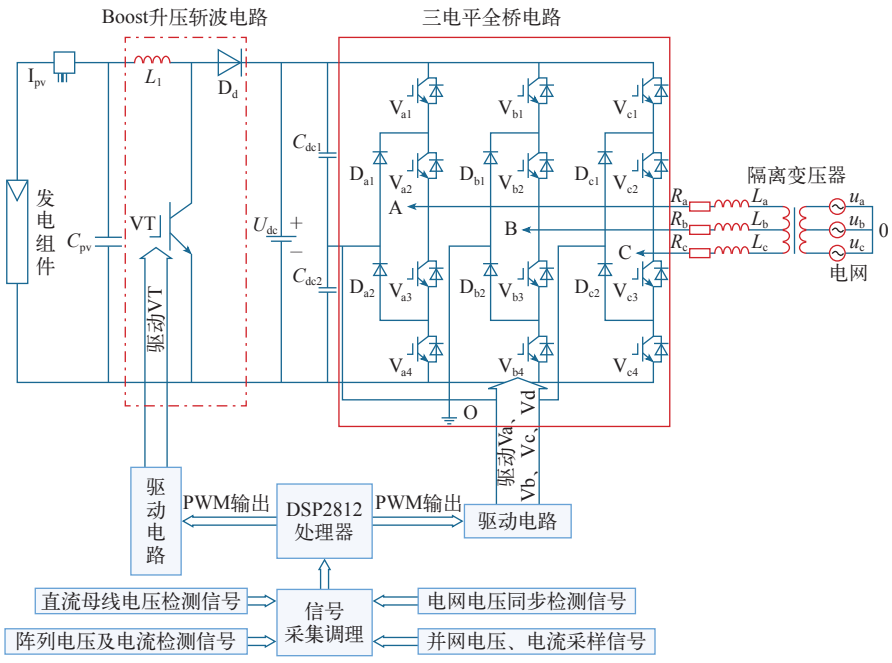

图2　三电平逆变器拓扑结构图

两端的电压经Boost电路升压后得到的稳定的直流电压（本系统发电组件和Boost主电路采用直流电源代替），此电压需经单相全桥电路进行逆变变为交流电，然后才能给指定负载供电，C_{pv}为稳压电容，D_d为直流侧的续流二极管，L_1为滤波电感。

优化的三电平SVPWM算法

传统三电平电压空间矢量控制方法大都采用将一个扇区分成4个小三角形，然后对总共24个小三角形分别求解出各个有效矢量作用时间的方法，从而加大了计算量，设计烦琐，影响了控制效果。这里对三电平电压空间矢量图进行了划分，以中矢量为界限，划分为6个60°的区域，其中的－30°～30°区域为1，30°～90°的区域为2，其他各个重叠区域依次类推，避免了进行重叠区域的判断，如图3所示。之后采用将三电平简化为二电平的控制算法，在判定参考电压空间矢量所在的60°区域后，对参考电压空间矢量进行修正，得到二电平控制算法中所需的参考电压矢量，实现以图3中所示实心黑点为基点的两电平控制。进而简化了参考电压矢量所在扇区的确定及基本矢量的选择和作用时间的计算，为有效控制三电平逆变器奠定了基础。

如图3所示。这里，一般将幅值为$2U_{dc}/3$的矢量定义为大电压矢量，如PNN，PPN；幅值为$\sqrt{3}U_{dc}/3$的矢量定义为中电压矢量，如PON；幅值为$U_{dc}/3$的矢量定义为小电压矢量，如POO，ONN。以上三类矢量可以分别简称为大矢量、中矢量和小矢量。本文中为了论述方便，从大矢量PNN开始，沿逆时针方向6个大矢量将空间矢量图依次分

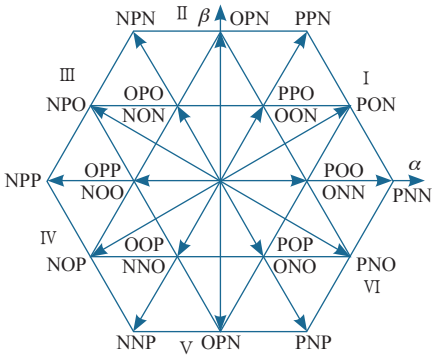

图3　三电平逆变器空间电压矢量图

为区域Ⅰ～Ⅵ。由图3可以看出，小矢量总是成对出现，它们对中点电压的作用刚好相反，这种特性在中点电压平衡的控制中将会得到应用。

电容中点电压平衡控制

三电平中点箝位式逆变器在运行过程中必须要保证其中点直流电压的平衡，否则负载中会出现偶次谐波，部分开关器件所承受的电压应力也将会增大，不利于逆变器装置的安全运行。由分析可知，中矢量是造成中点电位不平衡的最重要的根源，但对于中矢量无法直接实施控制，通常只能通过调整正负小矢量对的相对作用时间进行控制，所述系统采用参考文献中改变开关作用次序的方法加以控制，在此不赘述。

系统在MATLAB中的仿真及结果分析

1. 系统的仿真原理图

本文搭建了基于DSP2812模块下系统的硬件电路MATLAB电力电子仿真图如图4所示。

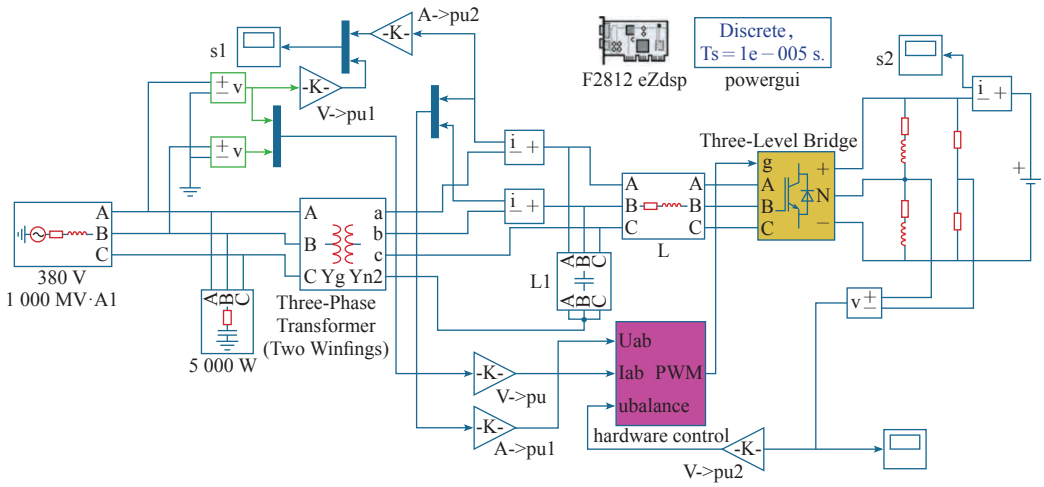

图4　系统仿真图

本文搭建了在DSP2812控制下系统的仿真控制原理图，仿真采用240 V直流电源代替发电组件，使用内部带有RL的三相电源模拟电网电压和相位，仿真设置电网线电压为380 V，功率为1 000 MV·A，利用三相RLC串联负载模拟用户端负载，中心点两侧电容大小为3 000 μF，仿真为了计算方便对数据进行了标幺化处理，如图中的A－＞pu2即为标幺化处理。本文采用DSP2812硬件控制模块，内部集成了系统的控制算法。三电平桥式电路IGBT门极输入PWM波形如图5所示，控制实验波形如图6所示。

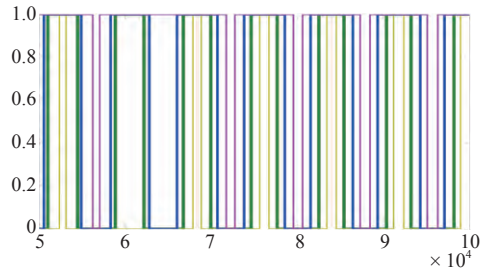

图5　三电平桥式电路IGBT门极输入PWM波形

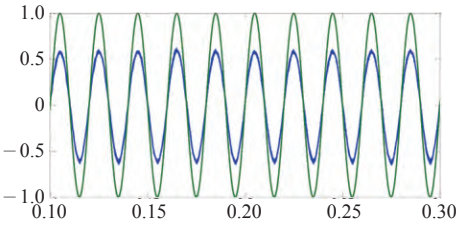

图6　并网电流跟踪电网电压仿真输出波形

2. 系统的仿真结果分析

在图5中共12路信号，分别控制12个IGBT的通断来控制并网电流，使之跟踪电网电压的相位；在图6中给出了标幺化后电网电压与逆变器输出并网电流的相位和频率，由图可见，跟踪效果满足要求，通过计算得到逆变器的输出功率因数约为0.96，完全满足实际需求，并且输出电流与电网电压的相位和频率基本一致，所以本系统的控制方法基本能保持输出电流与电网电压同频率、同相位，是一种较好的控制方法。

结束语

二极管钳位的三电平逆变器除了具有一般多电平逆变器的特点以外，还具有以下优点：便于双向功率流动，功率因素控制方便。存在的不足是直流侧电容均压较为复杂和困难。在二极管钳位多电平结构中，三电平逆变器的结构具有自动平衡的能力，是一种非常优异稳定的结构，目前实际应用中主要都是这种拓扑，本文也将其选为主要研究对象。

本文采用DSP2812为控制器进行仿真，采用优化的SVPWM算法进行控制。结果表明该方法简单易行，易于数字化实现，便于扩展应用到三电平整流及更多电平的逆变器中。EA

（收稿日期：2017.06.20）

（编辑：朱金凤）

（上接第112页）

3. 改造效果

本次线路改造仅对位于山区段大档距、高落差段进行了改造，有效减小了改造范围，降低了投资成本，改造方案具有较强的针对性。

改造后线路正常运行了2个覆冰季，通过在线监测装置发现线路覆冰厚度最大在32 mm，线路未发生跳闸和金具损坏情况，有效提高了线路抵抗覆冰的能力，减少了线路因覆冰跳闸对电网运行的影响。

结束语

总结出新疆地区750 kV线路发生线路覆冰区段的受微地形的影响、覆冰持续时间较短的两大特点。最后根据覆冰跳闸原因和覆冰特点提出了有针对性的改造方案并实施，经过2年的运行，线路虽然有覆冰，但未造成跳闸或金具损坏，证明线路改造的针对性的实用性。EA

（收稿日期：2017.05.30）

（编辑：刘群垚）