# 第一章 绪论

## 矩阵变换器的发展和研究现状

### 传统交流变换器

随着电力电子技术的发展，学者研究出了各种交流变换器，在经济生产中取得了重大的效益。然而传统的交流变换器存在一定的缺陷，比如间接式的交流变换器采用交-直-交的方式进行变频，直流侧采用大电容滤波，既增大了变换器的体积，同时降低了电路的可靠性，而且输入侧的电流不可控，产生大量的谐波，污染了电网环境；而采用反并联的三相晶闸管可控整流桥组成的直接式交-交变换器，输出频率的范围仅限制在小于输入的三分之一，输入功率因数低，且采用的晶闸管数量庞大【电力电子书】。因此，需要研制一种新型的交流变换器来解决传统变换器的缺点，其应涵盖一下优点：

1. 电路结构简单；
2. 输出频率和幅值可调节范围广；
3. 相对可等效为电阻，减小功率污染；
4. 电压和电流可逆；

### 传统矩阵变换器

矩阵变换器是一种新型的交流变换器，能够将多相输入变换成任意的多相输出，且不需要能量存储装置【control of matrix converter】。矩阵变换器具有如下的特征：

1. 电路结构紧凑；
2. 高质量的电压电流传递，无频率限制；
3. 能够产生正弦输入电流和单位功率因数；
4. 可以实现能量的双向流动；

这些特征很符合理想交流变换器的特性，因此矩阵变换器广泛地被学者所研究。

传统矩阵变换器(Conventional Matrix Converter)，简称CMC，最早在1979年由Venturini提出【1.20】。传统矩阵变化的功率电路由多个双向开关构成，在输入侧连接有低通滤波器，用于防止过电压的产生，抑制短路电流并消除输入电流中的高次谐波。然而传统矩阵变换器也存在一些缺点。双向开关通常由两个带有反并联二极管的开关管组成，在换流时考虑电流续流问题不能同时关断，又不能和下个导通开关重叠使电源短路，经研究后目前常用的方法为四步换流法【1.39】，但是使得控制的策略复杂且系统稳定性降低，不利于实现。

### 双级矩阵变换器

双级矩阵变换器（Two Stage Matrix Converter），简称TSMC，是矩阵变换器一种新型的拓扑结构，由Lixiang, Thomas. A Lipo于2001年首先提出【a novel matrix converter topology with simple commutation】。TSMC的结构和传统的交-直-交变换器结构相似，区别在于直流侧无储能元件。双级矩阵变换器输入侧为电流源整流器，输出侧为电压源逆变器，整体的功能和传统矩阵变换器相同，且较传统矩阵变换器有如下优点：

1. 输入侧的开关可以在零电流时导通和关断，所以可以避免换流问题；
2. 传统逆变器的脉宽调制算法可以直接采用，大大简化了控制电路；
3. 在一定条件下可以减少开关数量，降低成本；
4. 整流级可以带多个逆变级，减少成本；

因此，双级矩阵变换器比传统矩阵变换器更有研究意义。

## 直接转矩控制发展和研究现状

### 直接转矩控制发展

异步电机具有结构简单，可靠性高等特点，应用十分广泛，但是其动态模型复杂，导致其应用受限制。目前异步电机的控制策略有很多，如图1.1所示。

图1.1

对异步电机动态过程控制最广泛的控制方法是由Hasse【2.28】和Blaschke【2.5】提出的磁场定向控制，通过将异步电机方程转换至和转子磁场同步旋转的坐标系后，通过控制直轴和交轴的电流即可对磁链和转矩进行控制。在80年代中期，当学术界想要以磁场定向为异步电机控制标准时，Depenbrock【2.2】以及Takahashi和Noguchi【2.71】分别提除了以bang-bang控制代替磁链解耦的新型控制策略，即所谓的直接转矩控制。由于直接转矩控制的结构简单，适合功率变换器的开关工作模式，只使用定子参数从而对电机参数的依赖性小，此后获得了快速的发展。

### 直接转矩控制研究现状

目前直接转矩控制的形式有很多种，应用最多的几种方法如下【2】：

1. 查表法DTC: 预先确定在不同位置下各电压矢量对磁链的影响，并列出表格；控制时使用磁链和转矩滞环结果作为检索指数，查找到对应的开关信息输出，从而将磁链和转矩控制在给定的范围内；
2. 直接自控制：通过对三相定子磁链以及转矩的滞环控制，直接选择三个桥臂的开关状态，从而对磁链和转矩进行控制。直接自控制的开关频率低，转矩响应快，多用于大功率的牵引系统中；
3. 恒开关频率DTC: 采用滞环控制的DTC的开关频率不固定，而且采用数字控制器实现时磁链和转矩不能严格控制在环宽内，因此出现了固定开关频率的直接转矩控制。其实现方式可以采用闭环PI控制，预测控制或神经模糊控制，将转矩和磁链的误差转化为电压给定信号，从而可以应用脉宽调制技术。

### 转速观测器概述

异步电机的动态控制需要转速信息，通常的做法是安装速度传感器对转速直接采集，但是速度传感器的安装使得异步电机的体积和费用增大，同时在恶劣环境下的可靠性也下降，所以采用无位置传感器的转速观测器可以进一步改善电机的性能。对电机转速的观测方法有如下几种【3】：

1. 基于电机模型的转速观测：假设电机的所有参数已知，电机的转速可由异步电机的动态方程直接计算求得；
2. 模型参考自适应转速观测：模型参考自适应的原理是采用两种不同的电机模型预测同一个状态变量，两种模型一个包含电机转速作为参数，另一个不包含，将两个模型输出的状态量的差值经过自适应控制器生成转速的估计值，当差值为零时转速的估计值就和实际值相等；

## 论文的研究内容

论文第一章简单介绍了矩阵变换器的发展和研究现状，说明了双级矩阵变换器的优点；阐述了直接转矩控制的发展以及各种直接转矩的控制方式；针对速度传感器的缺陷提出了不依赖传感器的转速观测器；最后对论文的研究内容进行了简单的阐述。

第二章研究了双级矩阵变换器的拓扑结构和控制方法。在逆变级采用传统的空间矢量调制的情况下，对整流级的调制策略进行了深入地研究，分别采用无零矢量和有零矢量的方法进行了仿真，验证了理论的正确性。

第三章研究异步电机直接转矩控制策略。首先分析了异步电机的动态模型，从动态模型中推导出磁链和转矩的表达式，然后对查表法和预测控制两种不同方法的原理进行了详细的阐述，最后分别给出仿真结果。

第四章将双级矩阵变换器，直接转矩控制和无位置控制相结合。首先由双级矩阵变换器的逆变级配合传统直接转矩控制控制异步电机；其次将速度观测器应用于直接转矩控制中，实现异步电机无位置传感器控制；最后将三者融合控制电机，并和前两种控制方法进行比较，分析了双级矩阵变换器无位置传感器异步电机直接转矩控制的优缺点。

第五章总结了论文所做的工作，并对今后的研究提出了展望。

# 第二章 双级矩阵变换器调制策略研究

## 引言

双级矩阵变换器结构上分为电网侧和负载侧两级，故称作双级矩阵变换器，两级间的直流侧和传统的交直交不同，无大电容进行滤波和储能，所以其控制策略既包含了两级分别的控制，又包含了相互配合的控制方法。本章的主要内容如下：

1. 双级矩阵变换器电路结构介绍；
2. 电网侧无零矢量控制策略；
3. 电网侧有零矢量控制策略；

## 双级矩阵变换器的拓扑结构

双级矩阵变换器的拓扑结构是通过对传统矩阵变换器输入输出函数的演变得到的。传统矩阵变换器的结构图如图2.1所示

图2.1

其输入输出变换关系如下：

式2-1

假设其中有V+和V-两点夹在输入和输出之间，其电压和输入输出关系如下表示：

式2-2

式2-3

整合上述两个式子得：

式2-3

该式子和式2-1等效。双级矩阵变换器就是从该分析中演变而来，将虚拟的V+和V-化成实际的直流侧从而得到如图2-2的结构：

图2.2

其中，电网侧的开关由双向开关构成，以实现电流的双向流动。双向开关的构成方式有如下几种【】：

双向开关介绍

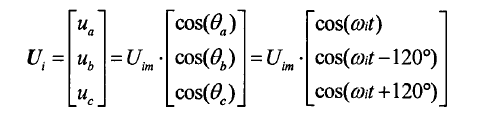
负载侧和普通的三相电压源型逆变器相同，只需要单向开关，因此双级矩阵变换器总的功率器件数量和传统矩阵变换器相同，均为18个，具体如图2.3所示。由图可知双级矩阵变换器输入和输出直接耦合，电网侧采用PWM调制生成脉冲波形，负载侧将直流侧的脉冲波形再调制成变频变压的交流电。如果有更多的限制条件，使用的功率器件可以再减少到15，12甚至是9个，以下均采用18个功率器件的双级矩阵变换器进行说明。

## 电网侧无零矢量调制策略

电网侧无零矢量，逆变级SVM调制的控制策略【1.57】是双级矩阵变换器应用最广泛的一种控制方法，以下进行详细地介绍。

### 电网侧无零矢量控制

假设电网电压的表达式为：

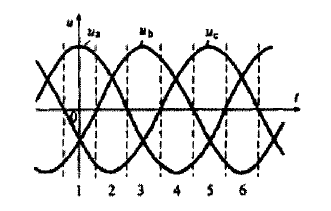


式2-4

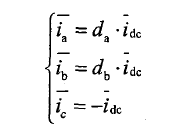
其中，wi为电角频率，Uim为相电压幅值。

无零矢量控制的目标是保持正弦的输入电流波形和直流侧的正电压。为了分析方便，假设双级矩阵变换器的开关频率比输入电压频率大的多，因此可以在一个周期内将输入的电压和直流电流视为恒定，则直流电压和输入电流的大小就只由输入电压大小和电网侧开关函数决定。

为了获得最大的直流电压，将输入相电压分为六个区间，每个区间内有一相电压最大且和其他两相反向，如图2.3所示

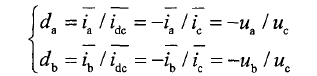
图2.3 

在一个PWM周期中将最大电压一相开关一直导通，另外两相按一定占空比导通就可以获得单位功率因数。以第一个区间为例，设直流电流为id，则输入电流有如下关系：

改成第一区间

式2-5

当输入功率因数为1时，电压和电流成比例，可以推导出如下式子：

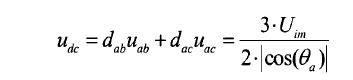


式2-6

因此可用电网相电压的大小来求得对应的占空比。

因为两级占空比的和等于一个周期，不出现零矢量的情况，所以该控制策略称为电网侧无零矢量的调制策略。

由求得的占空比可以推导出直流侧在一个PWM周期内的电压平均值：



式2-7.

其余区间的推导可以类似求出。

### 负载侧SVM调制

双级矩阵变换器负载侧的SVM调制和传统逆变器调制基本相同，区别在于直流侧电压在时刻波动，因此可以视为已知直流电压波动量的电压源逆变器进行控制。在一个PWM周期内，电网侧输出两段不同的直流电压，由于开关周期极短，可分别等效成一个常数。负载侧的六个开关可以输出互差60度的六个有效矢量和两个零矢量，通过这八个向量的组合可以合成任意的电压矢量。假设要合成的电压矢量为**Vk**，位于扇区Ⅰ，其与矢量**V1**的夹角为，如图2.4所示

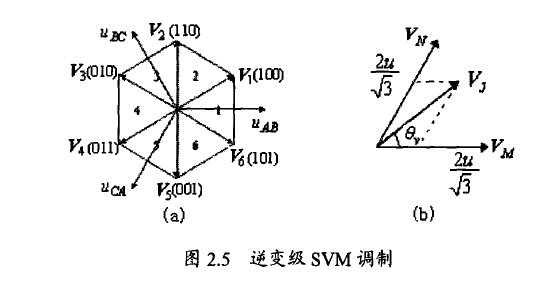
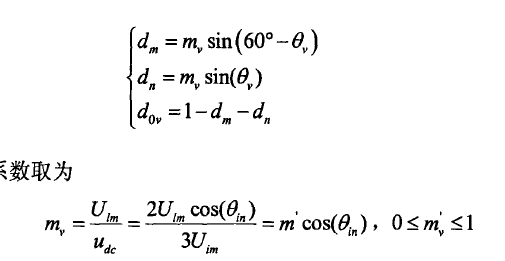


图2.4

则**Vk**和**V1**及**V2**的关系为



其中d1，d2，d0分别表示**V1 V2**以及零矢量的占空比，其值由下式求得：



式2.7

定义输入输出电压之比为调制度，即

式2.8

再考虑式2-7，可得

式2.9

所以为保持输出电压幅值恒定，负载侧的调制度是时变的，且输出相电压的最大值为0.866倍的输入相电压，而电压利用率较低，也是双级矩阵变换器的缺点之一。

### 双级矩阵变换器的换流

传统矩阵变换器由于电压和电流的限制，需要复杂的换流，即增加了控制的难度也降低了系统的可靠性。而双级矩阵变换器可以有效地实现零电流换流，大大降低控制的复杂度。

## 电网侧有零矢量调制策略

## 仿真研究

## 本章总结

# 三、 异步电机直接转矩控制

1. 异步电机动态模型
2. 直接转矩控制原理
   1. 查表法
   2. 预测法
3. 无位置传感器
4. 仿真研究
5. 本章总结

# 四、 双级矩阵变换器直接转矩控制