



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410010311.2

[43] 公开日 2005年12月7日

[11] 公开号 CN 1705208A

[22] 申请日 2004.5.31

[21] 申请号 200410010311.2

[71] 申请人 中原工学院

地址 450007 河南省郑州市中原中路41号

[72] 发明人 王晓雷

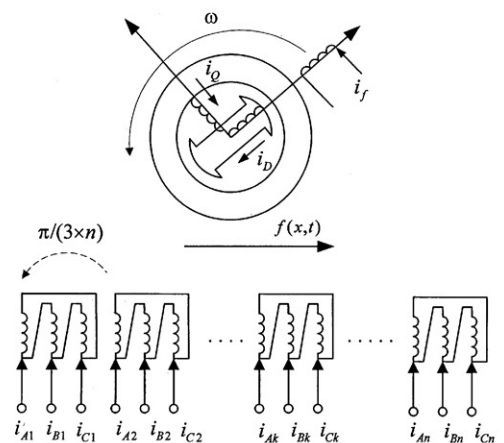
权利要求书1页 说明书7页 附图3页

[54] 发明名称 逆变器供电的多三相交流同步电动机

[57] 摘要

本发明涉及一种逆变器供电的多三相交流同步电动机。该电机的定子绕组具有多组在电路上独立的三相对称绕组，这些对称三相绕组的组与组之间仅有磁路的互相耦合关系，没有电路上的直接联系，对于每一组采用星形连接的三相绕组，都具有各自的独立中性点，并且这些中性点在电路上互相隔离；对于每一组采用三角形连接的三相绕组而言，这些三相绕组在电路也是上互相隔离的。多三相同步电动机定子绕组总的相数具有3的倍数特征，即该电动机的总相数为： $2 \times 3$ 相、 $3 \times 3$ 相、 $4 \times 3$ 相、 $5 \times 3$ 相、 $6 \times 3$ 相、 $7 \times 3$ 相、 $8 \times 3$ 相... $n \times 3$ 相 ( $n=2, 3, 4, \dots, n$  为大于1的正整数)。独立三相内部每相之间的相位差均为对称  $120^\circ$ 。相邻的三相绕组之间，其对应相的相位差是  $\pi/(n \times 3)$ 。多三相交流同步电动机是由多三相逆变器

电源所供电的，该逆变器是多相逆变器的一种特殊的结构组合，相邻组三相逆变器的供电相位差也是  $\pi/(n \times 3)$ 。



ISSN 1008-4274

1、一种逆变器供电的同步电动机，其特征在于：

a、该电机的定子绕组具有多组在电路上独立的三相对称绕组，这些对称三相绕组的组与组之间仅有磁路的互相耦合关系，没有电路上的直接联系，对于每一组采用星形连接的三相绕组，都具有各自的独立中性点，并且这些中性点在电路上互相隔离；对于每一组采用三角形连接的三相绕组而言，这些三相绕组在电路也是互相隔离的，多三相同步电动机定子绕组总的相数具有3的倍数特征，即该电动机的总相数为： $2 \times 3$ 相、 $3 \times 3$ 相、 $4 \times 3$ 相、 $5 \times 3$ 相、 $6 \times 3$ 相、 $7 \times 3$ 相、 $8 \times 3$ 相 $\cdots n \times 3$ 相( $n=2, 3, 4, \dots$ ,  $n$ 为大于1的正整数)；

b、对于  $n$  个独立三相绕组，其相邻两个三相绕组在空间的位移电角度可以采用位移 $180^\circ / (n \times 3)$ 、或者 $0 \leq \beta < 180^\circ / (n \times 3)$ 。

2、根据权利要求1所述的逆变器供电的多三相交流同步电动机，其特征在于：该电机是由多三相逆变器供电的，所谓多三相逆变器是指逆变器的总相数也具有3的倍数特征，并且多三相同步电动机与多三相逆变器的总相数相等，该逆变器采用一种适合于多三相同步电动机的控制算法，使得多三相交流同步电动机每一组独立三相绕组都可以作为一个单独的对象进行控制。

3、根据权利要求1所述的逆变器供电的多三相同步电动机，其特征在于：所述的定子多三相绕组的结构为双层或单层，短距或整距，对于多三相同步电动机也可以采用分数槽绕组，以取得较好的电势波形。

4、根据权利要求1所述的逆变器供电的多三相同步电动机，其特征在于：电机同轴联接有旋转编码器或者该电机采用其他能够反映同步电机转子位置和速度的传感器来实时测量电机转子的旋转角度和速度。

## 逆变器供电的多三相交流同步电动机

### 技术领域:

本发明涉及一种逆变器供电的多三相交流同步电动机。

### 背景技术:

三相交流同步电动机一般应用于大型的风机、水泵、压缩机、轧钢机等负载，目前以直联工频电网恒速运行的方式比较常见。当该类型三相电机需要采用逆变器供电变速运行时一般采用常规的三相交-交或交-直-交变频装置，也有采用传统的多相电机和多相变频装置。但是，常规的三相逆变器供电的大功率交流同步电动机系统由于功率半导体器件的物理参数的限制，往往需要采用多个功率半导体器件并联才能够解决在一个三相桥臂上通过大电流的问题，或者采用多电平级联结构解决一个三相桥臂上通过高电压的问题。这样就会引起系统的可靠性降低问题。多相系统可以降低同步电动机每一相绕组的电压和电流的额定值，对于功率半导体器件的物理参数极限的要求可以降低。可以证明多相电机的基波磁势是圆形旋转磁势，其空间高次谐波的磁势随着电机相数的增加可以被有效地消除。假定传统的多相电机的相数是  $m$ ，某一相电流具有以下的数学表达式：

$$i_k = \sqrt{2}I \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}); \quad k=1, 2 \dots n \quad (1)$$

其中  $I$  是某相电流的有效值； $\omega$  是电源的角频率。

其某一相的基波脉振磁势为：

$$f_k = F_{\phi 1} \cos(x - k \frac{\pi}{m}) \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}) \quad (2)$$

公式 (2) 中  $F_{\phi 1} = \frac{2\sqrt{2} I w}{\pi p} k_{w1}$ ； $F_{\phi 1}$  是多相电机的每一相的基波磁势； $w$  是每一相绕组每一条并联支路的串联匝数； $p$  是电机的极对数； $k_{w1}$  是基波绕组绕组系数。

则传统的多相电机基波总合成磁势波是：

$$\begin{aligned} f(x,t) &= \sum_0^{m-1} F_{\phi 1} \cos(x - k \frac{\pi}{m}) \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}) \\ &= \frac{m}{2} F_{\phi 1} \cos(x - \omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

显然基波合成磁场是一个圆形的旋转磁势波。

对于高次空间谐波而言，采用多相绕组可以有效地削弱高次谐波对电机的影响，假定多相电机的相数为  $m$ ，可以证明，在绕组对称的情况下和绕组空间角度为  $\frac{\pi}{m}$  的条件下，其基波与高次谐波的表达式如下：

$$v=2km\pm 1$$

(4)

假定  $m=12$ ，则除了基波之外，其最低次数的谐波为-23次反转谐波和+25次正转谐波，即谐波次数低于23次的谐波幅值为零。

多相电机虽然对于空间谐波的抑制能力很强，但是由于多相电机的绕组连接方案一般采用星形接法，其多相绕组共同连接在一个中点上，其绕组共同中点的电流很大，发热和局部电流不平衡的问题较为突出，影响了多相交流同步电动机工作的可靠性。同时，常规的三相交流同步电动机系统在控制策略上要比多相的交流同步电动机系统的控制策略简单许多。多相交流同步电动机系统其控制的复杂性是随着 $2^m$ （ $m$ 是多相电机的相数）而增加的。对于不同相数的多相同步电动机，其控制方法的差异性很大，由于以上因素的影响，传统的多相同步电动机的应用受到了一定的限制。因此，寻找一种合成磁势的效果与多相同步电动机相同，能克服多相同步电机的中点发热与可靠性差的缺点。同时，具有控制算法标准化好优点的新型多相同步电动机绕组结构是十分有意义的工作。

多相电机采用多个星形绕组所组成的多相整流后供电的同步发电机在船舶等独立发电系统已经得到成功的应用，海军工程大学的马伟明等人研究了一种三相交流和多相整流同时供电的同步发电机。其中，该同步发电机的多相绕组是经过常规的桥式连接不可控整流器后给直流负载供电。由于整流多相同步发电机的定子电流的相位是由该相绕组在空间的位置所自发确定的，不需要进行人为的相位控制，因此，其仅需要通过调节转子的励磁电流，就可以调节定子电流的幅值大小。对于采用多个星形绕组所组成的电动机，情况则比发电机复杂得多。

### 发明内容：

本发明涉及一种逆变器供电的多三相交流同步电动机。该电机的定子绕组具有多组在电路上独立的三相对称绕组，这些对称三相绕组的组与组之间仅有磁路的互相耦合关系，没有电路上的直接联系，对于每一组采用星形连接的三相绕组，都具有各自的独立中性点，并且这些中性点在电路上互相隔离；对于每一组采用三角形连接的三相绕组而言，这些三相绕组在电路也是上互相隔离的。多三相同步电动机定子绕组总的相数具有3的倍数特征，即该电动机的总相数为： $2\times 3$ 相、 $3\times 3$ 相、 $4\times 3$ 相、 $5\times 3$ 相、 $6\times 3$ 相、 $7\times 3$ 相、 $8\times 3$ 相 $\cdots n\times 3$ 相( $n=2,3,4,\dots$ ， $n$ 为大于2的正整数)。对于具有独立中点的多-三相电机其原型电机的示意图参见说明书附图1。对于具有多个角形接法多-三相电机其原型电机的示意图参见说明书附图2。在附图中，电流的方向遵循电动机法则。

由于采用多个星形或者三角形绕组连接的多相逆变器供电的交流同步电动机或者称为多三相逆变器供电的交流同步电动机需要采用多个星形或者多个三角形三相绕组的协同控制和存在互感耦合的解耦控制问题。因此多个星形或者三角形绕组连接的多相逆变器供电的交流同步电动机的控制要比采用多个星形绕组所组成的多相整流后供电的同步发电机的控制复杂的多。但是，采用多相逆变器供电的交流同步电动机由于采用多个星形或者三角形绕组连接，其绕组的连接方法更加灵活，可以采用多个星形中点，其多个星形中点在电路上是互相独立的；也可以采用多个三角形绕组，此时没有绕组的中点。该电机保留了多相电机的可靠性较高，采用了多三相绕组结构，可以有效的降低每一相的电压和电流的额定值，对于功率半导体器件的物理参数极限的要求可以降低，同时克服了传统多相电机星形接法所有的绕组都必须连接到一个中点上，中点的电流很大，发热和局部电流不平衡的问题较为严重的问题。多三相交流同步电动机的控制方法比传统多相同步电动机更为简单，同时，控制算法标准化程度高，其基本的被控制单元是每一个独立的三相绕组，所有的独立的三相绕组的控制算法都相同。从电机旋转磁场产生的角度而言，无论是三相绕组、多相绕组、多三相绕组都可以产生旋转磁场。

首先分析一种具有多-三相绕组的交流同步电机。多-三相绕组同步电机顾名思义，就是具有多个独立三相的同步电机，其几何的特征是：同步电机绕组的内部具有多个独立中性点的Y接三相绕组或多个独立的 $\Delta$ 接三相绕组，其每一个独立三相绕组内部，几何关系与常规三相绕组完全相同，每相之间的相位差均为对称 $120^\circ$ 。相邻的三相绕组之间，其对应相的相位差是 $\pi/(n \times 3)$ 、或者 $0 \leq \beta < \pi/(n \times 3)$ 。其多三相的每一组独立三相的相邻绕组对应的相位差的选取原则主要是①消除特定次谐波；②便于绕组在电机定子内的空间排布。如果对于以消除空间高次谐波作为绕组相位差主要确定因素时，相位差等于 $\pi/(n \times 3)$ 时，消除空间高次谐波的范围比较宽。为了便于分析起见，本发明中，分别讨论多个独立的星形接法三相绕组所组成的多三相绕组系统，和多个独立的角形接法三相绕组所组成的多三相绕组。

**本发明的优点：**①采用本发明后，多三相交流同步电动机，由于采用了多个独立中点的星形绕组或者多个独立的三角形绕组，与传统的多相交流同步电机相比较，克服了多相电机中点接线复杂、可靠性降低、中点发热等缺点。具有接线比较简单、绕组可靠性高等特点。②采用本发明后，交流同步电动机系统的可靠性可以得到有效的提高。由于采用多组独立三

相系统运行方式，当某一相的元件发生故障时，可以退出运行，而其他独立三相系统仍然可以保持正常运行状态。这样，系统的运行的可靠性得到了有效的提高。③采用本发明后，与三相交流同步电动机相比较的空间绕组谐波可以得到有效的削弱，可以有效降低谐波转矩，改善转矩的特性。

### 多三相同步电机合成磁势

我们首先对多三相同步电机的基波合成磁势的性质进行理论分析。

假定该原型电机有  $m=n \times 3$  相绕组，对于标准 3 相、6 相双 Y，9 相 3Y，12 相 4Y，……， $n=1,2,3,4,\dots$ ；对于标准 3 相单  $\Delta$  角形接法、6 相双  $\Delta$  角形接法，9 相 3  $\Delta$  角形接法，12 相 4  $\Delta$  角形接法， $n=1,2,3,4,\dots$ 。在每一个三相绕组内部有电的连接，而独立三相绕组之间没有电气连接只有磁场的联系。

首先分析，多-三相电机的旋转磁势建立过程，假定某一个独立三相的激励电源的基波电流具有以下数学表达式：

$$\begin{aligned} i_{ak} &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}) \\ i_{ak} &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} - \frac{\pi}{3}) \\ i_{ak} &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$

某一个独立三相绕组的磁势幅值是  $F_{\phi}$ ，交流电的角频率是  $\omega$ ，在气隙表面的某一点其坐标为  $x$ ，则交流电流在该独立三相的内部各相产生的脉振磁势的表达式为：

$$f_{ak}(x,t) = F_{\phi 1} \cos(x - k \frac{\pi}{m}) \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}); \quad k=0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

$$f_{bk}(x,t) = F_{\phi 1} \cos(x - k \frac{\pi}{m} - \frac{2\pi}{3}) \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} - \frac{2\pi}{3}); \quad (7)$$

$$f_{ck}(x,t) = F_{\phi 1} \cos(x - k \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{3}) \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{3}); \quad (8)$$

注意公式中的  $F_{\phi 1}$  的定义与公式 (2) 中的定义相同。

则多三相绕组的基波总合成磁势为每一个独立三相的总磁势叠加，即把公式 (2)、(3)、(4) 相加，然后再将每一个独立三相的磁势进行总的求和运算，具有下列的表达方式：

$$f(x,t) = \sum_0^{n-1} [f_{ak}(x,t) + f_{bk}(x,t) + f_{ck}(x,t)] \quad (9)$$

可以从数学上证明公式 (5) 可以进一步简化为：

$$f(x,t) = \frac{3 \cdot n}{2} F_{\phi 1} \cos(x - \omega t) = \frac{m}{2} F_{\phi} \cos(x - \omega t) \quad (10)$$

显然在依靠合适的激励电源后，新型多三相电机的合成磁势与传统多相

电动机的基波合成磁势在形式上完全相同，均为幅值为 $\frac{m}{2}F_{\phi 1}$ ，旋转角速度为 $\omega$ 的旋转磁势波。

可以证明，多三相同步电机的空间谐波合成磁势与传统多相电机的空间谐波合成磁势有相同的变化规律。其证明步骤如下，仍然假定某一个独立三相的激励电源的基波电流具有公式（5）的数学表达式。

某一个独立三相绕组的 $v$ 次谐波的脉振磁势幅值是 $F_v$ ，交流电的角频率是 $\omega$ ，在气隙表面的某一点其坐标为 $x$ ，则交流电流在该独立三相的内部各相产生的 $v$ 次空间谐波的脉振磁势的表达式为：

$$f_{vak}(x, t) = F_{\phi v} \cos[v(x - k \frac{\pi}{m})] \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m}); \quad k=0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$

$$f_{vbk}(x, t) = F_{\phi v} \cos[v(x - k \frac{\pi}{m} - \frac{2\pi}{3})] \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} - \frac{2\pi}{3}); \quad (12)$$

$$f_{vck}(x, t) = F_{\phi v} \cos[v(x - k \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{3})] \cos(\omega t - k \frac{\pi}{m} + \frac{2\pi}{3}); \quad (13)$$

$$\text{其中, } F_{\phi v} = \frac{2\sqrt{2} I w}{\pi v p} k_{wv}$$

则多三相绕组的 $v$ 次谐波总合成磁势为每一个独立三相的 $v$ 次谐波合成磁势叠加，即把公式（11）、（12）、（13）相加，然后再将每一个独立三相的 $v$ 次谐波合成磁势进行总的求和运算，具有下列的表达方式：

$$f_v(x, t) = \sum_0^{n-1} [f_{vak}(x, t) + f_{vbk}(x, t) + f_{vck}(x, t)] \quad (14)$$

可以从数学上证明公式（14）的谐波次数也可以同样表示为 $v=2k(3 \times n) \pm 1 = 2km \pm 1$ ，假定 $n=4$ ； $m=3 \times n=12$ ，则除了基波之外，其最低次数的谐波为 $-23$ 次反转谐波和 $+25$ 次正转谐波，即谐波次数低于23次的谐波幅值也为零。

对于三角形绕组结构，同样也可以得到相同的结论。

因此，新型多三相同步电动机的合成磁势与传统多相同步电机的基波合成磁势在形式上完全相同，在相同的相电流的有效值激励下，其磁势的均为幅值为 $\frac{m}{2}F_{\phi 1}$ ，旋转角速度为 $\omega$ 的旋转磁势波。同时，其削弱高次空间谐波的能力也与传统多相同步电动机相同。因此，采用多三相同步电动机在保留传统多相电机的优点的基础上，具有分散中点，或无中点结构，控制标准化程度高等特点。

### 多三相同步电动机的逆变器电源特点

由于多三相同步电动机的绕组的特殊结构，其逆变器电源也必须具有

特定的结构并按照一定的规律运行。首先逆变器包括的独立三相激励电源的数目必须与独立三相绕组的个数相同，即独立三相电源的数目也必须等于 $n$ 。其次当逆变器采用正弦激励时，其每一个独立三相的基波电流表达式应当符合式(5)，逆变器每一组独立电源的三相之间相位差是 $120$ 电角度，相邻的独立电源之间的相位差是 $\pi/(3 \times n)$ ，其电流的幅值应当相等。当采用逆变器供电时，每一组独立三相电源是一个三相桥式逆变器。逆变器电源的拓扑示意图可以参见说明书附图3。激励电流的标么值和其波形的相位差参见说明书附图4。采用与多三相同步电动机同轴联接有旋转编码器或者该电机采用其他能够反映同步电机转子位置和速度的传感器来实时测量多三相同步电动机转子的旋转角度和速度，其转子旋转角度是做为同步信号给多三相逆变器的控制系统，做为逆变器电源的电压、电流同步基准信号。该逆变器采用一种适合于多三相同步电动机的控制算法，使得多三相交流同步电动机每一组独立三相绕组都可以作为一个单独的对象进行控制。该方法实质上是一种根据同步电动机转子磁场位置进行定向的矢量控制方法。其根据电机的每一组独立三相绕组在空间的实际位置，进行电压控制脉冲的角度分配。根据旋转角度和实际的速度、电流测量值、功率因数与对应的给定值进行运算，从而得出控制定子电压模值和转子励磁电流模值的大小。该方法采用一种解耦控制方法使得电机的由于电机绕组之间的互感所引起的耦合电压由于电感乘积比例因子的引入，通过一系列的乘加运算，可以对独立三相绕组之间由于磁路耦合所产生的互感电压进行有效的解耦运算，使得多三相同步电动机定子每一组独立三相绕组得到的等效 $d$ 轴、 $q$ 轴输出电压给定值仅与各自的宏电流相关，而宏电流在形式上是独立的和解耦的。这样使得多三相系统可以等效为若干个独立的三相系统进行分析。

### 附图说明

图1 采用多个星形接法的多三相同步电动机；定子采用星形多三相绕组。转子采用直流励磁，转子上带有直轴阻尼绕组和交轴阻尼绕组。

图2 采用多个角形接法的多三相同步电动机；定子采用角形多三相绕组。转子采用直流励磁，转子上带有直轴阻尼绕组和交轴阻尼绕组。

图3 多三相同步电动机(4×3相)激励电源示意图；其他相数的多三相逆变器电源与该图类似，其区别在于独立三相逆变器的组数不同。其中直流电源是由电网交流电通过整流而得到的。

图4 多三相同步电动机(4×3相)激励电流；图中采用了标么值，并且电流为额定。



图 5 多三相同步电动机的槽电势星形图。

### 具体实施方式:

说明书附图 5 是多三相同步电动机的一个实施例。图 5 是多三相系统中,采用了  $4 \times 3$  相定子绕组的槽电势星形图。从槽电势星形图上可以看出,  $4 \times 3$  相系统中包括了 4 组三相对称绕组,本实施例中,同步电动机的定子槽数  $Z=72$ ,磁极数  $2p=6$ ,每极每相槽数  $q=1$ ,极距  $\tau=12$ ,由于多相电机功率一般较大采用双层绕组比较普遍,本实施例也可以采用单层绕组。绕组节距可以采用整距绕组  $y=\tau$ ,也可以采用短距绕组  $y=\frac{5}{6}\tau=10$  (槽)。相邻独立三相绕组之间的空间电角度是  $180^\circ/(4 \times 3)=15^\circ$ 。多三相同步电动机的相绕组的首端分别标记为: A1、A2、A3、A4, B1、B2、B3、B4, C1、C2、C3、C4; 末端标记为: X1、X2、X3、X4, Y1、Y2、Y3、Y4, Z1、Z2、Z3、Z4。与标准三相电动机类似,多三相同步电动机的绕组可以串联连接,也可以并联连接,串并联的规则与标准三相电动机相同。多三相同步电动机可以连接成为 4 个星形接法,当连接为星形接法时,有 4 个独立中点,可以采用内部连接方式,以减少外部接线。同样多三相同步电动机可以连接成为 4 个三角形接法,此时无中点,也可以采用内部连接方式,以减少外部接线。显然,多三相同步电动机由于采用分散中点或无中点方式,在绕组可靠性方面要优于传统的 12 相共同中点的同步电动机。

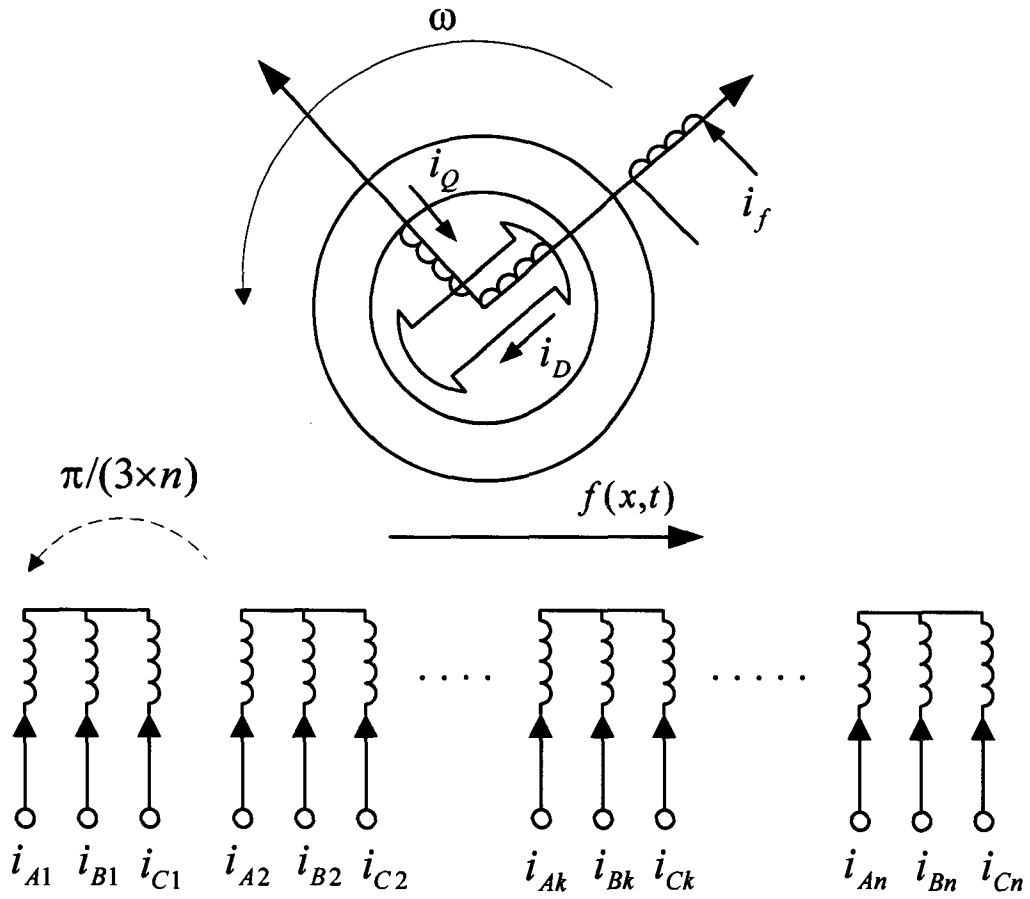


图 1

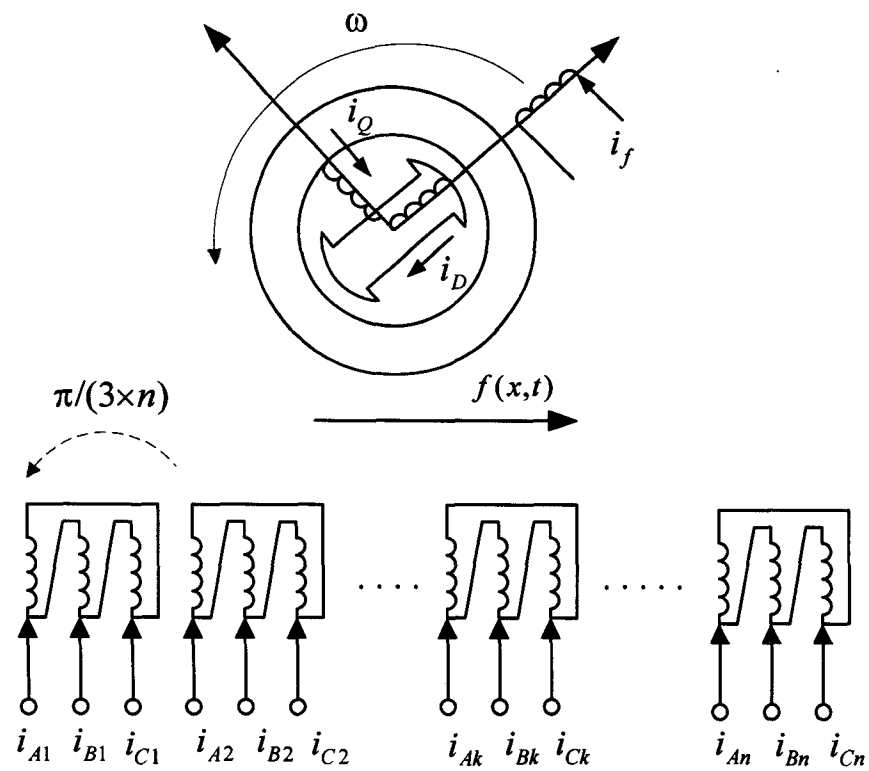


图 2

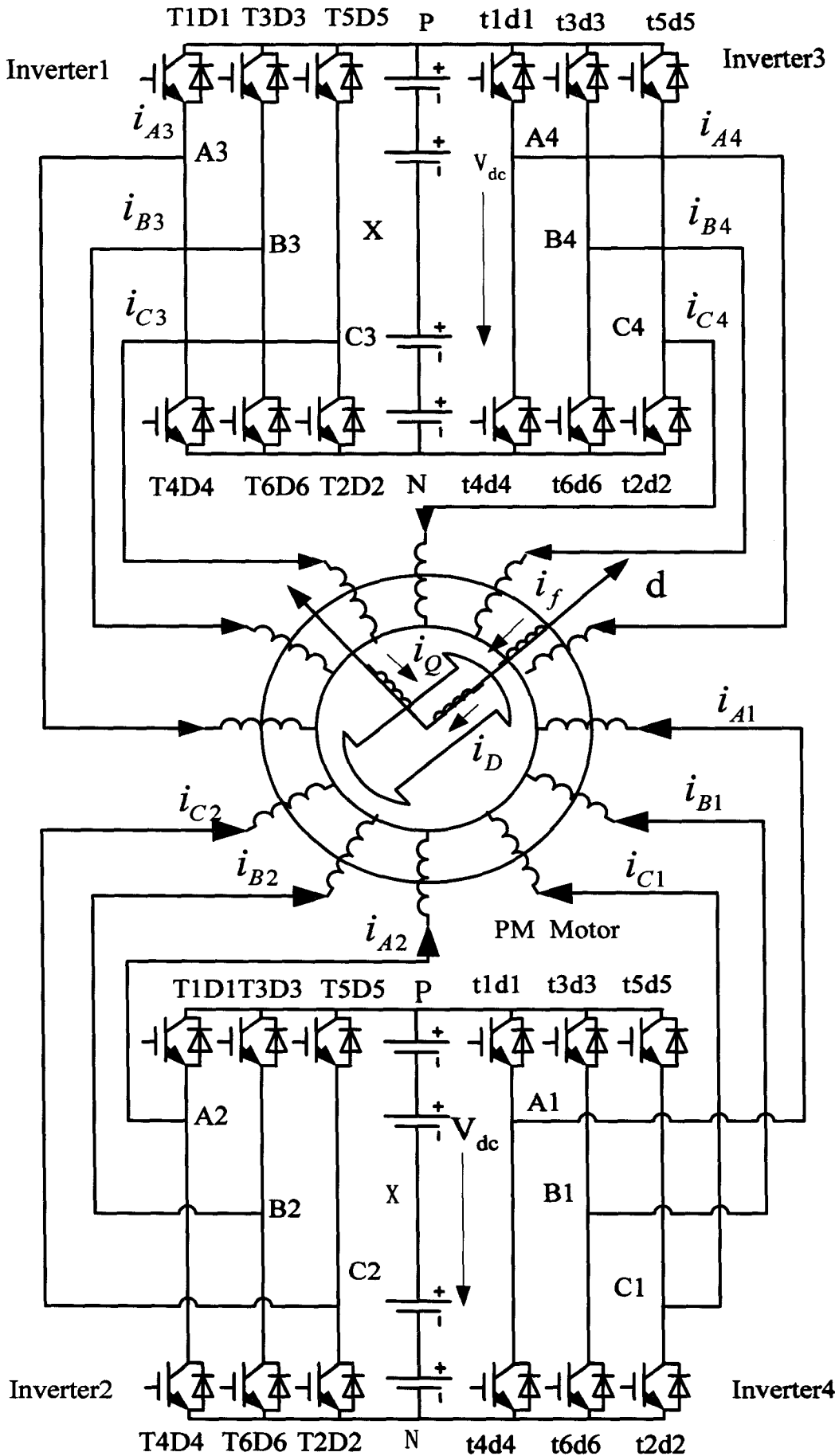


图 3

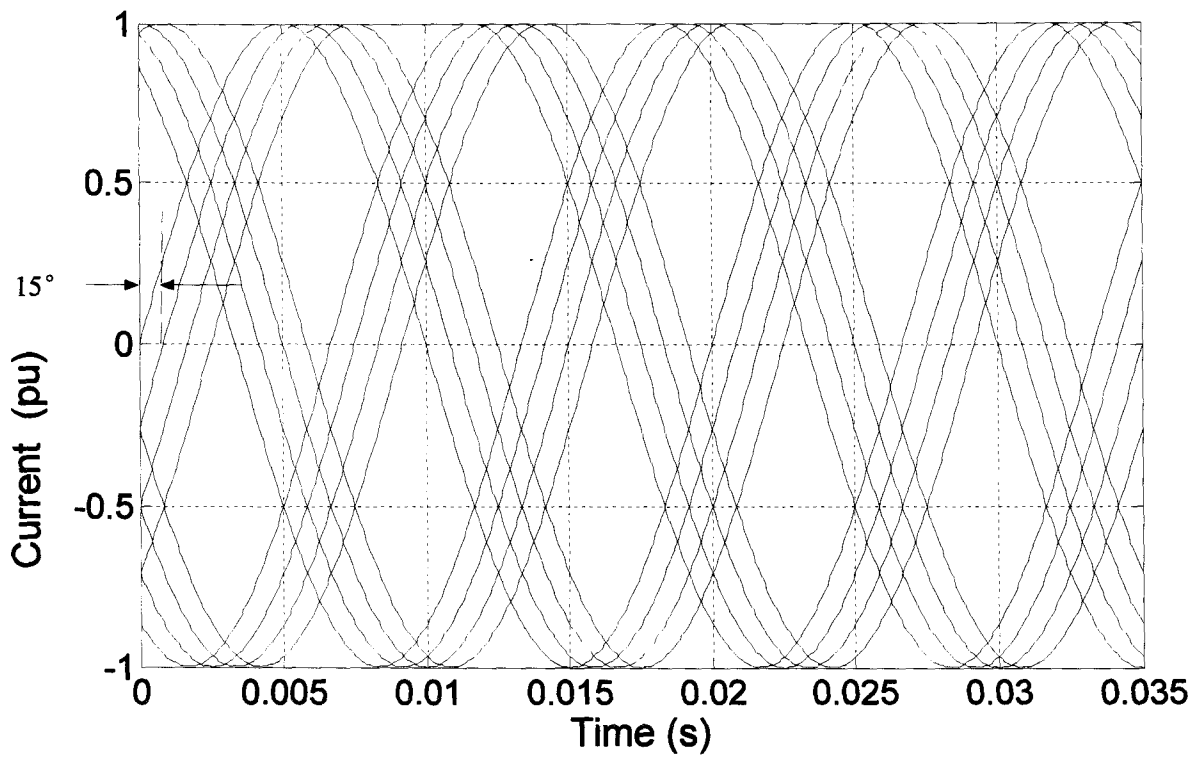


图 4

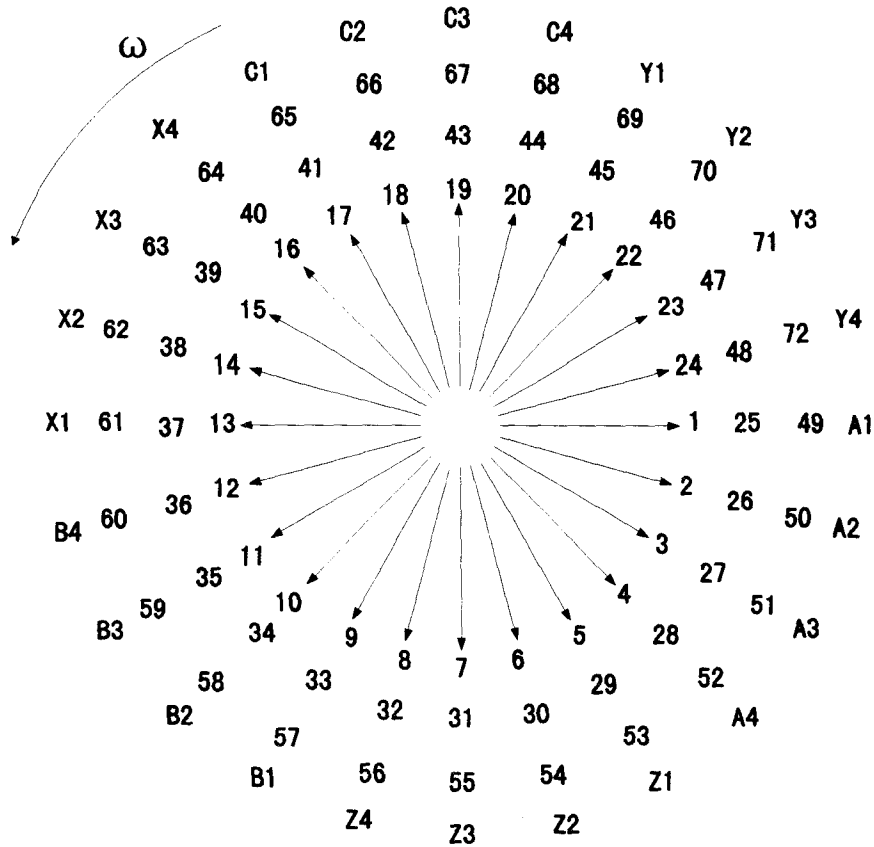


图 5