



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102077458 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 25

(21) 申请号 200980125215. 3

代理人 钱大勇

(22) 申请日 2009. 06. 23

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

H02P 6/18 (2006. 01)

0854427 2008. 07. 01 FR

H02P 21/14 (2006. 01)

H02P 27/08 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 12. 29

(86) PCT申请的申请数据

PCT/EP2009/057777 2009. 06. 23

(87) PCT申请的公布数据

W02010/000640 FR 2010. 01. 07

(71) 申请人 施耐德东芝换流器欧洲公司

地址 法国厄尔河畔帕西

(72) 发明人 杜罗·巴西克 斯蒂芬·卡皮塔尼努

弗朗索瓦·马尔莱特

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

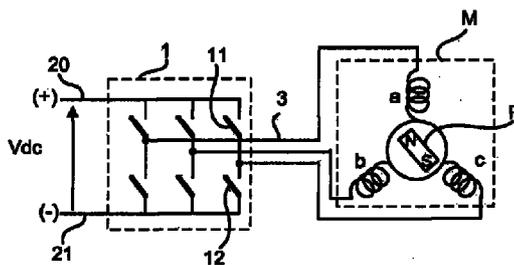
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 3 页

(54) 发明名称

确定永磁同步电机的电感的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种在用于确定永磁同步电机的电感 (Ld, Lq) 的变速驱动器中实现的控制方法, 该永磁同步电机包括三相 (a, b, c) 定子和转子, 每个相面向一个方向。对于每个相, 一个接一个地, 所述方法包括步骤: 沿着相 (a, b, c) 的方向, 施加正向的电压矢量 (V1, V3, V5) 和负向的电压矢量 (V2, V4, V6) 预定的持续时间; 在施加两个方向的电压矢量之后, 测量每个相中获得的电流; 基于在所有相中测量的电流, 确定该转子的位置相对于定子的角度 ( $\theta$ ); 基于确定的角度 ( $\theta$ ), 确定该电机的磁通量 (Ld) 和扭矩 (Lq) 电感。



1. 一种在用于确定永磁同步电机的磁通量电感和扭矩电感 ( $L_d$ ,  $L_q$ ) 的变速驱动器中实现的控制方法, 该永磁同步电机包括三相 (a, b, c) 定子和转子, 每个相面向一个方向, 其特征在于, 所述方法包括步骤:

- 在每个相 (a, b, c) 的方向上, 施加正向的电压矢量 ( $V_1, V_3, V_5$ ) 和负向的电压矢量 ( $V_2, V_4, V_6$ ) 预定的持续时间,

- 在施加两个方向的电压矢量之后, 测量每个相中的电流响应, 该电流响应对于每个相包括正峰值和负峰值,

- 基于在所有相中测量的电流响应的正峰值和负峰值之间的不对称性, 确定该转子的位置相对于定子的角度 ( $\theta_r$ ),

- 作为确定的角度 ( $\theta_r$ ) 的函数, 确定该电机的磁通量电感 ( $L_d$ ) 和扭矩电感 ( $L_q$ )。

2. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 对于每个相 (a, b, c), 在正向施加的电压矢量和在负向施加的电压矢量具有完全一样的范数。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的方法, 其特征在于, 对于一个相, 正向电压矢量的施加和负向电压矢量的施加引起施加以下电压序列, 包括: 预定脉冲宽度 ( $T_p$ ) 的正电压脉冲、后面是具有该预定脉冲宽度 ( $T_p$ ) 的两倍的负电压脉冲、后面是该预定脉冲宽度 ( $T_p$ ) 的正电压脉冲。

4. 如权利要求 3 所述的方法, 其特征在于, 测量的电流响应包括正电流峰值和负电流峰值, 并且其特征在于, 该方法包括, 对于每个相并且在相同的时刻, 在它的上升阶段恢复该正电流峰值上的两个独特的电流值 ( $I_{a1+}$ ,  $I_{a2+}$ ,  $I_{b1+}$ ,  $I_{b2+}$ ,  $I_{c1+}$ ,  $I_{c2+}$ ), 并且在它的下降阶段恢复该负电流峰值上的两个独特的电流值 ( $I_{a1-}$ ,  $I_{a2-}$ ,  $I_{b1-}$ ,  $I_{b2-}$ ,  $I_{c1-}$ ,  $I_{c2-}$ )。

5. 如权利要求 4 所述的方法, 其特征在于, 它包括确定以下值:

$$\Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

其中  $\delta I_{a+}$ 、 $\delta I_{a-}$ 、 $\delta I_{b+}$ 、 $\delta I_{b-}$ 、 $\delta I_{c+}$ 、 $\delta I_{c-}$  表示, 对于每个相, 基于在获得的正电流峰值和负电流峰值上恢复的电流值计算的电流变化。

6. 如权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 基于以下关系确定该角度:

$$\Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3} \text{ et } \theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$$

7. 如权利要求 6 所述的方法, 其特征在于, 基于以下关系确定该电机的磁通量电感和扭矩电感:

$$\Delta I_{ave} = \frac{1}{3}(\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

$$\Delta I_{var} = \frac{2}{3}(\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta r + 4\pi/3))$$

$$\Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

$$\Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

$$L_d = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_d}$$

$$L_q = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_q}$$

8. 一种变速驱动器,包括 PWM 型的逆变器,用于向永磁三相同步电机提供脉冲电压,其特征在于,它实现在权利要求 1 到 7 中的一个中定义的方法。

## 确定永磁同步电机的电感的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于确定永磁同步电机（也称为 PMSM）的电感的方法。本发明也涉及能够实现所述方法的变速驱动器。

### 背景技术

[0002] 已知变速驱动器包括根据外部 AC 电源网络提供 DC 电压的整流器模块和逆变器模块（或斩波器）。此逆变器模块包括功率半导体电子器件，用于以脉冲宽度调制（PWM）模式对 DC 电压进行斩波，以便经由电源电缆在输出端处向电机提供脉冲的可变电压和可变转动频率。变速驱动器的控制设备以采样频率控制半导体元件的导通和断开，以利用合适的可变电压以 PWM 模式控制电机。

[0003] 永磁同步机由于它们的简单的结构和它们的高效率，而越来越多地用在变速驱动系统中。这些电机可以被分成两大类：具有光滑或圆柱状转子的电机以及具有凸出转子的电机。对于这两类电机，重要的是知道 d 轴上的磁通量电感和 q 轴上的扭矩电感，以便获得可靠且一致的控制回路和参考模型。

[0004] 专利 US 6,498,452 和 US 7,067,997 公开了用于确定同步电机的转子的初始位置的方法。这些方法特别依赖于在各相方向上电感的测量。

[0005] 也应当注意 Pr. M. Shroedl 的著作（例如，“Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the “INFORM” Method”，第 31 届 IEEE 工业应用会议纪要，IAS 1996, vol.1, 第 270 到 277 页，6-10 Oct 1996）。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提出一种使得可以确定永磁同步电机的磁通量电感和扭矩电感的方法。

[0007] 此目的由在用于确定永磁同步电机的磁通量电感和扭矩电感（ $L_d$ ,  $L_q$ ）的变速驱动器中实现的控制方法实现，该永磁同步电机包括三相（a, b, c）定子和转子，每个相面向一个方向，其特征在于，所述方法包括步骤：

[0008] - 在每个相的方向上，施加正向的电压矢量和负向的电压矢量预定的持续时间，

[0009] - 在施加两个方向的电压矢量之后，测量每个相中的电流响应，该电流响应对于每个相包括正峰值和负峰值，

[0010] - 基于在所有相中测量的电流响应的正峰值和负峰值之间的不对称性，确定该转子的位置相对于定子的角度，

[0011] - 按照该确定的角度的函数，确定该电机的磁通量电感和扭矩电感。

[0012] 不管采用的转子的类型如何（光滑的或凸出的）以及不管凸出的类型如何（ $L_d > L_q$  或  $L_d = L_q$  或  $L_d < L_q$ ），本发明的方法均适用。

[0013] 根据一个特定特征，对于每个相，在正向施加的电压矢量和在负向施加的电压矢量具有完全一样的范数（norm）。

[0014] 根据另一个特定特征, 对于一个相, 在正向电压矢量的施加和在负向电压矢量的施加引起施加如下的电压序列, 包括: 预定脉冲宽度的正电压脉冲、后面是具有该预定脉冲宽度的两倍的负电压脉冲、后面是该预定脉冲宽度的正电压脉冲。

[0015] 根据另一个特定特征, 在相中的电流响应包括正电流峰值和负电流峰值, 并且该方法包括: 对于每个相并且在相同的时刻, 在它的上升阶段恢复正电流峰值上的两个独特的 (distinct) 电流值, 并且在它的下降阶段恢复负电流峰值上的两个独特的电流值。

[0016] 更准确地说, 该方法包括确定以下值:

$$[0017] \quad \Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$[0018] \quad \Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$[0019] \quad \Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$[0020] \quad \Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$[0021] \quad \Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$[0022] \quad \Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

[0023] 然后, 基于以下关系确定该角度:

$$[0024] \quad \Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3} \text{ et } \theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$$

[0025] 基于以下关系确定电机的磁通量电感和扭矩电感:

$$[0026] \quad \Delta I_{ave} = \frac{1}{3}(\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

$$[0027] \quad \Delta I_{var} = \frac{2}{3}(\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta_r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta_r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta_r + 4\pi/3))$$

$$[0028] \quad \Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

$$[0029] \quad \Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

$$[0030] \quad L_d = \frac{2/3 V_{dc} \Delta t}{\Delta I_d}$$

$$[0031] \quad L_q = \frac{2/3 V_{dc} \Delta t}{\Delta I_q}$$

[0032] 本发明还涉及一种变速驱动器, 包括 PWM 型的逆变器, 用于向永磁三相同步电机提供脉冲电压, 所述变速驱动器实现上文描述的方法。

#### 附图说明

[0033] 其它的特征和优点将通过下面参考以示例方式给出并由附图示出的实施例的详细描述而变得清楚, 其中:

[0034] - 图 1 是为三相永磁同步电机供电的 PWM 型逆变器的简化表示;

[0035] - 图 2A 和 2B 分别表示用于分别获得相 a 上的电压矢量 V1 和此相同的相 a 上的电压矢量 V4 的逆变器模块的开关的开 / 关组合；

[0036] - 图 3 是在电机的每个相的方向上施加的电压的矢量表示；

[0037] - 图 4 表示对相 a 施加的电压序列和在相 a 中获得的电流响应；

[0038] - 图 5 是在对每个相施加图 3 所示的电压矢量之后对于每个相获得的电流响应的矢量表示。

### 具体实施方式

[0039] 参考图 1 的简化电路图,意在控制三相永磁同步电机 M 的变速驱动器包括整流器模块(未示出),一般由二极管电桥构成,向 DC 电源总线提供 DC 电压。DC 总线包括正线 20 和负线 21,总线电容器(未示出)连接在 DC 总线的正线 20 和负线 21 之间。DC 总线通过电源电缆 3 为链接到电机 M 的逆变器模块 1 供电,电源电缆 3 为电机的三相 a、b、c 供电,这三相方向彼此偏移 120°。对于电机 M 的每个相 a、b、c,逆变器模块 1 包括 IGBT 或其它类型的两个功率半导体电子开关 11、12(在图 1 中示出为简单的开关以简化图示),使得可以由总线的 DC 电压 Vdc 产生可变电压到电机。变速驱动器还包括用于实现它的各种功能的控制、处理和存储装置。

[0040] 本发明的方法适用于具有光滑转子或凸出转子的永磁同步电机。

[0041] 本发明的原理是,对于每个相,在这些相的每个方向上一个接一个地施加正向的电压矢量和负向的电压矢量。因此,对于每个相 a、b、c 施加两个电压矢量。术语“电压矢量”应当被理解为意思是合成结果是由施加于三相的各个电压得出的矢量。图 2A 和 2B 示出了每个相的开关的动作(actuation)的组合,使得可以分别获得在该相 a 的方向上的正电压矢量 V1 和前述方向上的负电压矢量 V4。对于每个相,施加的正电压矢量和负电压矢量优选地具有相同的范数,以便不产生转子的运动。施加的每个电压矢量 Vi 的范数取决于 DC 总线的电压 Vdc 并且具有例如电压 Vdc 的 2/3 的值。

[0042]  $V_i = 2/3 V_{dc}$

[0043] 参考图 3,因此,在相 a、b、c 的方向上在正负方向施加电压矢量 V1、V2、V3、V4、V5 和 V6。

[0044] 对于一个相(相 a),使得可以在该相的方向上获得正电压矢量和负电压矢量的电压序列如图 4 所示。此电压序列在于由逆变器模块 1 在被考虑的相和另外两个相之间施加电压,并且包括预定脉冲宽度 Tp 的第一正电压脉冲、后面是具有该预定脉冲宽度 Tp 的两倍的负电压脉冲、后面是该预定脉冲宽度 Tp 的正电压脉冲。优化此电压序列以便不在电机上产生扭矩因此不会导致转子的运动。

[0045] 采用的脉冲宽度 Tp 可以通过扫描各个脉冲宽度直到获得具有足够高以导致可检测的饱和和效应的值的电流峰值来确定。

[0046] 根据本发明,分析在被考虑的相上获得的电流响应以便从其中提取几个值。如图 4 所示,对于上文定义的电压序列,获得的电流响应顺序地呈现正峰值和负峰值。

[0047] 分析电流响应引起,对于每个相,使用特定的采样电路恢复四个电流值。参考图 4,在正电流峰值的上升阶段恢复两个电流值,并且在负电流峰值的下降阶段恢复两个电流值。对于所有相,在相同的时刻恢复这些值,负向或正向中的两次测得之间的时间间隔  $\Delta t$

总是相同的。对于第一正电压脉冲,例如在脉冲宽度的三分之一处(在图 4 中的 t1 处)恢复第一值  $I_{a1+}$ ,而在接近电压脉冲的结尾处(图 4 中的 t2 处)恢复第二值  $I_{a2+}$ 。

[0048] 如图 5 所示,对于相 a,因此存在,对于正峰值,在 t1 处恢复的值  $I_{a1+}$  和在 t2 处恢复的值  $I_{a2+}$ ,并且对于负峰值,在 t3 处恢复的值  $I_{a1-}$  和在 t4 处恢复的值  $I_{a2-}$ 。对于其它相的电流响应的每一个,在相同的时刻执行相同的测量。因而,对于相 b,存在获得的值  $I_{b2+}$ 、 $I_{b1+}$ 、 $I_{b2-}$ 、 $I_{b1-}$ ,对于相 c,存在获得的值  $I_{c2+}$ 、 $I_{c1+}$ 、 $I_{c2-}$ 、 $I_{c1-}$ 。

[0049] 然后,基于这些电流值,目的是对于每个相,确定负向和正向中的电流变化。然后获得:

$$[0050] \quad \delta I_{a+} = |I_{a2+}| - |I_{a1+}|$$

$$[0051] \quad \delta I_{a-} = |I_{a2-}| - |I_{a1-}|$$

$$[0052] \quad \delta I_{b+} = |I_{b2+}| - |I_{b1+}|$$

$$[0053] \quad \delta I_{b-} = |I_{b2-}| - |I_{b1-}|$$

$$[0054] \quad \delta I_{c+} = |I_{c2+}| - |I_{c1+}|$$

$$[0055] \quad \delta I_{c-} = |I_{c2-}| - |I_{c1-}|$$

[0056] 相应的矢量如图 5 所示。

[0057] 尽管在正向和负向施加于每个相的电压是相等的,但是由于电动机的磁饱和效应,对于同一个相获得的电流值不是对称的。在实践中,对施加于每个相的电压脉冲的电流响应取决于转子的位置。为了考虑磁饱和效应,因此对于每个相计算正向和负向中的变化的平均值以及正向和负向中的变化之间的差,换句话说:

$$[0058] \quad \Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$[0059] \quad \Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$[0060] \quad \Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$[0061] \quad \Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$[0062] \quad \Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$[0063] \quad \Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

[0064] 由上文呈现的差得到的矢量被定义如下:

$$[0065] \quad \Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3}$$

[0066] 差矢量  $\Delta I_{diff}$  的方向是磁饱和最显著的方向,也就是沿着转子所在的轴 d。因此,由角度  $\theta_r$  定义的转子的位置可以直接由矢量  $\Delta I_{diff}$  推出,以使得:

$$[0067] \quad \theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$$

[0068] 但是,本发明的目的不是确定转子的位置而是确定磁通量电感  $L_d$  和扭矩电感  $L_q$ 。为此,本发明的方法使用对于每个相在两个方向计算的平均值  $\Delta I_{a_{ave}}$ 、 $\Delta I_{b_{ave}}$ 、 $\Delta I_{c_{ave}}$ 。基于为每个相在两个方向获得的电流的平均值,这使得可以平均根据电流是负向还是正向而

不同的饱和效应。

[0069] 此外,众所周知对于每个相确定的电流包括恒定分量和依赖于上文定义的角度  $\theta_r$  的两倍的余弦的可变分量。常数分量具有值:

$$[0070] \quad \Delta I_{ave} = \frac{1}{3}(\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

[0071] 根据同步电机的高频标准模型,可变分量  $\Delta I_{var}$  的幅度可以在解调平均值之后确定。

$$[0072] \quad \Delta I_{var} = \frac{2}{3}(\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta_r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta_r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta_r + 4\pi/3))$$

[0073] 基于常数分量  $\Delta I_{ave}$  和可变分量  $\Delta I_{var}$ ,可以确定当沿着转子的磁通量轴 d 和扭矩轴 q 施加电压矢量时应当获得的最大和最小电流值。然后获得:

$$[0074] \quad \Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

$$[0075] \quad \Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

[0076] 然后由以下关系推出电感  $L_d$ 、 $L_q$ :

$$[0077] \quad L_d = \frac{2/3V_{dc} \Delta t}{\Delta I_d}$$

$$[0078] \quad L_q = \frac{2/3V_{dc} \Delta t}{\Delta I_q}$$

[0079]  $V_{dc}$  是 DC 总线的电压,  $\Delta t$  是在正峰值或负峰值上的两次电流测量之间测量的时间。

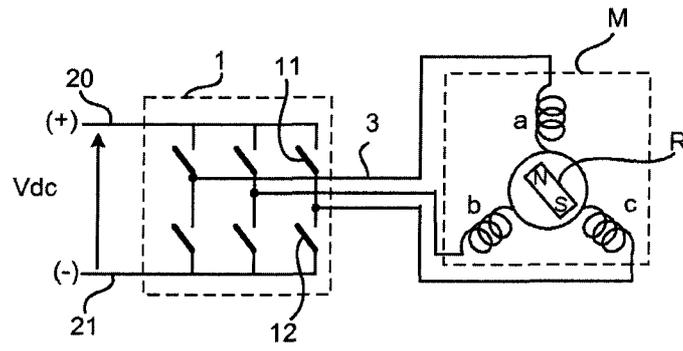


图 1

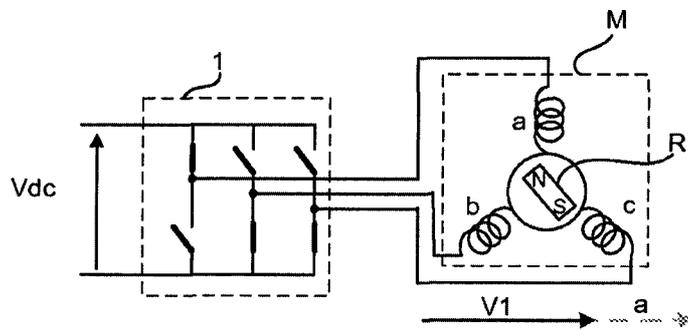


图 2A

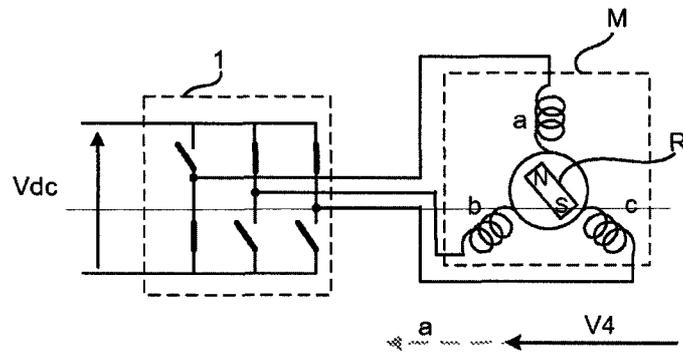


图 2B

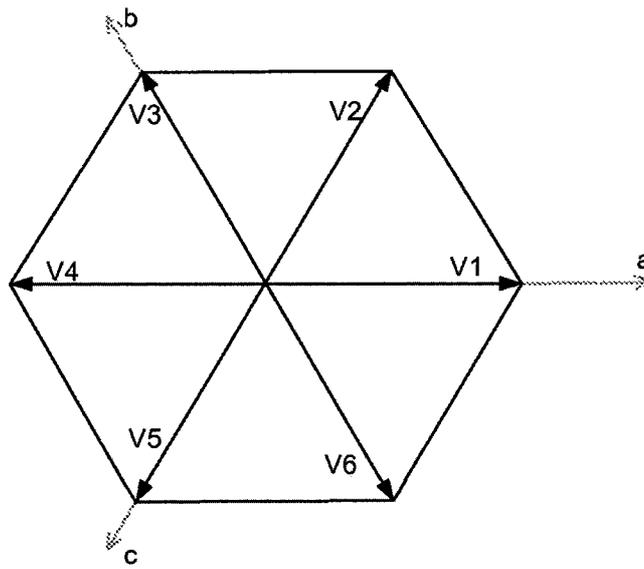


图 3

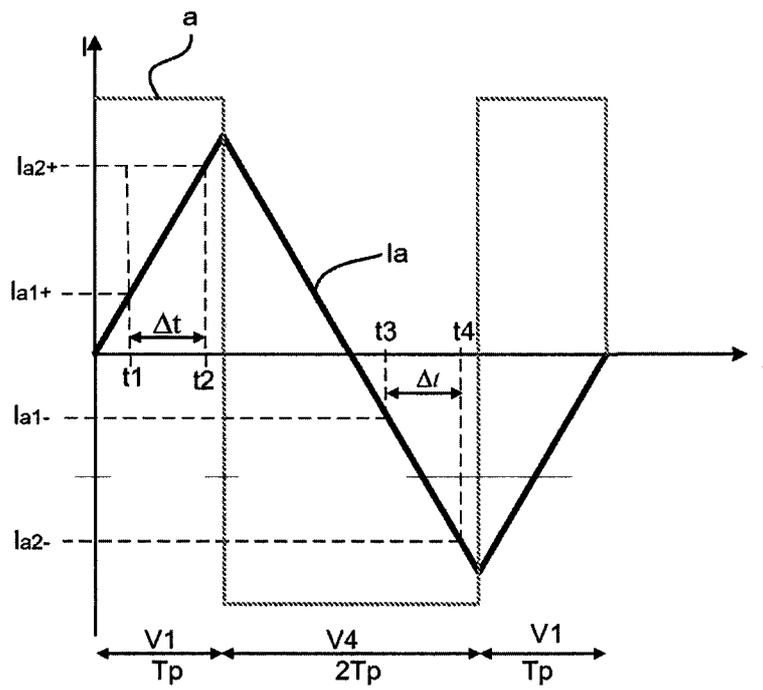


图 4

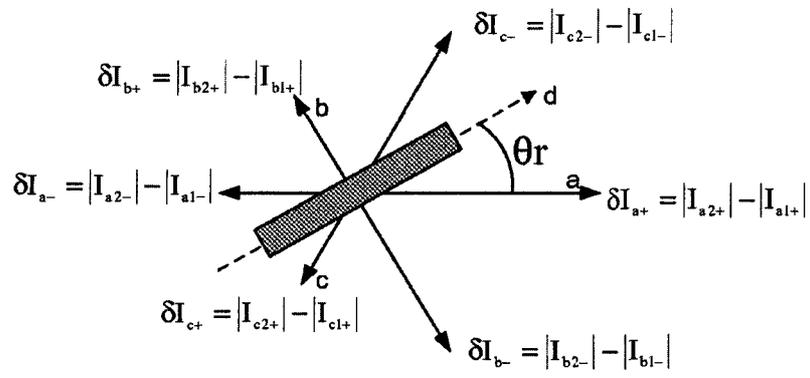


图 5