

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H02P 21/00 (2006.01)

H02P 7/00 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 01124701.0

[45] 授权公告日 2009年2月4日

[11] 授权公告号 CN 100459410C

[22] 申请日 2001.7.25 [21] 申请号 01124701.0

[30] 优先权

[32] 2001.4.27 [33] JP [31] 133159/2001

[73] 专利权人 富士电机株式会社

地址 日本神奈川

[72] 发明人 朱迪·玖色皮

[56] 参考文献

US6184638B1 2001.2.6

US5701066A 1997.12.23

US5559419A 1996.9.24

审查员 杨 静

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利  
商标事务所

代理人 王以平

权利要求书 5 页 说明书 14 页 附图 5 页

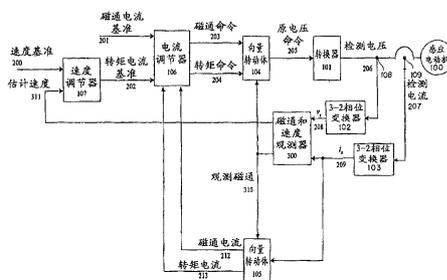
## [54] 发明名称

无速度传感器感应电动机的控制系统、观测器及控制方法

## [57] 摘要

本发明涉及无速度传感器感应电动机的控制系统、观测器及控制方法，具体公开了一种向量控制至少不包括一个速度传感器或位置传感器的感应电动机的控制系统，该控制系统包括：观测器单元，

其用于确定使定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益(K)，其中 $\hat{\cdot}$ 是观测值，并且所述观测器单元基于反馈增益 K 得到和输出观测磁通和估计速度的至少任一个；和控制单元，根据所述观测器单元的输出控制感应电动机。在这种方式，实施实现不包括速度传感器或/和转动位置传感器的感应电动机驱动器的全局稳定控制。



1. 一种向量控制至少不包括一个速度传感器或位置传感器的感应电动机的控制系统，并且该感应电动机表示为如下公式，

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{m\sigma} = \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad 0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

该控制系统包括:

一个观测器单元，其用于确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益  $K$ ，

其中  $\hat{\cdot}$  是观测值，

并且所述观测器单元基于反馈增益  $K$  得到和输出观测磁通和估计速度的至少任一个；和

一个控制单元，根据所述观测器单元的输出控制感应电动机。

2. 根据权利要求 1 所述的控制系统，其中所述观测器单元确定满足下式的一个值

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \angle G_1(j\omega) = \infty$$

作为用于是定子电流的估计误差系统的一个线性部分的传递函数  $G_1$  的反馈增益  $K$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的控制系统，其中所述观测器单元根据如下公式确定反馈增益  $K$

$$k_{2c} = -L_r \cdot \frac{R_s}{R_r} \cdot \omega_r$$

$$K = \begin{pmatrix} k_{2c} J \\ 0 \end{pmatrix}$$

其中  $L_r$  是转子电感， $R_s$  是定子电阻， $R_r$  是转子电阻， $\omega_r$  是转子角速度，且  $K_{2c}$  是反馈增益  $K$  的参数，并且

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad 0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 根据权利要求 1 所述的控制系统，其中

如果感应电动机的转动速度等于或大于一个预置值的话，所述观测器单元确定反馈增益的数值在预定范围内的反馈增益  $K$ 。

5. 根据权利要求 4 所述的控制系统，其中

所述观测器单元通过使用转子角速度 $\omega_r$ 的一个值确定限制在预定范围内的反馈增益K。

6. 根据权利要求1所述的控制系统，其中所述控制单元包括一个向量转动单元，根据所述观测器单元的输出进行向量转动，和

一个电流调节单元，根据所述观测器单元的输出把一个电流命令输出到感应电动机。

7. 一种用于向量控制至少不包括一个速度传感器或一个位置传感器的感应电动机的观测器，并且该感应电动机表示为如下公式：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{ss} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_s - L_m^2};$$

$$L_{rr} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_r}{L_r \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{m\sigma} = \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

所述观测器包括:

一个反馈增益确定单元, 其用于确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_i - i_i$  稳定的反馈增益;

其中  $\hat{\phantom{x}}$  是观测值; 和

一个输出单元, 根据反馈增益得到和输出观测磁通和估计速度的至少任一个。

8. 根据权利要求7所述的观测器, 其中

如果感应电动机的转动速度等于或大于一个预置值的话, 所述反馈增益确定单元确定反馈增益的数值在预定范围内的反馈增益。

9. 一种用于向量控制至少不包括一个速度传感器或一个位置传感器的感应电动机的方法, 其中该感应电动机表示为如下公式,

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = \begin{pmatrix} L_{sg} I & -L_{mg} I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{\sigma} = \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

该方法包括:

确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益

$K$ ,

其中  $\hat{\cdot}$  是观测值; 和

根据反馈增益  $K$  得到观测磁通和估计速度的至少任一个。

10. 根据权利要求 9 所述的方法, 其中

如果感应电动机的转动速度等于或大于一个预置值的话, 反馈增益的数值在预定范围内。

## 无速度传感器感应电动机的 控制系统、观测器及控制方法

### 技术领域

本发明涉及一种不带有速度传感器和/或转动位置传感器的感应电动机驱动器，更具体地说，涉及一种用来向量控制感应电动机驱动器的观测器。

### 背景技术

用于不带有速度传感器和/或转动位置传感器的直接场取向感应电动机驱动器的一种典型向量控制系统表示在图 1 中。

在不带有速度传感器的系统中，只有定子电压 206 和定子电流 207 由传感器 108 和 109 检测。

在该图中用于感应电动机 100 的向量控制根据独立施加的感应电动机 100 的转矩进行，并且磁通由一个转换器 101 供给。

对于表示在该图中的系统中的向量控制，一个速度调节器 107 在 PI 控制(部分作用和完整作用控制)下，从是电机速度的指令的估计速度基准 200、和作为反馈来自磁通和速度观测器 110 的估计速度 211，产生一个转矩电流基准 202，并且把产生的转矩电流基准 202 输出到一个电流调节器 106。电流调节器 106 输出一个电流，该电流从是转矩指令的转矩电流基准 202 和是磁通指令的磁通电流基准 201 在 PI 控制下调节。然后，一个向量转动体 104 把该电流值转换成在与合成电流向量同步旋转的坐标系(d-q 坐标系)中的一个相对值，并且把转换值施加到转换器 101 上作为一个初始电压命令 205。施加到电流调节器 106 上的磁通电流基准 201 在宽操作范围上能设置到一个常数值，而转矩电流基准 202 由一个 PI 环路根据估计速度 211 产生。

从转换器 101 施加到感应电机 100 上的电压和电流值作为检测电压 206 和检测电流 207 由传感器 108 和 109 检测。在检测电压 206 和检测

电流 207 由 3-2 相位变换器 102 和 103 转换成由一个两相坐标系代表的值之后, 把他们输入到磁通和速度观测器 110, 作为空间向量值  $v_s$ , 208 和  $i_s$ , 209.

磁通和速度观测器 110 从定子电压  $v_s$ , 208 和定子电流  $i_s$ , 209 得到一个观测转动体磁通 210, 把得到的磁通 210 输出到向量转动体 104 和 105, 估计一个转子速度, 及把估计的速度 211 输出到速度调节器 107.

向量转动体 104 在转子磁通的取向上根据观测的转子磁通 210 向量旋转磁通命令 203 和转矩命令 204, 并将向量旋转命令输出到转换器 101, 作为初始电压指令 205.

另外, 向量  $i_s$ , 209 由向量转动体 105 在转子磁通的取向上根据来自磁通和速度观测器 110 的观测磁通 210 向量转动, 以便得到磁通电流 212 和转矩电流 213, 这些电流由电流调节器 106 用作反馈信号.

一个基于磁通和速度观测器的 MRAS(模型基准自适应系统)初始在参考资料 1 中提出.

参考资料 1: H. Kubota 等的“感应电动机基于 DSP 的速度自适应磁通观测器(DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor)”, IEEE Trans. Industry Applicat., vol. 2, no. 2 pp.343-348, 1993.

根据参考资料 1, 一个定子电流和一个转子磁通用作一个独立变量集, 以便解释一种感应电动机. 因而, 由参考资料 1 证明的用于感应电动机的公式, 能重写为一个使用定子磁通和转子磁通作为状态变量的公式. 由于该重写过程是一种标准的线性转换, 所以这里把它省略.

在使用状态空间标识的定子取向基准坐标系中感应机器的经典表示如下.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]^T, \quad \phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]^T, \quad i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T, \quad v_s = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T$$

分别是与定子磁通、转子磁通、定子电流、及定子电压有关的空间向量。

其他符号如下：

$$L_{sg} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2}$$

$$L_{rg} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2}$$

$$L_{mg} = \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s$ 、 $R_r$ ：定子和转子电阻；

$L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$ ：定子、转子、及互感；

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ ：总泄漏系数；

$\omega_r$ ：转子角速度。

而且，根据参考资料 1，观测磁通值按如下表示。注意在本说明书中提到的观测和观测值表示在现代控制理论中的观测和观测值，并且指示来自输出的状态变量值的估计和其估计值。在如下公式中，观测值标记有“^”。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{\phi}_s \\ \hat{\phi}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \hat{\omega}_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\phi}_s \\ \hat{\phi}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s \\ + \begin{pmatrix} k_1 I + k_2 J \\ k_3 I + k_4 J \end{pmatrix} \cdot (\hat{i}_s - i_s) = \hat{A} \hat{x} + B u + K e, \\ \hat{i}_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \hat{\phi}_s \\ \hat{\phi}_r \end{pmatrix} = C \hat{x} \end{cases} \quad (2)$$

在公式(2)中的输出反馈增益  $K$  用来修改估计误差和其确定的动态特性。

该速度用如下公式估计。

$$\frac{d}{dt}\hat{\omega}_r = k_{\omega} \cdot (\hat{i}_s - i_s) \times \hat{\phi}_r = k_{\omega} \cdot \hat{\phi}_r^T \cdot J \cdot e_s \quad (3)$$

其中  $k_{\omega}$  是一个任意增益。

根据参考资料 1, 在观测器公式(2)中的反馈增益  $K$  与比例常数  $k$  一起使用, 以便得到由公式(2)表示的磁通观测器的四个本征值  $\lambda_{obs}$ , 这些本征值与由公式(1)代表的相应电机的本征值  $\lambda_{mot}$  成比例。

$$\lambda_{obs} = K \cdot \lambda_{mot} \quad (4)$$

按如下文档证明公式(4)。

参考资料 2: Y. Kinpara 和 M. Koyama, “Speed sensorless Vector Control Method of Induction Motor Including A Low Speed Region(包括低速区域的感应电机的无速度传感器向量控制方法)” the Journal “D” of the Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 120-D, no. 2, pp. 223-229, 2000.

对于由参考资料 2 提出的用于反馈增益  $K$  的选择方法, 把几个不稳定操作条件强加在感应电动机上。特别是, 当定子频率接近“0”时, 一个观测器不收敛, 导致电机驱动器操作的无能力。

在感应电动机驱动器的扭矩 - 速度平面上的不稳定区域取决于在公式(4)中比例常数  $k$  的值。这种不稳定的区域收敛到与原频率相对应的单条线, 当常数  $k$  收敛到“0”时该原频率准确地为“0”。因而, 从磁通观测器生成的动态特性对于非常小的  $k$  值成为不可接收的缓慢。因此, 用于反馈增益  $K$  的这种选择方法不是一种良好的解决方案。

参考资料 2 提出了一种基于 Riccati 公式的方法作为用于公式(2)中的输出反馈增益  $K$  的选择方法, 该方法稳定驱动器。

对于该方法，如果  $G$ 、 $Q$ 、和  $R$  按如下定义

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix};$$

$$Q = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix};$$

$$R = \varepsilon_1 I$$

对于如下公式得到输出反馈增益  $K$ 。

$$K = PC^T R^{-1}$$

其中  $P$  是满足如下公式的唯一正的确解。

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + GQG^T = 0$$

对于使用 Riccati 公式的方法，改进磁通和速度观测器的稳定性，但必须选择一个不直接涉及全局操作稳定性的任意参数( $\varepsilon_1$ )，以得到输出反馈增益。如果不适当地选择该参数，则可能使观测器是不稳定的，或者有可能引起不可接受的大延迟。在任一种情况下，生成的操作不能在非常低的原频率下运行。

### 发明内容

产生本发明以克服上述问题，并且目的在于提供一种控制系统、一种观测器、及一种用于不带有速度传感器或位置传感器的感应电动机驱动器的控制方法，其操作对于全局操作频率是稳定的。

本发明假定一种器件或一种方法完成用于至少不包括一个速度传感器或位置传感器的感应电动机的向量控制。

本发明提供一种向量控制至少不包括一个速度传感器或位置传感器的感应电动机的控制系统，并且该感应电动机表示为如下公式，

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \ v_{s\beta}]^T$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{s\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{r\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{m\sigma} = \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

该控制系统包括:

一个观测器单元, 其用于确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益  $K$ ,

其中  $\hat{\cdot}$  是观测值,

并且所述观测器单元基于反馈增益  $K$  得到和输出观测磁通和估计速度的至少任一个; 和

一个控制单元, 根据所述观测器单元的输出控制感应电动机。

本发明还提供一种用于向量控制至少不包括一个速度传感器或一个位置传感器的感应电动机的观测器, 并且该感应电动机表示为如下公式:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \quad \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \quad \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{ss} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{rr} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{ms} = \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

所述观测器包括:

一个反馈增益确定单元, 其用于确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益;

其中  $\hat{\cdot}$  是观测值; 和

一个输出单元, 根据反馈增益得到和输出观测磁通和估计速度的至少任一个。

本发明还提供一种用于向量控制至少不包括一个速度传感器或一个位置传感器的感应电动机的方法, 其中该感应电动机表示为如下公式,

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s L_{sg} I & R_s L_{mg} I \\ R_r L_{mg} I & -R_r L_{rg} I + \omega_r J \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_s = Ax + Bu \\ i_s = (L_{sg} I \quad -L_{mg} I) \cdot \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = Cx \end{cases}$$

其中

$\phi_s = [\phi_{s\alpha} \ \phi_{s\beta}]$ : 与定子磁通有关的空间向量;

$\phi_r = [\phi_{r\alpha} \ \phi_{r\beta}]$ : 与转子磁通有关的空间向量;

$i_s = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]$ : 与定子电流有关的空间向量;

$v_s = [v_{s\alpha} \ v_{s\beta}]$ : 与定子电压有关的空间向量;

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$L_{m\sigma} = \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot L_m} = \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2};$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$R_s, R_r$ : 定子和转子电阻;

$L_s, L_r, L_m$ : 定子电感、转子电感、及其互感;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$ : 总泄漏系数;

$\omega_r$ : 转子角速度;

该方法包括:

确定使估计定子电流的估计误差的公式  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  稳定的反馈增益

$K$ ,

其中  $\hat{\cdot}$  是观测值; 和

根据反馈增益  $K$  得到观测磁通和估计速度的至少任一个。

根据本发明的控制系统包括一个观测器单元和一个控制单元。

观测单元通过使用定子电流的估计误差确定反馈增益  $K$ , 并且得到和输出基于反馈增益  $K$  的观测磁通和估计速度的至少一个。

控制单元根据观测器单元的输出控制感应电动机。

对于该系统, 只有对于反馈增益  $K$  的确定的限制是例如一个公式

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \angle G_i(j\omega) = \infty$$

就是说，能确定满足一个基于一个不同因数的条件的反馈增益  $K$ ，几乎没有限制。

而且，观测单元能配置成确定反馈增益的数值在预定范围内的反馈增益  $K$ ，如果感应电动机的转动速度等于或大于预置速度的话。

借助于这种配置，即使在“0”附近的操作频率下也能实现稳定的操作。

#### 附图说明

图 1 表示一种不带有速度传感器和/或转动位置传感器的直接场取向感应电动机驱动器的典型系统；

图 2 示范表示根据本发明一个最佳实施例的输出误差块；

图 3 表示一种根据最佳实施例不带有速度传感器或转动位置传感器的直接场取向感应电动机驱动器的系统；

图 4 示范表示一个磁通和速度观测器的配置；及

图 5 示范表示一个稳定增益计算机器的最简单配置。

#### 具体实施方式

下面参照附图将解释根据本发明的最佳实施例。

本发明采用至今在非线形控制理论中建立的几个结果。因此，能得到在每种可能操作条件下保证磁通和速度观测器的稳定性的反馈增益  $K$ ，而不大降低观测器的动态特性。

由于得到反馈增益  $K$ ，作为几乎没有电动机参数和操作速度的非常简单的函数，所以使其实施和实现显著容易。而且，不象至今提出的方法，根据本发明(特别条件)，即使原频率接近“0”，也能导出其值不会成为无限的反馈增益。

如果把转子角速度的误差设置为  $\Delta\omega_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$ ，则估计定子输出电流的估计误差  $e_i = \hat{i}_s - i_s$  由公式(1)和(2)成为如下：

$$e_i = Ce = C(sI_4 - A - KC)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ -\omega_r \end{pmatrix} J \hat{\phi}_r = G_i(s) \cdot \begin{pmatrix} -\Delta\omega_r J \hat{\phi}_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中  $s$  是拉普拉斯算子。

图 2 示范表示满足公式(5)的输出误差块。

如在图 2 中示范表示的那样，一个定子电流估计误差系统能看作非线性反馈传递函数和一个线性传递函数的互连。

如果在该图中满足如下两个条件，则稳定磁通和速度观测器。

条件 1: 表示在图 2 中的非线性反馈 20 满足作为用于非线性控制系统的稳定性确定方法熟知的 Popov 不等式。即，不取决于时间  $t$  的常数  $\gamma$  存在，并且对于每个  $t_1 > t_0$  满足如下不等式。

$$\int_0^{t_1} u_{ni}^T(\tau) \cdot y_{ni}(\tau) d\tau \geq -\gamma^2 \quad (6)$$

条件 2: 表示在图 2 中的线性稳定状态块 10 的线性传递函数  $G_1(s)$  是稳定的，并且在输入与输出之间的相位角落在  $\pm\pi/2$  的范围内。

由于机械构成元件对于条件 1 具有较低的动态特性，所以如果假定实际速度接近常数，则容易实现图 2 中的  $u_{ni} = e_i$ ,  $y_{ni} = \hat{\omega}_r J \hat{\phi}_r$ 。

从以上提供的公式(3)和(6)能导出如下公式。

$$u_{ni}^T y_{ni} = \frac{k_\omega}{s} \cdot (e_i^T J \hat{\phi}_r)^2 \quad (7)$$

显然，公式(7)满足 Popov 不等式(6)，因为公式(7)包括反馈增益  $K$ 。因此，图 2 满足条件 1。

其次，对于条件 2，考虑在公式(5)中的线性传递函数  $G_1(s)$ 。

假定没有反馈增益  $K(K=0)$ 。在这种情况下，尽管传递函数  $G_1(s)$  成为稳定的，但在输入与输出之间的相位位移对于显著低的频率在  $\pm\pi/2$  的范围外，这使得观测器不稳定。

因而，对于表示在图 2 中的系统的稳定性，必须确定一个增益矩阵  $K$  从而满足 Popov 稳定性条件，并且磁通观测器本身的动态矩阵  $(A+KC)$  的整体保持稳定。

能证实在公式(5)中的传递函数  $G_1(s)$  根据其原频率改变其符号。这按如下反映在相位上。

$$\left| \lim_{\omega \rightarrow 0^+} \angle \bar{G}_1(j\omega) \right| = \alpha \Rightarrow \left| \lim_{\omega \rightarrow 0^-} \angle \bar{G}_1(j\omega) \right| = \pi - \alpha \quad (8)$$

该公式意味着，当原频率是一个小的正或负值时实现稳定性的唯一途径是保证如下公式。

$$\left| \lim_{\omega \rightarrow 0} \angle \bar{G}_l(j\omega) \right| = \pi/2 \quad (9)$$

每当适当地选择满足如下公式(10)的反馈增益  $K$  时, 总满足公式(9).

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \angle G_l(j\omega) = \infty \quad (10)$$

只要满足公式(10), 由公式(2)表示的形式的任何反馈增益  $K$  是可接受的, 并且全局稳定磁通和速度观测器。

反馈增益  $K$  由公式(2)按如下定义。

$$K = \begin{pmatrix} k_1 I + k_2 J \\ k_3 I + k_4 J \end{pmatrix} \quad (11)$$

对于选择反馈增益  $K$ , 有能任意设置的四个参数( $k_1, \dots, k_4$ ), 并且对这种选择的唯一限制是公式(10)。因此, 对于全局稳定问题能提出多种选择, 并且根据其他条件, 从选择中能选择适当的一种。

例如通过按如下选择参数能简化用于反馈增益  $K$  的这种选择方法。

$$k_1 = k_4 = 0 \quad (12)$$

当证实反馈增益  $K$  的参数  $k_3$  不影响公式(10)的限制时, 仅证明增益参数  $k_2$  影响公式(10)的限制。因此, 能导出总满足公式(10)的反馈增益  $K$ 。

考虑到该事实, 参数  $k_2$  生成如下公式(13)。

$$k_2 = k_{2c} = -L_r \cdot \frac{R_s}{R_r} \cdot \omega, \quad (13)$$

从以上讨论, 能得到用来驱动反馈增益  $K$  的如下简单公式。

$$K = \begin{pmatrix} k_{2c} J \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

除原频率准确为“0”的特别条件之外, 满足公式(14)的反馈增益  $K$  在任何速度下或在任何原频率下稳定观测器, 其中磁通和速度观测器带有在原点处的其极之一(稳定极限)。

由公式(13)证明, 反馈增益  $K$  的参数  $k_{2c}$  随操作速度的增大线性地变大。然而, 由于感应机器的滑动限制, 对于足够高的速度不能使操作频率非常低。

为了解决该问题，对于从公式(14)得到的反馈增益  $K$  的值设置一个上限，并且如果它超过该范围，则削减该值落在一个特定范围内。例如，对于转子角速度  $\omega_r$ ，把近似为使用中的电机的额定滑动  $\omega_{s, rat}$  的两倍(或三倍)的操作速度，如名义值等，定义为对其进行削减的最大值，从而对于反馈增益  $K$  能设置上限。以这种方式，在“0”附近的操作频率下对驱动稳定性没有不利影响。

每当反馈增益  $K$  的参数  $k_3$  的值得到时，总满足公式(10)。因此，参数  $k_3$  的选择能用来改进由公式(2)表示的磁通和速度观测器的动态特性或稳定性余量。

作为参数  $k_3$  的选择任何标准技术可以是适用的。例如，通过线性化一个通过由公式(1)表示的电机和由公式(2)表示的观测器在平衡操作点附近配置的系统、或者通过使用从建立的线性控制理论能得到的多种工具，能得到参数  $k_3$ 。

每当对于参数  $k_3$  选择值时，观测器总保持全局稳定，只要从公式(12)和(13)得到的增益  $K$  的其他参数不变。

图 3 表示根据该最佳实施例的、不带有速度传感器或转动位置传感器的直接场取向感应电动机驱动器的控制系统。

与图 1 中所示的系统配置相比，一个磁通和速度观测器 300 布置在图 3 中所示的配置中，作为磁通和速度观测器 110 的替换。在该图中，与图 1 中所示的常规系统的那些相同的构成元件用相同的标号指示，并且其操作基本上与参照图 1 解释的那些相同。

根据该最佳实施例的全局稳定磁通和速度观测器 300 用在一个标准直接向量控制机构中。磁通和速度观测器 300 借助于由 3-2 相位变换器 102 和 103 从由传感器 108 和 109 测量的检测电压 206 和检测电流 207 转换成两相坐标系的电压向量  $v$ , 208 和电流向量  $i$ , 209 的使用，得到一个由向量转动体 104 和 105 用为场取向的观测转子磁通 310，并且把得到的磁通输出到向量转动体 104 和 105。磁通和速度观测器 300 配置成在图 3 中所示配置中的单个单元。然而，磁通和速度观测器 300 可以分别布置为一个磁通观测器和一个速度观测器。

另外，磁通和速度观测器 300 由电压向量  $v$ , 208 和电流向量  $i$ , 209 得到和输出一个估计转子速度 311。估计转子速度 311 用作用于一个速度调节器 107 的外部速度控制环路 211。

图 4 示范表示表示在图 3 中的磁通和速度观测器 300 的配置。

在表示在图 4 中的配置中，根据以上提供的公式(2)和(3)由电压向量  $v$ , 208 和电流向量  $i$ , 209 得到观测转子磁通 310 和估计转子速度 311，并且输出。

在磁通和速度观测器 300 中，算术运算单元 411 计算在一个输入测量电流向量  $i$ , 209 与一个磁通和速度观测器 300 本身计算的观测值 327 的差，并且把计算的差输出到乘法器 406 和 410，作为定子电流的估计误差  $e_i$  325。

乘法器 406 把估计误差  $e_i$  325 与由以后描述的稳定增益计算器 400 得到的反馈增益  $K$  相乘，并且把相乘结果输出到一个加法器 404。

另外，在磁通和速度观测器 300 中，一个电机估计器 401 由输入电压向量  $v$ , 208 及磁通和速度观测器 300 本身计算的估计转子速度 311 得到在公式(2)中的第一和第二项的值。然后，加法器 404 输出通过把从乘法器 406 输入的第三项  $Ke_i$  的值添加到来自电机估计器 401 的在公式(2)中的第一和第二项的和上得到的值。该值由一个积分器 403 积分。

积分器 403 的输出输入到乘法器 402 和 405、及电机估计器 401。电机估计器 401 使用积分器 403 的输出得到公式(2)的第一项。乘法器 402 把积分器 403 的输出与一个取决于电机特性的固定值矩阵  $[L_{sg}I - L_{mg}I]$  相乘，以便得到定子电流的观测值 327，观测值 327 由算术运算单元 411 用来得到定子电流的估计误差  $e_i$  325。乘法器 405 把积分器 403 的输出与一个矩阵  $[0(0 \text{ 矩阵})I]$  相乘，以便产生一个输出值 310。

乘法器 410 把定子电流的估计误差  $e_i$  325，与从乘法器 409 输出的由一个换位器 412 换位的观测转子磁通 310 和一个矩阵  $J$  323 相乘的结果相乘，并且把相乘结果输出到一个乘法器 408。乘法器 408 把该值与在公式(3)中的一个任意正增益值  $k_0$  相乘。一个积分器 407 积分该结果以得到估计转子速度 311。

稳定增益计算器 400 从磁通和速度观测器 300 本身计算的估计转子速度 311 和指示电机特性的固定参数, 得到满足公式(10)的用于稳定的反馈增益 K 326.

图 5 示范表示图 4 中所示的稳定增益计算器 400 的最简单配置.

具有图 5 中所示配置的稳定增益计算器 400 在反馈增益 K 326 的四个参数  $k_1$  至  $k_4$  中把参数  $k_1$ 、 $k_3$  和  $k_4$  设置到 0, 并且仅从估计转子速度 311 得到参数  $k_2$ .

根据公式(13)进行参数  $k_2$  的计算. 如果估计转子速度 311 的输入绝对值等于或大于一个限制器值  $\omega_{lim}$ , 一个限制器 501 把估计转子速度 311 削减到限制器值  $\omega_{lim}$ , 如由图 5 的曲线表示的那样, 以使绝对值落在限制器值范围内, 并且输出削减的估计转子速度 311, 考虑到其中由于用于计算的估计转子速度 311 太高或太低不满足公式(10)的情况.

然后, 一个乘法器 502 把该输出值 504 与一个取决于感应电动机 100 的标准参数的固定值  $-L_r \cdot R_s/R_r$  505 相乘, 以得到参数  $k_2$ . 一个算术运算单元 500 由参数  $k_2$  及  $k_1$ 、 $k_3$  和  $k_4$  的值 503(所有的值是 0)计算稳定反馈增益 K 326, 并且输出反馈增益 K 326.

如以上详细描述的那样, 根据本发明对于全局操作频率能实现稳定操作.

另外, 由于使用提出估计基于 MRAS 的磁通和速度观测器的反馈增益的过程, 所以有可能克服与即使原频率接近 0 的低速度下的代表性操作有关的问题, 这种低速度对于常规方法使一个磁通和速度观测器产生误差. 结果, 能实现驱动器的全局稳定操作.

而且, 即使原频率接近“0”, 也能导出其值不会成为无限的反馈增益.

更进一步, 通过解一个简单的代数式, 能得到稳定增益.

更进一步, 得到的一个反馈增益 K 作为几乎没有电机参数和操作速度的非常简单的函数. 因此, 能得到在每种可能操作条件下保证磁通和速度观测器的稳定性的反馈增益 K, 而不大降低观测器的动态特性. 因而, 非常容易工业化地实现和实施本发明.



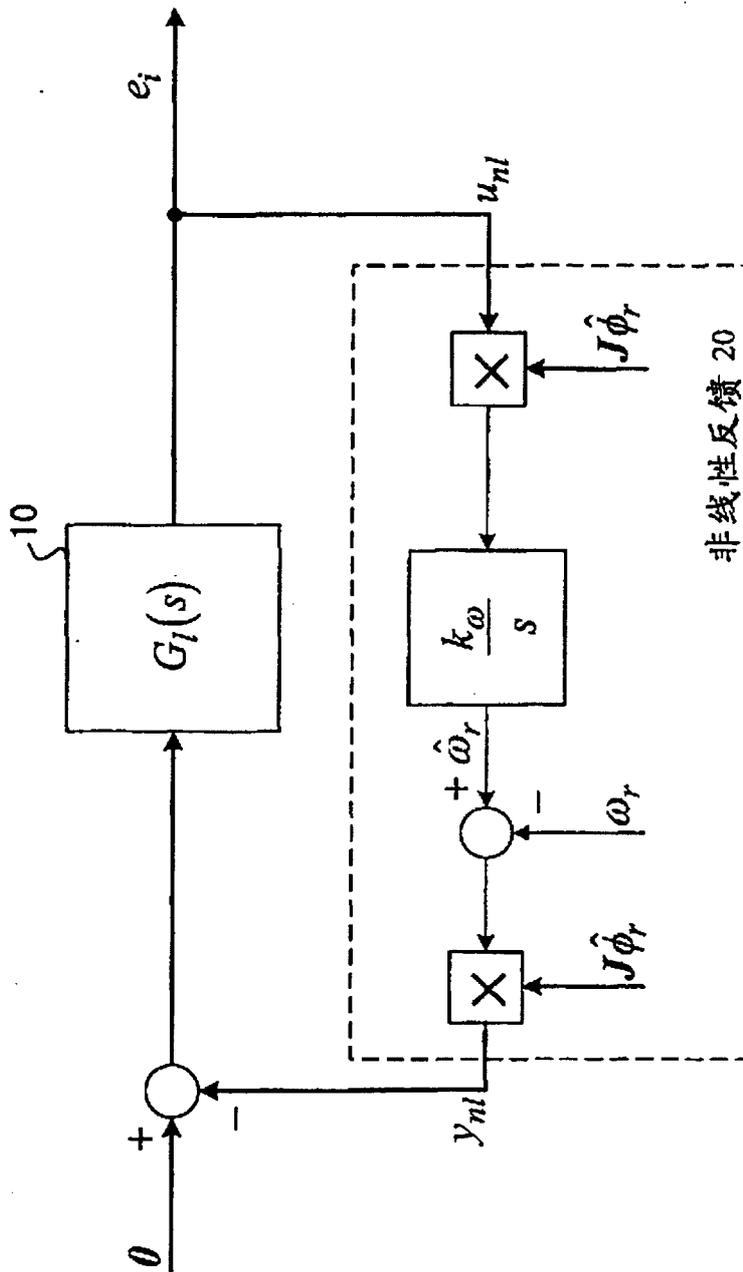


图 2

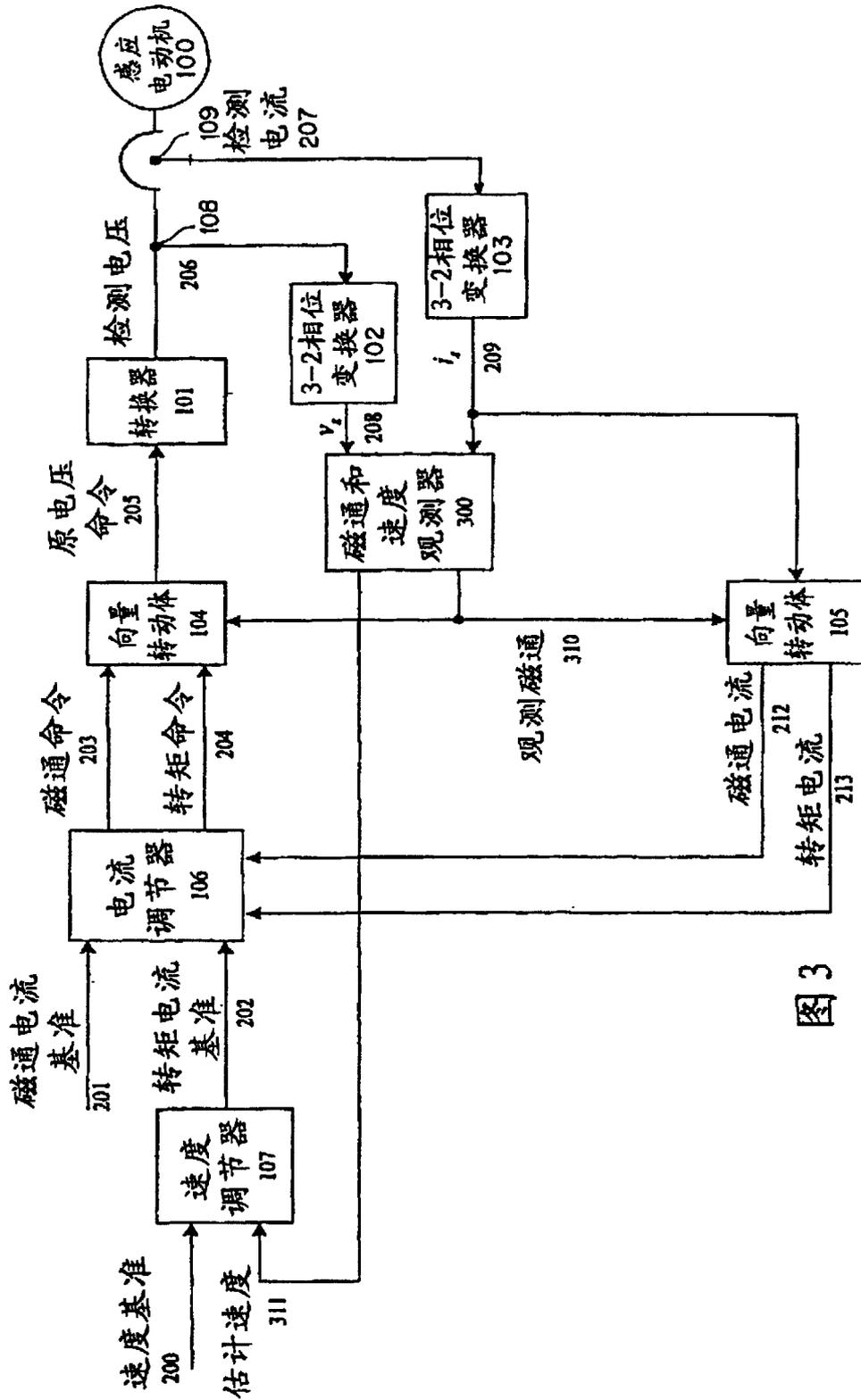


图 3

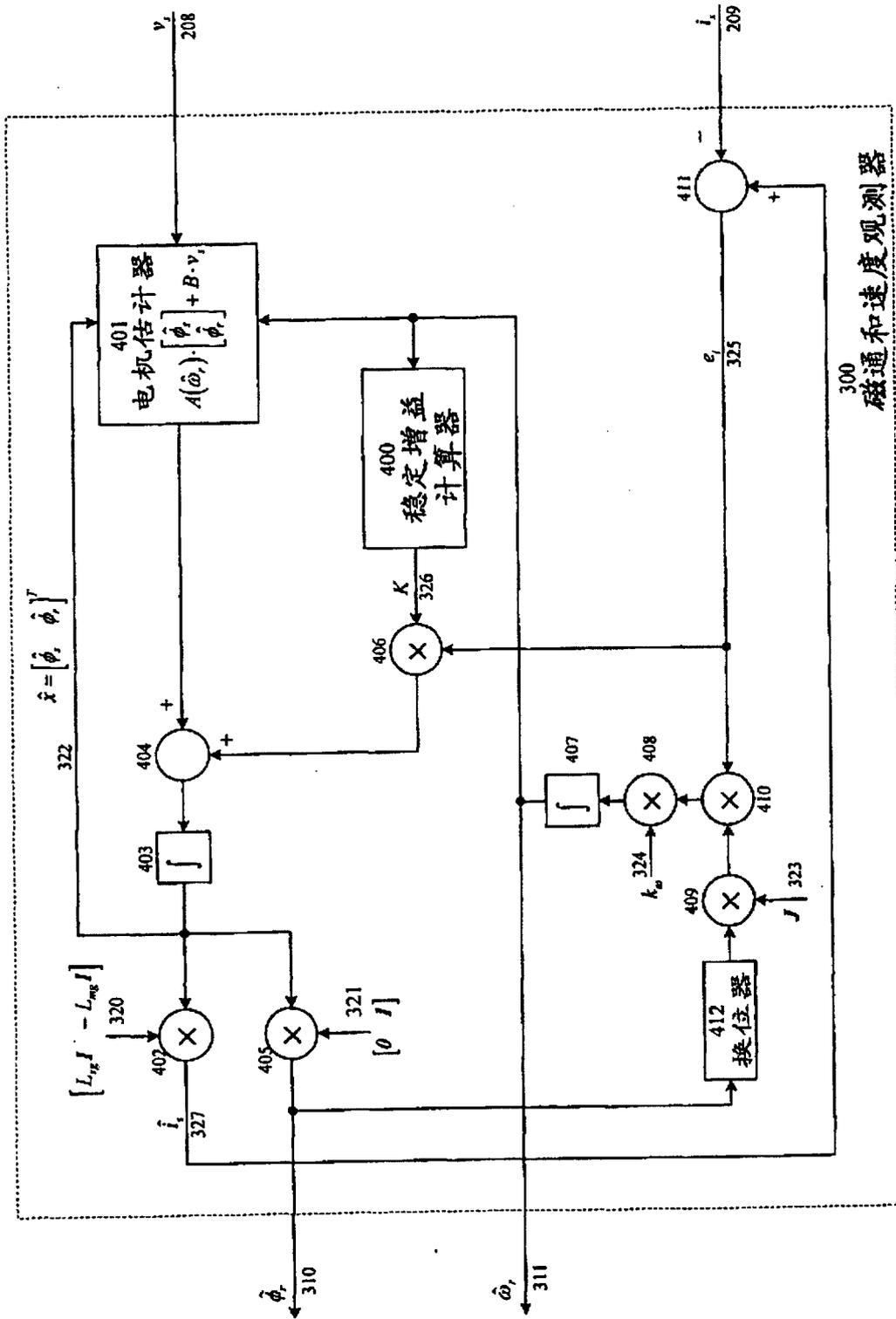


图 4

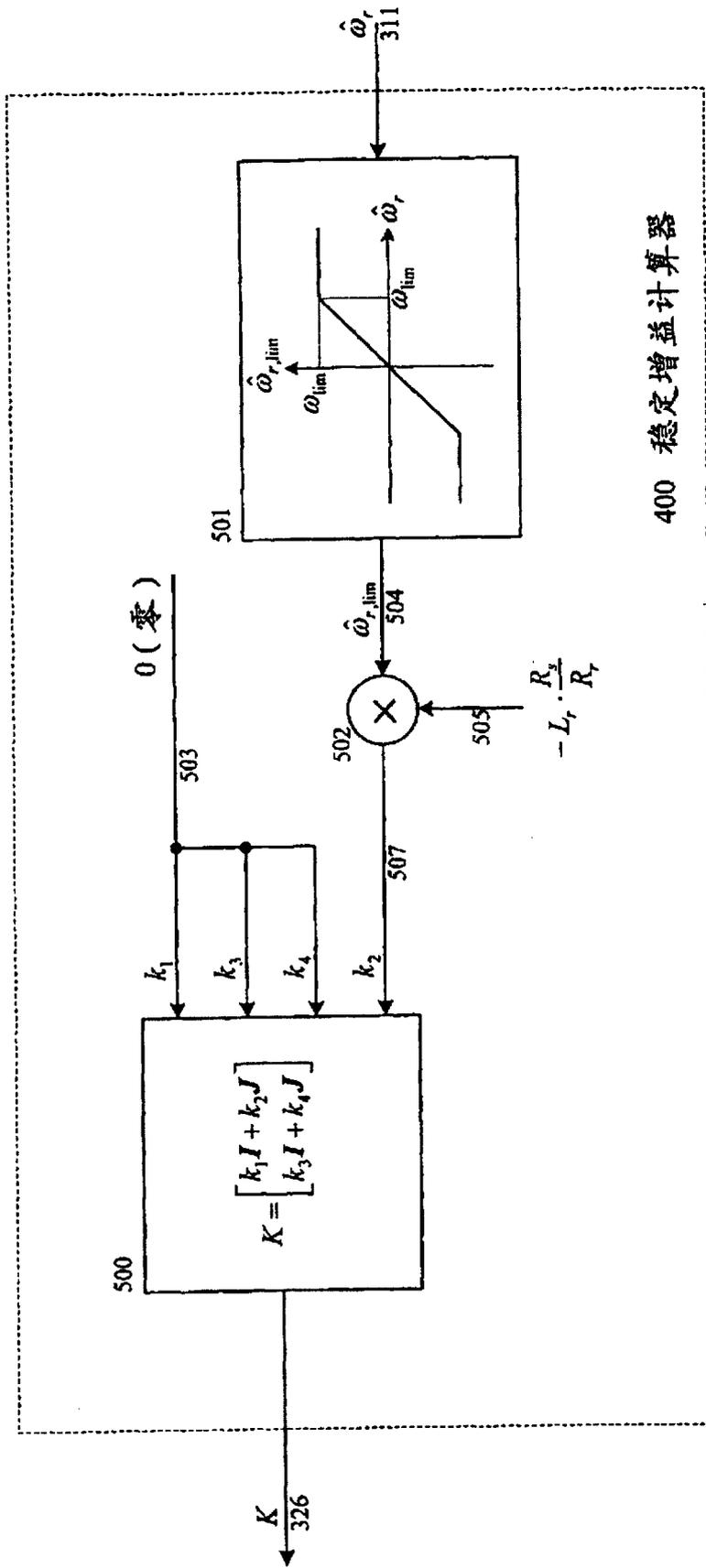


图5