

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第3900219号
(P3900219)

(45) 発行日 平成19年4月4日(2007.4.4)

(24) 登録日 平成19年1月12日(2007.1.12)

(51) Int. Cl. F I
H02P 29/00 (2006.01) H02P 5/00 X

請求項の数 2 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願平9-292883	(73) 特許権者	000006622
(22) 出願日	平成9年10月24日(1997.10.24)		株式会社安川電機
(65) 公開番号	特開平11-136983		福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
(43) 公開日	平成11年5月21日(1999.5.21)	(74) 代理人	100105647
審査請求日	平成16年9月10日(2004.9.10)		弁理士 小栗 昌平
		(74) 代理人	100115107
			弁理士 高松 猛
		(74) 代理人	100073874
			弁理士 萩野 平
		(74) 代理人	100093573
			弁理士 添田 全一
		(74) 代理人	100105474
			弁理士 本多 弘徳
		(74) 代理人	100108589
			弁理士 市川 利光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電動機速度制御装置および同装置のゲイン設定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

比例演算手段を備え、電動機の角速度を制御する速度制御手段と、粘性摩擦を時定数とする1次遅れ系でモデル化する等価剛体モデルと、比例演算を行う第1の補償手段と、積分演算を行う第2の補償手段と、前記速度制御手段が出力する電動機のトルク信号と前記第1の補償手段の出力と前記第2の補償手段の出力とを加算して、前記等価剛体モデルに入力するとともに、前記速度制御手段の速度信号から前記等価剛体モデルの出力を差し引いた差信号を前記第1の補償手段と前記第2の補償手段へ入力する手段と、

前記第1の補償手段の比例ゲインを第1のゲイン(s)と第2のゲイン(s)の積で定義し、前記第2の補償手段の積分ゲインを前記第2のゲインの2乗で定義し、前記速度制御手段の前記比例演算手段の比例ゲイン(K_v)にあらかじめ設定する帯域設定係数()を乗算して前記第2のゲイン(s)となす手段を備え、前記等価剛体モデルの出力を検出速度として前記速度制御手段へ帰還入力すること、

を特徴とする電動機速度制御装置。

【請求項2】

請求項1記載の電動機速度制御装置のゲイン設定において、前記帯域設定係数をあらかじめ設定した値に取り、前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲインを速度制御系の発振限界直前まで増加し、

10

20

前記帯域設定係数をあらかじめ設定した値より低い値に変更して、前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲインを速度制御系の発振限界直前まで増加することを繰り返すこと、を特徴とする電動機制御装置のゲイン設定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、高速応答のできる電動機速度制御装置と、その装置のゲイン設定方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

電動機の速度制御装置は、指令速度に追従動作する用途だけでなく、速度ループの外側に位置制御ループを付加することにより、高速位置決め動作の用途へも多く適用される。すなわち、速度制御系は速度指令に対して高速高精度で追従することが必要不可欠である。以下に、上記技術分野に関する従来の技術を列挙し、その特質を述べる。

(1) 位置差分による速度信号のみフィードバックする電動機速度制御装置。

この技術では、高速応答を実現するため、速度ループの比例ゲインを大きくすると、検出速度の高周波リップル成分を増幅し、トルク波形が乱れ、モータの音と振動が増大する問題が生じる。電動機速度制御装置で駆動する電動機が機構を動かす場合、前記トルク波形の乱れが機構および動力伝達機構の機械共振要素に対する加振源となり、あるいは、前記共振特性の存在が制御ループの安定余裕を損なうため、機構駆動時に共振音が発生したり、制御系が不安定になる問題点があり、よって、前記「トルク波形の乱れ」と「制御ループの安定余裕減少」により、前記電動機速度制御装置の比例ゲインの大きさが制限され、速度制御系の応答特性を改善できない問題点があった。

(2) 速度検出出力を低域通過フィルタに通す方法。

トルク波形を滑らかにするため、速度検出信号を低域通過フィルタに通し、ノイズを低減する方法が考えられるが、位相遅れの増加が制御ループの安定余裕を損なうため、速度制御系の比例ゲインを増加できず、応答特性が改善できない。

(3) 同一次元オブザーバを適用する方法。

トルク波形を滑らかにし、かつ制御ループの安定余裕を確保するため、同一次元(状態)オブザーバを速度制御系に併合することが考えられる。同一次元の状態オブザーバは予測型であるから、位相遅れが少ない速度信号を出力できることは容易に想像かつ実現できる。

(4) 等価剛体オブザーバによる制振制御方法。

機械共振要素の影響がある機構系を駆動する速度制御系の比例ゲインを、制御ループの安定余裕を確保して増大する手段として、「特願平6-127859」と「特願平7-233528」がある。これは、等価剛体オブザーバと低域通過フィルタ、高域通過フィルタ、制振ゲインからなる制御構造を速度制御系に追加した制御装置である。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

本発明に係る課題を整理すると、以下の4点となる。

(a) 一般に、状態オブザーバではクーロン摩擦などの外乱により、検出速度に定常偏差を生じるため、たとえ速度制御系が比例積分型であっても、速度制御系の出力が指令速度と一致しない問題がある。したがって、通常の状態オブザーバはそのままでは速度制御系に併合できない。

(b) 等価剛体オブザーバを用いた電動機制御装置では調整すべきパラメータ数が多い。速度制御系の通常の制御パラメータに加えて、オブザーバゲインと低域通過フィルタの時定数と高域通過フィルタの時定数と制振ゲインの少なくとも合計3個のパラメータの追加調整が必要である。

(c) 速度制御系が高速応答化する調整手順がない、あるいは複雑。

このように、従来技術では、調整すべきパラメータが多いため、調整手順が複雑となり、

10

20

30

40

50

調整手順が提示できない問題があった。

これの解決策として、従来は、オブザーバゲインを速度制御系のゲインより大きく取ること、オブザーバの動特性が速度制御系の動特性へ影響しない設定を行い、制御系調整を簡略化することが多い。

(d) オブザーバを併合した速度制御系が容易に応答特性を改善できる構造になっていない。すなわち、この場合、オブザーバ(フィルタとして)のカットオフ周波数が高いため、機械共振成分をオブザーバでは十分に低減できず、やはり、速度制御系の比例ゲインを増大できなかった(詳細後述)。

以上の検討により、本発明の目的は、等価剛体オブザーバを併合した速度制御系において、調整すべきパラメータが少なく速度制御系の比例ゲインを増加できる制御構造を持った制御装置の提供と、前記制御装置において容易に速度応答を高速化できる調整手順を提示することにある。

【0004】

【課題を解決するための手段】

以下の記述において、記号の意味を下記の通りとする。

s : ラプラス演算子

s_1 : オブザーバの減衰定数

s_2 : オブザーバの周波数帯域

K_v : 比例ゲイン

$C f(s)$: 後述する安定化補償器の伝達関数

前記課題を解決するため、請求項1記載の発明によれば、比例演算手段を備え、電動機の角速度を制御する速度制御手段と、粘性摩擦を時定数とする1次遅れ系でモデル化する等価剛体モデルと、比例演算を行う第1の補償手段と、積分演算を行う第2の補償手段と、前記速度制御手段が出力する電動機のトルク信号と前記第1の補償手段の出力と前記第2の補償手段の出力とを加算して、前記等価剛体モデルに入力するとともに、前記速度制御手段の速度信号から前記等価剛体モデルの出力を差し引いた差信号を前記第1の補償手段と前記第2の補償手段へ入力する手段と、

前記第1の補償手段の比例ゲインを第1のゲイン(s_1)と第2のゲイン(s_2)の積で定義し、前記第2の補償手段の積分ゲインを前記第2のゲインの2乗で定義し、前記速度制御手段の前記比例演算手段の比例ゲイン(K_v)にあらかじめ設定する帯域設定係数(α)を乗算して前記第2のゲイン(s_2)となす手段を備え、前記等価剛体モデルの出力を検出速度として前記速度制御手段へ帰還入力すること、を特徴としている。

また、請求項2記載の発明によれば、請求項1記載の電動機速度制御装置のゲイン設定において、

前記帯域設定係数をあらかじめ設定した値に取り、

前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲインを速度制御系の発振限界直前まで増加し、前記帯域設定係数をあらかじめ設定した値より低い値に変更して、前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲインを速度制御系の発振限界直前まで増加することを繰り返すこと、を特徴としている。

【0005】

【発明の実施の形態】

図1は、本発明の電動機速度制御装置の基礎となる速度制御装置の原理を示すブロック線図である。機械共振を伴う制御対象は、同じ出願人に係る特開平7-337057号公報と特願平7-233528にて既に出願済みであり、それは図1(a)に示す等価剛体101と機械共振系102とに分離したブロック線図で表現できる。説明を簡単にするため、電動機等の粘性摩擦が小さいと考え、 $D_0 = 0$ とする。また、イナーシャ $J = 1$ と簡単化する。

前記問題点より、まず、外乱補償機能を持った同次元オブザーバが必要なため、本発明

10

20

30

40

50

では、外乱補償機能を備えた等価剛体オブザーバ（特開平7-337057号記載）を用いると、電動機の検出速度とトルク指令信号を入力とするオブザーバが、図1(a)に示す構造で構成できる。但し、本発明では、前記公開公報に開示された技術とは異なり、等価剛体オブザーバ110の等価剛体モデル111の出力を検出速度として速度制御系にフィードバックする。これにより速度を出力とする等価剛体オブザーバを併合した速度制御系が構成できる。オブザーバの安定化補償器112は、下記の(1)式で示される。

【数1】

$$C_f(s) = 2\zeta_s \omega_s + \frac{\omega_s^2}{s} \quad \dots (1)$$

10

図1(a)の速度制御手段103は、速度指令と速度フィードバックを入力し、電動機のトルクが出力できればよく、制御構造上の規定は不要である。代表例として、比例制御、比例積分制御、積分比例制御の各制御構造をそれぞれ図2の(b)、(c)、(d)に示す。

普通は、この段階までブロック線図をまとめるとこれ以上の変形を行わないが、本発明では、等価剛体オブザーバ110を併合した速度制御系の構造を本質的に解釈するため、敢えてさらなる変形を試みる。

図1(a)のブロック線図を(a)(b)(c)と変形すると、速度フィードバックパスは、2つの等価フィードバックループ（外側と内側の2つ）に分離できることがわかる。図1(c)の中の内側の等価フィードバックループは図1(d)のようにさらに変形できる。

20

内側の等価フィードバックループのブロックの伝達関数 $G_{in}(s)$ は、(1)式より、下記の(2)式となる。

【数2】

$$\frac{s}{s + C_f(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \quad \dots (2)$$

分子が s の2乗の項のみであり、分母が s の2次の多項式であるから、 $G_{in}(s)$ のブロックは高域通過フィルタである。

30

外側の等価フィードバックループのブロックの伝達関数 $G_{out}(s)$ は、下記の(3)式となる。

【数3】

$$\frac{C_f(s)}{s + C_f(s)} = \frac{2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \quad \dots (3)$$

分子が s の1次の多項式であり、分母が s の2次の多項式であるから、 $G_{out}(s)$ のブロックは低域通過フィルタである。

40

前記内側と外側の等価フィードバックループの本質を考えるため、図1(d)で、負荷機械の剛性が高い理想状態を考える。この時、 $R(s) = 1$ と仮定できるので、内側と外側の等価フィードバックループをまとめると、下記の(4)式となる。

【数4】

$$\frac{s}{s + C_f(s)} + \frac{C_f(s)}{s + C_f(s)} = 1 \quad \dots (4)$$

(4)式より、図1(a)に示す同次元の等価剛体オブザーバを併合した速度制御系は、速度信号の低域成分をフィードバックする外側と、高域成分をフィードバックする内側

50

の、各フィードバックループを等価的に持つと見なせる。

一般に、速度制御系の安定化には制御ループの高周波域の位相特性が関係しており、外乱抑圧性能等の定常特性には、制御ループの低周波域のゲイン特性が関係することがわかっている。図1(d)において、高域通過フィルタと低域通過フィルタの周波数帯域を、速度制御ループで目標としている帯域よりも低く設定する(ω_s の設定による)場合、制御ループの安定性は、内側のループで決まり、定常特性は、外側のループで決まる。内側のループは機械共振要素 $R(s)$ を通らないので、高域通過フィルタの帯域を ω_s により、最適に設定することで、速度ループゲインを増加でき、速度制御系の目標応答特性が改善できることがわかる。従来の先行発明には、オブザーバ併合制御系のこのような性質を利用する考えがなかったため、漠然とオブザーバの周波数帯域を制御系の周波数帯域よりも広く取っていた。例えば、下記の(5)式としていた。

【数5】

$$\omega_s > 2K_V \quad \dots (5)$$

このような場合、前記内側ループの安定化作用がほとんど無くなるため、外側ループのみで、安定化と定常特性改善を同時に図ることとなり、オブザーバを利用しない場合と同じである。すなわち、内側ループの長所を生かしていないことになる。

本発明では前記内側及び外側ループを積極的に利用し、速度ループの応答特性を改善するため、帯域設定係数 α を使って ω_s を下記の(6)式で決定し、

【数6】

$$\omega_s = \alpha K_V \quad \dots (6)$$

前記 α を下記の(7)式とする。

【数7】

$$\alpha < 1 \quad \dots (7)$$

このようにすることで、オブザーバの周波数帯域が自動的に速度制御ループで目標とする帯域(速度ループゲイン K_V でほぼ決まる)よりも低く設定でき、応答特性を改善できる制御構造を構築することが可能となる。

オブザーバの ω_s は、0.7 ~ 2.0 の適当な値に固定すれば良い。

前記 α は、機械の剛性や機械共振周波数、それに速度制御系の目標等を考慮して、0.01 ~ 1.00 の範囲で適当な値を設定する。前記 α は0以外の値であれば、制御系を不安定化せず、速度制御系の安定化補償器のパラメータ設定と独立して設定できるため、パラメータ設定が容易である。

図2は、図1(d)のブロック線図と条件付きで等価なブロック線図である。

α を適当に決定しても制御系が不安定化しない理由を以下に説明する。オブザーバのみによる制御系の安定性を考えるため、 $R(s) = 1$ と仮定し、機械共振を除外すると、図1(d)のブロック線図は、図2(a)となる。図2の速度フィードバックパス中のブロックの伝達特性は、(2)、(3)、(6)式より、下記の(8)式となる。

【数8】

$$\frac{s}{s + C_f(s)} + \frac{C_f(s)}{s + C_f(s)} = \frac{s^2 + 2\zeta_s(\alpha K_V)s + (\alpha K_V)^2}{s^2 + 2\zeta_s(\alpha K_V)s + (\alpha K_V)^2} = 1 \quad \dots (8)$$

(8)式で、前記範囲の ω_s に対し、分母の多項式は安定であり、かつ、右辺 = 1 であるから、速度制御ループは0以外の前記 α の値に対して安定である。

図3は、本発明の電動機速度制御装置および同装置のゲイン設定方法に係るブロック線図

10

20

30

40

50

である。

図中、速度制御装置 1 は、電動機（図示せず）および電動機のトルクを制御する手段（図示せず）からなるトルク制御装置 1 1 と、安定化補償器 1 2 とイナーシャ補償ゲイン 1 3 を備えた速度制御系である。1 0 は等価剛体であり、ブロック中の J は電動機と負荷機構の全イナーシャ、D₀ は、電動機と負荷機構の粘性摩擦、1 4 は機械共振系である。

前記安定化補償器 1 2 は、速度指令信号と速度フィードバック信号を入力し、加速度信号を検出する。加速度信号にイナーシャ補償ゲイン 1 3 をかけて、トルク指令信号を出力する。速度制御系を比例制御（P 制御）とする場合は、前記安定化補償器 1 2 は速度指令信号から速度フィードバック信号を減算する減算ブロックと比例演算要素とし、比例積分制御（PI 制御）の時は、前記減算ブロックと比例要素と積分要素で構成する。積分比例制御（IP 制御）時も前記減算ブロックと比例要素と積分要素で構成できる。いずれの場合も比例ゲインは K_v である。（これら補償器の構造を図 2（b）、（c）、（d）に図示している。）

10

前記トルク制御装置 1 1 は、前記トルク指令信号を入力し、電動機のトルクを制御し、電動機速度信号を出力する。電動機が角度センサのみ備えている場合、検出角度の差分演算により、角速度信号を得て、これを検出速度信号として出力する。

速度オブザーバとして適用する等価剛体オブザーバ 2 は、等価剛体モデル 2 1 と、電動機のイナーシャと負荷のイナーシャを加えた全イナーシャ J で定義するイナーシャモデル 2 2 と、オブザーバの安定化補償器 2 3 とで構成する。

オブザーバの安定化補償器 2 3 は、第 1 の補償手段である比例演算手段 2 3 1 と、第 2 の補償手段である積分演算手段 2 3 2 とで構成する。

20

比例演算手段 2 3 1 のゲインは、第 1 のゲインである s_1 と第 2 のゲインである s_2 の積を 2 倍したもので定義し、積分演算手段 2 3 2 のゲインは s_2 の二乗で定義する。 s_1 はオブザーバの減衰定数である。オブザーバの周波数帯域 ω_s は、帯域設定定数 ω_{s0} と速度制御系の比例ゲイン K_v との積で定義する。

速度オブザーバに関して、電動機のモデル 2 1 と全イナーシャモデル 2 2 とオブザーバの減衰定数 s_1 はあらかじめ値を設定できるので、帯域設定定数 ω_{s0} だけが調整すべきパラメータである。すなわち、速度制御系の各制御パラメータの他には、帯域設定定数 ω_{s0} のみ調整すればよい。

次に、ゲイン調整手順の例を述べる。

30

帯域設定係数（ ω_{s0} ）を調整することで、前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲイン（ K_v ）を増加する調整手順例を以下に示す。

ステップ 1：帯域設定係数（ ω_{s0} ）をあらかじめ設定した値に取る。

ステップ 2：前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲイン（ K_v ）を速度制御系の発振限界（振動を始める限界）直前まで増加する。

ステップ 3：前記帯域設定係数（ ω_{s0} ）をあらかじめ設定した値より低い値に変更する。

ステップ 4：前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲイン（ K_v ）を速度制御系の発振限界（振動を始める限界）直前まで増加する。

ステップ 5：前記ステップ 3 とステップ 4 を繰り返すことにより、前記速度制御手段の比例演算手段の比例ゲイン（ K_v ）をステップ 2 の限界値よりも増加できる。

40

図 4 は、本発明の電動機速度制御装置および同装置のゲイン設定方法の図 3 に示す一実施例に於ける計算機シミュレーション結果を示した説明図である。

簡単のため速度制御系は比例制御系とし、速度指令は直線加速波形とした。

図 4（a）は、前記速度制御手段の比例ゲインを発振が始まる値（ $K_v = 188 [1/s]$ ）に設定した場合である。電動機のトルク波形と速度波形の振動が成長し、速度制御装置として使用できる状態でないため、これ以上速度指令への追従性能を上げることができない。

図 4（b）は、速度制御手段の各制御ゲイン（ $K_v = 188 [1/s]$ ）をそのまま、等価剛体オブザーバを速度推定器として併合した場合である。

電動機のトルク波形と速度波形振動が無くなっており、速度制御装置として余裕をもって

50

使用できる。このため、速度指令への追従性能を改善することが期待できる。帯域設定係数()は10%としており、本発明の原理として説明したように、前記帯域設定係数を下げることにより、制御系の安定性が回復していることがわかる。

図4(c)は、前記の等価剛体オブザーバを速度推定器として併合した状態で、帯域設定係数を、そのまま(= 10%)で、速度制御手段の比例ゲインのみを、188 [1/s]から565 [1/s]へ、すなわち3倍に増加した場合である。

小さな振動もすぐに減衰しているので、速度制御装置として使用できる。

速度指令への追従特性が図4(a)の場合と比べ著しく改善されていることがわかる。帯域設定係数を下げただけという、非常に簡単な調整によって、速度制御手段の比例ゲイン(Kv)が簡単に3倍に増加しており、本発明の目的が十分に達成されたことが理解でき

10

【0006】

【発明の効果】

以上述べたように、本発明によれば、機構を駆動する速度制御装置において、機械共振現象の発生を抑えながら前記速度制御装置の比例ゲインを増加できる効果があるため、前記速度制御装置の指令追従特性を著しく改善できる。

特に、本発明のシミュレーション結果によれば、機械共振現象の存在にもかかわらず、簡単なゲイン調整にて、比例ゲインを3倍も改善できるという著しい改善効果が出ている。さらに、等価剛体オブザーバを併合した速度制御系において、本来、速度制御系として調整すべき制御パラメータに追加して調整すべきパラメータが、帯域設定定数のみの、わず

20

か1個でよいという効果もある。(従来 of 先行発明は、2個以上必要であった)。このことから、「帯域設定定数を下げることにより、速度制御手段の比例ゲインを上げる」という様に、前記制御装置において容易に速度応答を高速化し得るような調整手順を、具体的に提示できるといった効果があるとともに、上記の調整が単純なため、広範囲に高性能な速度制御装置を提供できる効果が生じる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の電動機速度制御装置の原理を示すブロック線図である。

【図2】(a)：図1(d)のブロック線図と条件付きで等価なブロック線図である。

(b)：比例制御で実現する速度制御手段である。

(c)：比例積分制御で実現する速度制御手段である。

30

(d)：積分比例制御で実現する速度制御手段である。

【図3】 本発明の電動機速度制御装置および同装置のゲイン設定方法の一実施例に係るブロック線図である。

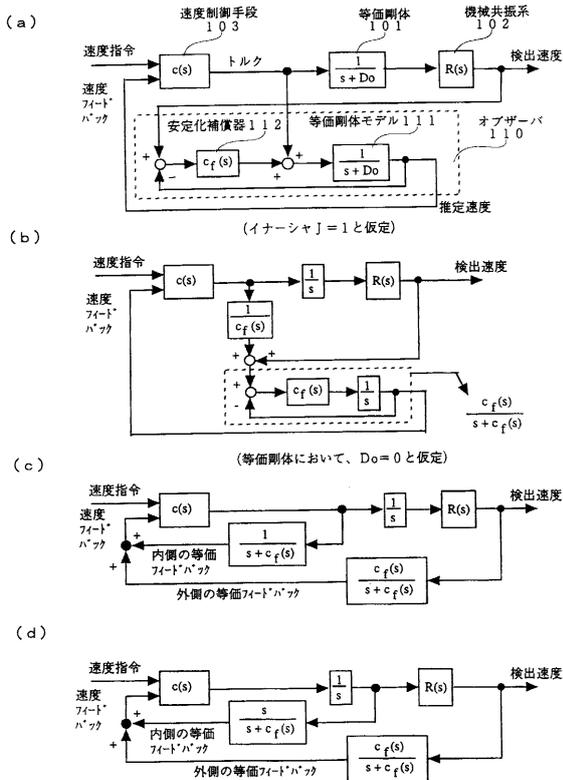
【図4】 図3に示す一実施例に於ける計算機シミュレーション結果を示した説明図である。

【符号の説明】

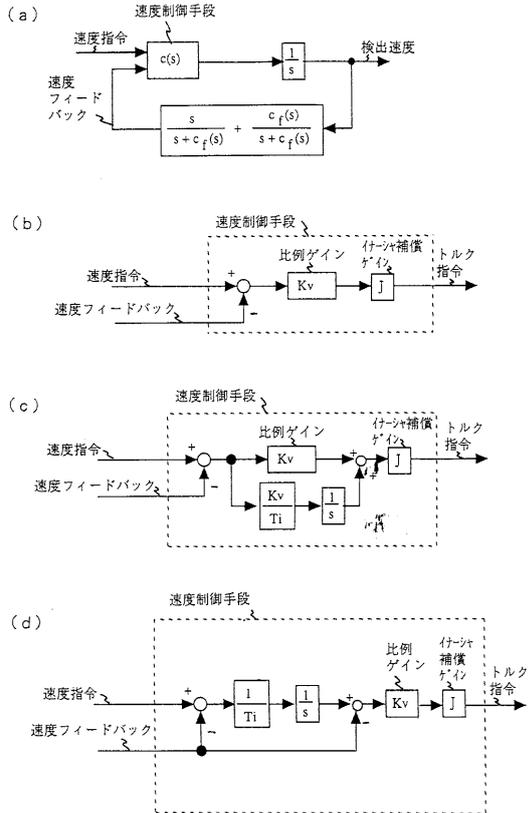
- 1 速度制御装置、
- 2、110 等価剛体オブザーバ、
- 10、101 等価剛体
- 11 トルク制御装置、
- 12、112 安定化補償器、
- 13 イナーシャ補償ゲイン、
- 14、102 機械共振系
- 21、111 等価剛体モデル、
- 22 イナーシャモデル、
- 23、112 安定化補償器
- 103 速度制御手段
- 231 比例演算手段、
- 232 積分演算手段。

40

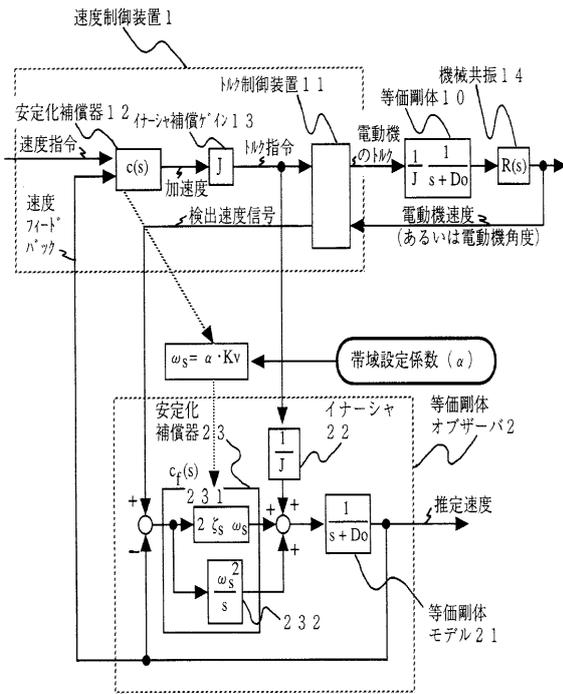
【図1】



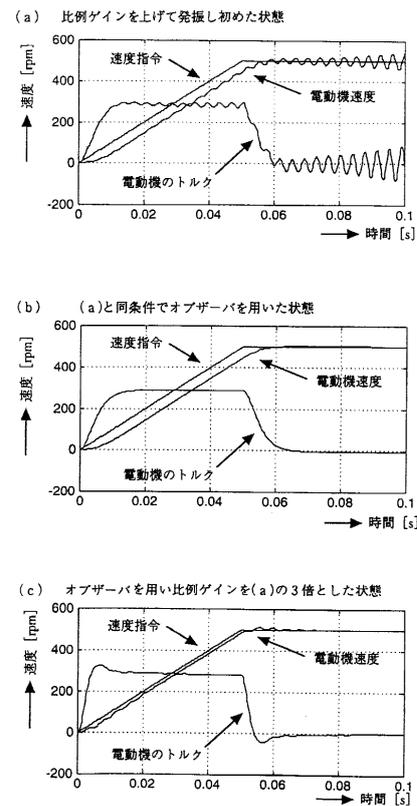
【図2】



【図3】



【図4】



フロントページの続き

- (72)発明者 加来 靖彦
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 株式会社安川電機内
- (72)発明者 北澤 隆
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 株式会社安川電機内
- (72)発明者 大久保 整
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 株式会社安川電機内

審査官 梶本 直樹

- (56)参考文献 特開平07-337057(JP,A)
特開平09-056183(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02P 29/00
G05B 13/02