



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0092995
 (43) 공개일자 2016년08월05일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F16C 32/04 (2006.01) *F04D 19/04* (2006.01)
F04D 29/048 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
F16C 32/0451 (2013.01)
F04D 19/042 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2016-7012128
- (22) 출원일자(국제) 2014년10월03일
 심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2016년05월09일
- (86) 국제출원번호 PCT/JP2014/076500
- (87) 국제공개번호 WO 2015/079802
 국제공개일자 2015년06월04일
- (30) 우선권주장
 JP-P-2013-246961 2013년11월29일 일본(JP)

- (71) 출원인
에드워즈 가부시키키가이샤
 일본국 치바켄 야치요시 요시하시 1078-1
- (72) 발명자
가와시마 도시아키
 일본국 치바켄 야치요시 요시하시 1078-1 에드워즈 가부시키키가이샤 내
- (74) 대리인
한양특허법인

전체 청구항 수 : 총 10 항

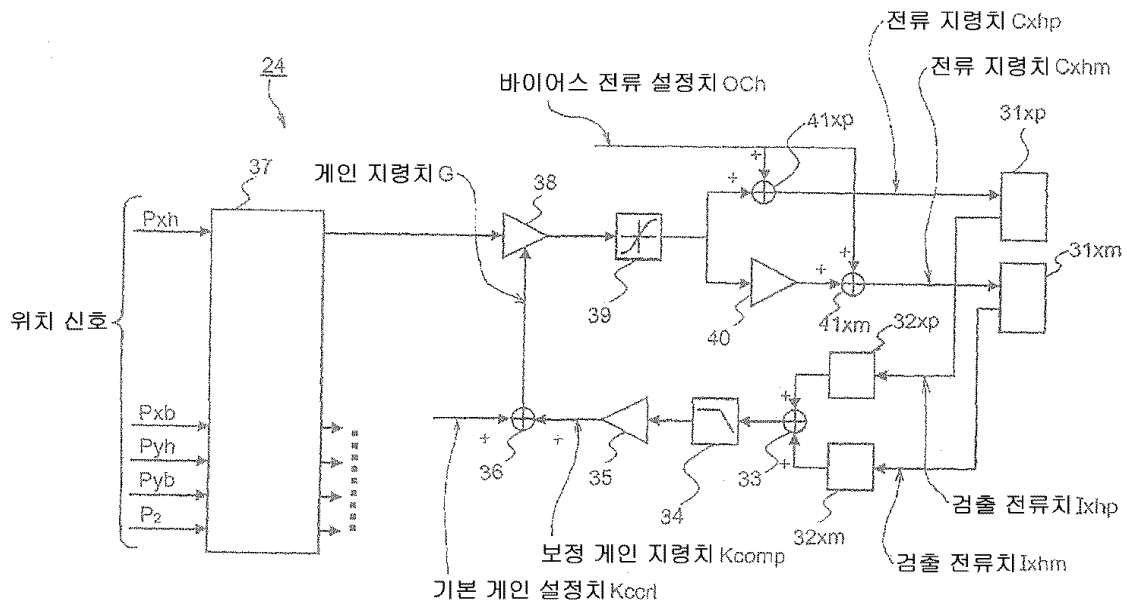
(54) 발명의 명칭 자기 베어링 장치, 및 진공 펌프

(57) 요약

초기 조정이 간단하며, 제어 기기의 메모리 용량을 늘리지 않고, 간단한 알고리즘으로 최적의 베어링 제어를 행할 수 있는 자기 베어링 장치를 제공한다.

한 쌍의 공급기(32xp, 32xm), 및 가산기(33)가, 도시하지 않는 자기 베어링의 로터축을 래디얼 방향으로 반대 방향(뒷면에 계속)

대표도



향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 전자석의 각 전류 정상치(I_p , I_m)를 취득하고, 각각 제곱화하여 가산한다. 그리고, 자기 베어링의 부착 자세에 따라 각 전자석의 전류를 최적으로 변화시키기 위해, 보정 계수 연산기(35)가, 제곱·가산된 전류 정상치($I_p^2+I_m^2$)로부터 전자석에 작용하는 보정 계인 지령치 K_{comp} 를 계산한다. 다음에, 전자석의 제어 회로의 기본 계인 K_{ctrl} 에 보정 계인 지령치 K_{comp} 를 가산한 계인 지령치 G 를 계인 앰프(38)로 입력한다. 계인 앰프(38)는, 계인 지령치 G 에 의거하여, 보정된 전류 지령치를 생성하여, 자기 베어링을 최적으로 제어한다.

(52) CPC특허분류

F04D 29/048 (2013.01)

F16C 32/0489 (2013.01)

F16C 2231/00 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

전자석의 전자력에 의해 로터축을 비접촉으로 지지하는 자기 베어링과, 상기 자기 베어링을 제어하는 제어 기기를 구비한 자기 베어링 장치로서,

상기 제어 기기는,

상기 자기 베어링의 상기 로터축을 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류 정상치를 취득하는 전류 취득 수단과,

상기 전류 정상치로부터, 상기 자기 베어링의 부착 자세에 기인하여 발생하는 한 쌍의 상기 전자석의 흡인력에 의한 불안정 스프링 상수를 보상하는 보정 계인 지령치를 구하는 보정 계수 연산 수단과,

상기 보정 계인 지령치와 상기 자기 베어링의 부착 자세에 관계없이 일의적으로 정해지는 기본 계인을 가산하여 계인 지령치를 구하는 제1 가산 수단과,

상기 계인 지령치에 의거하여 생성된 전류 지령치에 의해, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류를 제어하는 전류 제어 수단을 구비하고 있는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 전류 취득 수단은, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류의 전류 검출치, 또는, 상기 전류 지령치에 의거하여, 상기 전류 정상치를 취득하는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 3

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서,

상기 전류 제어 수단은, 상기 로터축의 위치 정보를 가지는 힘(力) 지령 중간 신호를 상기 계인 지령치에 의해 제어하고, 상기 계인 지령치에 의해 제어된 상기 힘 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치를 가산하여 상기 전류 지령치를 생성하는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 4

청구항 1 내지 청구항 3 중 어느 한 항에 있어서,

상기 전류 지령치는, 한 쌍의 상기 전자석에 대해, 상기 불안정 스프링 상수를 없애고, 상기 로터축을 상기 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 힘만을 작용시키는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 5

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 전류 취득 수단은,

한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 상기 전류 정상치를 개별적으로 제공화하는 한 쌍의 제공화 수단과,

한 쌍의 상기 제공화 수단이 개별적으로 제공화한 각각의 전류 정상치를 가산하는 제2 가산 수단을 구비하고 있는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

한 쌍의 상기 제공화 수단과 상기 제2 가산 수단에 의해 제공·가산된 전류 정상치를 평균화 처리하여 상기 보

정 계수 연산 수단에 건네주는 로우패스 필터를 더 구비하고 있는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 로우패스 필터는, 공진 주파수가 대략 1Hz인 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 8

청구항 3 내지 청구항 7 중 어느 한 항에 있어서,

상기 전류 제어 수단이 생성한 전류 지령치와 상기 전자석의 흡인력의 관계를 나타내는 비선형 특성을 상기 바이어스 전류 설정치에 의해 선형화하는 선형화 수단을 더 구비하고 있는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 선형화 수단은, 한 쌍의 상기 전자석의 양쪽에 전류가 흐르고 있지 않을 때만 기능하는 것을 특징으로 하는 자기 베어링 장치.

청구항 10

청구항 1 내지 청구항 9 중 어느 한 항에 기재된 자기 베어링 장치를 구비하고 있는 것을 특징으로 하는 진공 펌프.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 전자석의 전자력에 의해 회전체를 비접촉으로 지지하는 자기 베어링과, 그 자기 베어링을 제어하는 제어 기기를 구비한 자기 베어링 장치, 및 그 자기 베어링 장치를 이용한 진공 펌프에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 종래부터, 회전체(강체)가 가지는 6자유도 중 5자유도를 전자석의 전자력(흡인력)으로 지지하는 자기 베어링(5축 제어 자기 베어링)이 널리 알려져 있다. 이러한 자기 베어링은, 베어링 부분이 비접촉이기 때문에 마모가 없어 장수명이며, 베어링 손실이 미소하기 때문에 초고속 회전 기기에 적용이 가능하고, 또한, 베어링의 강성·감쇠 특성을 임의로 조정할 수 있어, 저진동·저소음 회전이 가능한 등, 우수한 성능을 구비하고 있다. 따라서, 이러한 자기 베어링은, 예를 들면, 반도체 제조 장치 등에 이용되는 진공 펌프, 터보 분자 펌프, 및 터빈 발전기, 공작기계 등에 이용되고 있다.

[0003] 그런데, 이러한 자기 베어링에 있어서는, 로터축을 회전시키면, 자기 베어링을 구성하는 전자석의 자속에 의해 로터축에 와전류에 의한 철손이 생겨, 그 로터축의 온도가 상승될 우려가 있다. 그 때문에, 자기 베어링을 구비한 진공 펌프의 허용 유량이 저하되는 등의 불편이 발생한다. 이 때, 진공 펌프를 수직으로 설치한 경우는, 자기 베어링을 구성하는 전자석의 전류(여자 전류)를 낮게 함으로써, 로터축의 온도 상승을 억제할 수 있다. 그러나, 전자석의 전류를 낮게 한 경우는, 진공 펌프를 수직으로 설치하여 안정적으로 회전하고 있어도, 그 진공 펌프를 수평으로 다시 설치하면, 로터축의 자중이 래디얼 방향으로 전자석측에 가해지기 때문에, 자기 베어링의 강성(부양 반발력)이 저하되어 로터축이 안정적으로 회전하지 않게 되는 경우가 있다. 반대로, 진공 펌프를 수평으로 설치하여 로터축이 안정적으로 회전하고 있는 경우는, 그 진공 펌프를 수직으로 다시 설치하면, 자기 베어링의 강성(축심으로의 반발력)이 너무 올라가, 축심 어긋남 등에 의한 발진이나 진동이 일어나기 쉬워진다.

[0004] 즉, 반도체 제조 장치 등의 설치 상태에 따라, 진공 펌프는, 수직 방향, 경사 방향, 수평 방향, 도립(倒立) 방향 등, 어느 자세로도 자유롭게 부착할 수 있다. 이 때, 진공 펌프의 부착 자세에 따라, 자기 베어링의 전자석으로 최적의 전류를 흐르게 할 수 있도록, 제어 기기로부터 전자석으로 흐르는 전류를 최적적으로 제어해야 한다. 그래서, 진공 펌프(즉, 자기 베어링의 로터축)의 설치 방향에 따라, 항상 최적의 전류를 흐르게 하도록 전류 보상 회로의 제어 정수를 선택적으로 전환하는 자기 베어링 장치의 기술이 개시되고 있다. 이 때, 선택적으로 전

환하는 제어 정수는, 진공 펌프의 설치 방향에 따라 실험 등에 의해 미리 구해 둔 정수를 사용하고 있다(예를 들면, 특허 문헌 1 참조).

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 일본국 특허공개 평 9-42290호 공보

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 그러나, 상기 특허 문헌 1에 개시된 기술은, 미리 구해 둔 복수의 제어 정수를 진공 펌프(자기 베어링의 회전축)의 설치 방향에 따라 전환하고 있기 때문에, 제어 회로 내에 많은 제어 정수를 기억시킬 필요가 있다. 그 때문에, 제어 기기의 메모리 용량이 커져 버릴 우려가 있다. 또, 진공 펌프의 부착 자세와 전류의 제어 정수의 관계의 초기 조정에 많은 시간이 걸릴 우려도 있다. 또한, 진공 펌프의 설치 방향이 동적으로 변화하는 용도에 있어서는, 제어 정수의 전환의 순간에 전류가 과도적으로 변동하기 때문에, 자기 베어링에 진동이 생길 우려가 있다.

[0007] 그래서, 초기 조정이 간단하며, 제어 기기의 메모리 용량을 늘리지 않고, 간단한 알고리즘으로 최적의 베어링 제어를 행하기 위해 해결해야 할 기술적 과제가 발생되고 있는 것이며, 본 발명은, 이 과제를 해결하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명은 상기 목적을 달성하기 위해 제안된 것이며, 청구항 1에 기재된 발명은, 전자석의 전자력에 의해 로터축을 비접촉으로 지지하는 자기 베어링과, 상기 자기 베어링을 제어하는 제어 기기를 구비한 자기 베어링 장치로서, 상기 제어 기기는, 상기 자기 베어링의 상기 로터축을 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류 정상치를 취득하는 전류 취득 수단과, 상기 전류 정상치로부터, 상기 자기 베어링의 부착 자세에 기인하여 발생하는 한 쌍의 상기 전자석의 흡인력에 의한 불안정 스프링 상수를 보상하는 보정 계인 지령치를 구하는 보정 계수 연산 수단과, 상기 보정 계인 지령치와 상기 자기 베어링의 부착 자세에 관계없이 일의적으로 정해지는 기본 계인을 가산하여 계인 지령치를 구하는 제1 가산 수단과, 상기 계인 지령치에 의거하여 생성된 전류 지령치에 의해, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류를 제어하는 전류 제어 수단을 구비하는 자기 베어링 장치를 제공한다.

[0009] 이 구성에 의하면, 전류 취득 수단이, 자기 베어링의 로터축을 래디얼 방향으로 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 전자석의 각 전류 정상치를 취득한다. 이것에 의해, 보정 계수 연산 수단이, 각 전류 정상치로부터, 자기 베어링의 부착 자세에 기인하여 발생하는 한 쌍의 전자석의 흡인력에 의한 불안정 스프링 상수를 보상하기 위한 보정 계인 지령치를 산출한다. 그리고, 제1 가산 수단이, 보정 계인 지령치와 자기 베어링의 부착 자세에 관계없이 일의적으로 정해지는 기본 계인을 가산하여 계인 지령치를 구한다. 이것에 의해, 전류 제어 수단은, 계인 지령치에 의거하여 전류 지령치를 생성하고, 그 전류 지령치에 의거하여, 한 쌍의 전자석의 각각에 흐르는 전류를 제어한다. 따라서, 자기 베어링의 부착 자세가 변화해도, 항상 최적의 상태로 자기 베어링을 제어할 수 있다.

[0010] 또, 청구항 2에 기재된 발명은, 청구항 1에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 전류 취득 수단은, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류의 전류 검출치, 또는, 상기 전류 지령치에 의거하여, 상기 전류 정상치를 취득하는 자기 베어링 장치를 제공한다.

[0011] 이 구성에 의하면, 전류 취득 수단은, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류의 전류 검출치로부터 전류 정상치를 취득해도 되고, 전류 제어 수단이 생성한 전류 지령치로부터 전류 정상치를 취득해도 된다. 전자의 경우는 피드백 제어된 결과의 전류 검출치를 취득하여 보정 계인 지령치를 생성하고 있지만, 후자의 경우는 피드백 제어되기 전의 전류 지령치를 취득하여 보정 계인 지령치를 생성하고 있으므로, 후자가 제어의 응답성이 빠르다.

- [0012] 또, 청구항 3에 기재된 발명은, 청구항 1 또는 청구항 2에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 전류 제어 수단은, 상기 로터축의 위치 정보를 가지는 힘(力) 지령 중간 신호를 상기 게인 지령치에 의해 제어하고, 상기 게인 지령치에 의해 제어된 상기 힘 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치를 가산하여 상기 전류 지령치를 생성하는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0013] 이 구성에 의하면, 전류 제어 수단은, 로터축의 위치 정보를 가지는 힘 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치를 가산하여 전류 지령치를 생성하고 있으므로, 로터축의 변심 상태에 대응하여 적정하게 베어링 제어를 행할 수 있다.
- [0014] 또, 청구항 4에 기재된 발명은, 청구항 1 내지 청구항 3 중 어느 한 항에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 전류 지령치는, 한 쌍의 상기 전자석에 대해, 상기 불안정 스프링 상수를 없애고, 상기 로터축을 상기 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 힘 만을 작용시키는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0015] 이 구성에 의하면, 보정 게인 지령치와 기본 게인을 가산함으로써, 대향하는 한 쌍의 전자석의 일순간 후에 있어서의 합계 흡인력은, 한 쌍의 전자석의 현재의 합계 흡인력에 대해, 로터축을 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 스프링력 만이 가해지는 상태가 되어, 자기 베어링의 불안정한 스프링 상수에 의한 흡인력은 없애 버린다. 즉, 대향하는 한 쌍의 전자석은, 로터축을 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 힘 만이 작용하게 된다.
- [0016] 또, 청구항 5에 기재된 발명은, 청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 전류 취득 수단은, 취득한 상기 전류 정상치를 개별적으로 제공화하는 한 쌍의 제공화 수단과, 한 쌍의 상기 제공화 수단이 개별적으로 제공화한 각각의 전류 정상치를 가산하는 제2 가산 수단을 구비하고 있는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0017] 이 구성에 의하면, 전류 취득 수단에 있어서, 한 쌍의 제공화 수단이 각 전자석으로부터 취득한 전류 정상치를 개별적으로 제공화하고, 또한, 제2 가산 수단이 제공화된 2개의 전류 정상치를 가산하고 나서, 보정 계수 연산 수단으로 입력하고 있으므로, 보정 계수 연산 수단은, 보다 고정밀도의 보정 게인 지령치를 구할 수 있다.
- [0018] 또, 청구항 6에 기재된 발명은, 청구항 5에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 한 쌍의 상기 제공화 수단과 상기 제2 가산 수단에 의해 제공·가산된 전류 정상치를 평균화 처리하여 상기 보정 계수 연산 수단에 건네주는 로우패스 필터를 더 구비하고 있는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0019] 이 구성에 의하면, 전류 취득 수단(한 쌍의 제공화 수단과 제2 가산 수단)은, 제공·가산된 전류 정상치를 로우패스 필터에 통과시키고 나서 보정 계수 연산 수단으로 송신하고 있으므로, 자기 베어링의 회전 주파수에 기인하는 노이즈나 리플을 제거할 수 있다. 이것에 의해, 보정 계수 연산 수단은 노이즈나 리플을 포함하지 않는 보정 게인 지령치를 실현할 수 있다.
- [0020] 또, 청구항 7에 기재된 발명은, 청구항 6에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 로우패스 필터는, 공진 주파수가 대략 1Hz인 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0021] 이 구성에 의하면, 로우패스 필터는, 공진 주파수가 1Hz 정도로 설정되어 있으므로, 자기 베어링의 제어의 응답성을 저하시키는 일은 없다.
- [0022] 또, 청구항 8에 기재된 발명은, 청구항 3 내지 청구항 7 중 어느 한 항에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 전류 제어 수단이 생성한 전류 지령치와 상기 전자석의 흡인력의 관계를 나타내는 비선형 특성을, 바이어스 전류 설정치에 의해 선형화하는 선형화 수단을 더 구비하고 있는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0023] 이 구성에 의하면, 전자석의 흡인력은 전류의 제곱에 비례하기 때문에 힘-전류 특성은 비선형성을 가지므로, 그 대로는 전류 제어 수단에 의한 전류의 제어가 불안정하게 되기 쉽다. 그래서, 바이어스 전류 설정치에 의해 힘-전류 특성을 선형화함으로써, 전류의 제어를 안정화시키고 있다.
- [0024] 또, 청구항 9에 기재된 발명은, 청구항 8에 기재된 자기 베어링 장치의 구성에 더하여, 상기 선형화 수단은, 상기 한 쌍의 전자석의 양쪽에 전류가 흐르고 있지 않을 때 만 기능하는 자기 베어링 장치를 제공한다.
- [0025] 이 구성에 의하면, 선형화 수단은, 바이어스 전류 설정치를 이용하여 힘-전류 특성을 선형화하고 있으므로, 한 쌍의 전자석의 양쪽에 전류가 흐르고 있을 때는 선형화 수단의 기능을 정지시킬 필요가 있다.
- [0026] 또한, 상기 제어 기기는, 1축 제어 자기 베어링 장치나 3축 제어 자기 베어링 장치의 제어에도 적용할 수 있지만, 상기 로터축이 가지는 6자유도 중 5자유도를 상기 전자석의 흡인력으로 지지하는 5축 제어 자기 베어링 장

치의 제어에도 적용 가능하다.

[0027] 예를 들면, 상기 제어 기기를 5축 제어 자기 베어링 장치에 적용하면, 진공 펌프, 터보 분자 펌프, 발전기용 수차, 정밀 공작기계 등에 이용되는 자기 베어링을 고정밀도로 제어할 수 있다.

[0028] 청구항 10에 기재된 발명은, 청구항 1 내지 청구항 9 중 어느 한 항에 기재된 자기 베어링 장치를 구비하고 있는 진공 펌프를 제공한다.

발명의 효과

[0029] 본 발명에 의하면, 자기 베어링을 구성하는 전자석의 전류를 낮게 설정한 상태로 자기 베어링의 설치 방향을 변경해도, 제어 기기는, 기본 계인과 불안정 보상 계인(보정 계인 지령치)을 가산한 계인 지령치에 의거하여 생성된 전류 지령치로, 자기 베어링을 제어하고 있다. 그 때문에, 자기 베어링의 설치 방향이 변화해도 그 자기 베어링의 강성이 변화하지 않기 때문에, 설치 방향의 변경에 기인하는 자기 베어링의 진동을 억제할 수 있다. 또, 비교적 간단한 알고리즘으로 제어 기기의 기능을 실현할 수 있기 때문에, 그 제어 기기의 메모리 용량을 작게 할 수 있으며, 또한, 진공 펌프의 설치 자세에 대응한 전류의 초기 조정을 간편하게 행할 수 있다. 또한, 자기 베어링의 설치 방향이 동적으로 변화하는 용도에 있어서도, 그 자기 베어링의 제어 계인이 연속적으로 변화하므로, 자기 베어링의 진동을 억제할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 5축 제어형 자기 베어링의 개략 구성도이다.
 도 2은 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링을 구비한 진공 펌프의 구성을 나타내는 단면도이다.
 도 3은 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 진공 펌프를 반도체 제조 장치에 부착했을 때의 부착 자세를 나타내는 개념도이다.
 도 4는 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링과 제어 기기로 이루어지는 자기 베어링 장치의 구성을 나타내는 개념도이다.
 도 5는 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링의 제어 기기의 제어 계통을 나타내는 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 발명은, 초기 조정이 간단하며, 제어 기기의 메모리 용량을 늘리지 않고, 간단한 알고리즘으로 최적의 베어링 제어를 행한다는 목적을 달성하기 위해, 전자석의 전자력에 의해 로터축을 비접촉으로 지지하는 자기 베어링과, 자기 베어링을 제어하는 제어 기기를 구비한 자기 베어링 장치로서, 제어 기기는, 자기 베어링의 로터축을 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 전자석의 각각에 흐르는 전류 정상치를 취득하는 전류 취득 수단과, 전류 정상치로부터, 자기 베어링의 부착 자세에 기인하여 발생하는 한 쌍의 전자석의 흡인력에 의한 불안정 스프링 상수를 보상하는 보정 계인 지령치를 구하는 보정 계수 연산 수단과, 보정 계인 지령치와 자기 베어링의 부착 자세에 관계없이 일의적으로 정해지는 기본 계인을 가산하여 계인 지령치를 구하는 제1 가산 수단과, 계인 지령치에 의거하여 생성된 전류 지령치에 의해, 한 쌍의 상기 전자석의 각각에 흐르는 전류를 제어하는 전류 제어 수단을 구비하고 있는 것에 의해 실현된다.

[0032] 즉, 본 발명의 실시 형태에 관련된 자기 베어링 장치는, 자기 베어링의 로터축을 래디얼 방향으로 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 전자석의 각 전류 정상치(I_p , I_m)를 취득한다. 그리고, 자기 베어링의 부착 자세에 따라 각 전류를 최적으로 변화시키기 위해, 취득한 각 전류 정상치(I_p , I_m)로부터 전자석에 작용하는 불안정 보상 계인(보정 계인 지령치) K_{comp} 를 계산한다. 다음에, 전자석의 제어 회로의 기본 계인 K_{ctrl} 에 보정 계인 지령치 K_{comp} 를 가산하여 계인 지령치를 생성한다. 그리고, 이 계인 지령치에 의해 보정된 전류 지령치로 자기 베어링을 제어한다. 이것에 의해, 자기 베어링의 부착 자세가 변화해도, 항상 최적의 상태로 자기 베어링을 제어할 수 있다.

[0033] [실시예]

[0034] 이하, 본 발명에 관련된 자기 베어링 장치의 적합한 실시예에 대해서, 도 1 내지 도 5를 참조하면서 상세하게 설명한다. 도 1은, 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 5축 제어형 자기 베어링의 개략 구성도이다. 이 5축

제어형 자기 베어링은, 래디얼 4축에 제어용 전자석과 변위 센서를 배치하고, 액시얼 1축에 제어용 전자석과 변위 센서를 배치한 구성을 나타내고 있다. 즉, 이 5축 제어형 자기 베어링은, 회전축 둘레의 자유도를 제외한 5 자유도(중심의 병진 운동에 대해서 3개의 자유도, 중심 둘레의 회전 운동에 대해서 2개의 자유도)의 운동을 능동적으로 제어하도록 구성되어 있다.

- [0035] 이 5축 제어형 자기 베어링은, DC 모터(1)에 의해 회전 구동되는 로터축(회전축)(2)의 상방측의 반경 방향(래디얼 방향)으로, 4개의 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym)이, 각각, X축, Y축마다 페어(한 쌍)로 배치되어 있다. 또, 각 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym)의 위치에 대응하여, 각각 래디얼 센서(4xp, 4xm, 4yp, 4ym)가 배치되어 있다. 동일하게 하여, DC 모터(1)의 하방측에 있어서의 로터축(2)의 반경 방향(래디얼 방향)으로 4개의 래디얼 전자석(5xp, 5xm, 5yp, 5ym)이, 각각, X축, Y축마다 페어로 배치되어 있다. 또, 각 래디얼 전자석(5xp, 5xm, 5yp, 5ym)의 위치에 대응하여, 각각 래디얼 센서(6xp, 6xm, 6yp, 6ym)가 배치되어 있다. 이러한 8개의 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym, 5xp, 5xm, 5yp, 5ym)에 의해 래디얼 자기 베어링을 구성하고 있다.
- [0036] 또한, 로터축(2)의 축 방향(엑시얼 방향)에는, 2개의 엑시얼 전자석(7zm, 7zp)이 상하 페어로 배치되어, 엑시얼 자기 베어링을 구성하고 있다. 또한, 로터축(2)의 하단부에는 엑시얼 센서(8z)가 배치되어 있다.
- [0037] 이러한 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym, 5xp, 5xm, 5yp, 5ym)과 래디얼 센서(4xp, 4xm, 4yp, 4ym, 6xp, 6xm, 6yp, 6ym)는, X축, Y축 방향이 각각 페어로 독립적으로 피드백 제어계를 구성하고, 전류(여자 전류)를 제어하여 각 래디얼 전자석의 흡인력을 조절하고 있다. 이것에 의해, 로터축(2)은, 회전축이 중심 위치가 되도록 제어되면서 DC 모터(1)에 의해 회전 구동된다. 또한, 엑시얼 전자석(7zm, 7zp)과 엑시얼 센서(8z)도 피드백 제어계를 구성하고 있다. 또한, 상술한 X축, Y축, Z축 방향을 상세하게 설명하면 다음과 같이 된다. 도 1의 상부 베어링측의 X축은 Xh축, 상부 베어링측의 Y축은 Yh축이 된다. 또, 도 1 하부 베어링측의 X축은 Xb축, 하부 베어링측의 Y축은 Yb축이 된다. 또한, 로터축(2)의 축 방향은 Z축이 된다.
- [0038] 도 2은, 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링을 구비한 진공 펌프의 구성을 나타내는 단면도이다. 이 진공 펌프는 복합 날개를 구비한 터보 분자 펌프를 구성하고 있다. 도 2에 나타내는 바와 같이, 진공 펌프(21)의 중앙 부분에 로터축(2)이 회전 가능하게 배치되고, 그 로터축(2)의 중앙부에는 그 로터축(2)을 회전 구동시키기 위한 DC 모터(1)가 부착되어 있다. 또, DC 모터(1)의 상부에 위치하는 로터축(2)의 래디얼 방향에는 래디얼 전자석(3)이 배치되고, 로터축(2)의 일방의 자기 베어링을 구성하고 있다. 또한, 래디얼 전자석(3)의 근방에는, 로터축(2)의 변위를 검출하기 위한 래디얼 센서(4)가 배치되어 있다.
- [0039] 또, DC 모터(1)의 하부에 위치하는 로터축(2)의 래디얼 방향에는 래디얼 전자석(5)이 배치되고, 로터축(2)의 타방의 자기 베어링을 구성하고 있다. 또한, 래디얼 전자석(5)의 근방에는, 로터축(2)의 변위를 검출하기 위한 래디얼 센서(6)가 배치되어 있다.
- [0040] 또한, 로터축(2)의 하단부 근방에는 엑시얼 방향으로 엑시얼 전자석(7)이 배치되어, 로터축(2)의 엑시얼 방향의 자기 베어링을 구성하고 있다. 또, 로터축(2)의 하단부에는 로터축(2)의 엑시얼 방향의 변위를 검출하기 위한 엑시얼 센서(8)가 배치되어 있다. 또한, 로터축(2)의 상단부 및 하단부에는, 각각, 보호용 드라이 베어링(11, 12)이 배치되어, 래디얼 자기 베어링(4, 5)의 발진 등에 의해 로터축(2)이 이상(異常)적으로 변위하는 것을 억제하고 있다.
- [0041] 또, 진공 펌프(21)의 고정측에는 스테이터 날개(13)가 배치되고, 그 스테이터 날개(13)에 대향하여 로터 날개(14)가 회전 가능하게 배치되어 있다. 이러한 구성에 의해, DC 모터(1)의 회전 구동에 의해 로터축(2)이 회전하면, 로터 날개(14)가 스테이터 날개(13)에 대해 상대적으로 회전하므로, 도시하지 않는 용기로부터의 공기는 흡기구 플랜지(15)로부터 흡인되어 배기구 플랜지(16)로부터 외부로 배출된다. 이러한 진공 펌프(21)는, 예를 들면, 800Hz(1.25msec/1회전)의 회전 속도로 고속 회전하기 때문에, 원하는 용기 내를 극히 높은 진공 상태로 유지할 수 있다.
- [0042] 도 3은, 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 진공 펌프를 반도체 제조 장치에 부착했을 때의 부착 자세를 나타내는 개념도이다. 도 3에 나타내는 바와 같이, 진공 펌프(21)는, 반도체 제조 장치(22)에 대해 최적의 자세로 부착된다. 예를 들면, 도면의 하방을 중력의 방향으로 하면, 진공 펌프(21a)와 같이 수직 방향으로 부착하거나, 진공 펌프(21b)와 같이 경사 방향으로 부착하거나, 진공 펌프(21c)와 같이 수평 방향으로 부착하거나, 혹은, 진공 펌프(21d)와 같이 도립 방향으로 부착하거나 할 수 있다.
- [0043] 도 3에 나타내는 바와 같이, 진공 펌프(21a)와 같이 반도체 제조 장치(22)에 대해 수직 방향으로 부착한 경우는, 자기 베어링의 로터축의 자중은 래디얼 방향의 전자석측에는 전혀 가해지지 않지만, 진공 펌프(21c)와

같이 반도체 제조 장치(22)에 대해 수평 방향으로 부착한 경우는, 자기 베어링의 로터축의 전체 자중이 래디얼 방향의 전자석에 가해진다. 즉, 진공 펌프(21)는 다양한 자세로 반도체 제조 장치(22)에 부착되기 때문에, 그 진공 펌프(21)에 구성되는 자기 베어링의 전자력에는, 중력의 벡터 방향에 기인하여, 로터축의 자중이 변동적으로 가산(감산)된다. 그 때문에, 진공 펌프(21)의 부착 자세에 관계없이 자기 베어링의 강성을 안정적으로 유지하기 위해서는, 비교적 간단한 알고리즘으로 자기 베어링의 전류를 적정하게 제어할 필요가 있다. 그래서, 본 발명의 실시예에서는, 자기 베어링의 부착 자세에 따라 변동하는 전자석의 불안정 스프링 상수의 힘(불안정 요소)을 추출하고, 이 불안정 요소를 불안정 보상 계인으로 하고 있다. 그리고, 자기 베어링의 부착 자세에 관계없이 일의적으로 정해져 있는 기본 계인에 불안정 보상 계인을 가산하여 계인 지령치를 생성하고 있다. 또한, 이 계인 지령치에 의거하여, 각각의 부착 자세에 최적의 전류 지령치를 생성하고, 생성된 전류 지령치에 의해, 한 쌍의 전자석을 적정하게 제어하고 있다. 이하, 이것에 대해서 상세하게 설명한다.

[0044] 도 4는, 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링과 제어 기기로 이루어지는 자기 베어링 장치의 구성을 나타내는 개념도이다. 도 4에 나타내는 바와 같이, 자기 베어링 장치(20)는, 자기 베어링(23)과 제어 기기(24)를 구비하여 구성되어 있다. 래디얼 방향의 자기 베어링(23)은, 로터축(2)의 x방향(+x~-x의 방향)에 있어서, 한 쌍의 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))이 대향하여 배치되어 있다. 또, 각각의 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))의 근방에는, 각각, x방향의 로터축 변위를 검출하는 래디얼 센서(+x 센서(4xp)와 -x 센서(4xm))가 배치되어 있다. 그리고, 각 래디얼 센서(+x 센서(4xp)와 -x 센서(4xm))로부터의 변위 신호 Sxp, Sxm이 제어 기기(24)로 피드백되고 있다. 또, 제어 기기(24)로부터의 제어 신호(전류) Ixp, Ixm이, x축의 한 쌍의 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))으로 공급되고 있다. 따라서, 변위 신호 Sxp, Sxm의 피드백에 의해 제어된 전류 Ixp, Ixm에 의해, +x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm)의 흡인력이 제어되고, 그 결과, 로터축(2)은 기준 위치(중심 위치)로 복귀하도록 움직인다.

[0045] 또한, 래디얼 방향의 자기 베어링(23)은, 로터축(2)의 y방향에 있어서, 한 쌍의 래디얼 전자석(+y 전자석(3yp)과 -y 전자석(3ym))이 대향하여 배치되어 있다. 또, 각각의 래디얼 전자석(+y 전자석(3yp)과 -y 전자석(3ym))의 근방에는, 각각, y방향의 로터축 변위를 검출하는 래디얼 센서(+y센서(4yp)와 -y센서(4ym))가 배치되어 있다. 또한, 도 4는, x축 방향의 전류를 설명하는 도이기 때문에, y방향의 래디얼 전자석(+y 전자석(3yp)과 -y 전자석(3ym)) 및 y방향의 래디얼 센서(+y센서(4yp)와 -y센서(4ym))에 대해서는 신호 계통이 생략되어 있다. 또, 도 4에서는, x축, y축의 각각의 래디얼 센서(4xp, 4xm, 4yp, 4ym)는, 각각의 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym)에 고정되어 있는 것처럼 보이지만, 각각의 래디얼 센서(4xp, 4xm, 4yp, 4ym)와 각각의 래디얼 전자석(3xp, 3xm, 3yp, 3ym)은 부착 높이의 위치가 상이하기 때문에, 실제로는 양자는 고정되어 있지 않다. 또한, 로터축(2)이 이상 변위했을 때는, 그 양단 부근에서 보호용 드라이 베어링(11, 12)으로 지지되도록 구성되어 있다 (도 2 참조).

[0046] 이러한 구성에 의해, 변위 센서인 래디얼 센서(+x 센서(4xp), -x 센서(4xm))가 로터축(2)의 위치를 검출하여 제어 기기(24)로 변위 신호 Sxp, Sxm을 피드백한다. 그러면, 제어 기기(24)는, 미리 기억되어 있는 기준 위치와의 차에 의거하여 신호 처리를 행하고, 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp), -x 전자석(3xm))에 흐르게 하는 전류를 적정하게 결정한다. 그리고, 제어 기기(24) 내의 전류 제어 앰프(도시하지 않음)로부터 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp), -x 전자석(3xm))으로 원하는 전류(Ixp, Ixm)를 공급한다. 이것에 의해, 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp), -x 전자석(3xm))은 원하는 흡인력에 의해 로터축(2)을 기준 위치(래디얼 방향 x축의 중심 위치)로 복귀시키도록 작동한다. 래디얼 방향의 y축에 대해서도 동일한 동작을 행하여, 로터축(2)을 기준 위치(래디얼 방향 y축의 중심 위치)로 복귀시키도록 작동한다.

[0047] 도 5는, 본 발명의 하나의 실시예에 적용되는 자기 베어링의 제어 기기의 제어 계통을 나타내는 블록도이다. 이 도면은, 자기 베어링의 로터축에 있어서의 래디얼 방향의 Xh축으로 개재하는 한 쌍의 전자석(래디얼 전자석)의 전류를 제어하는 제어 기기의 제어 계통에 대해서만 표시하고 있다.

[0048] 먼저, 도 5에 나타내는 자기 베어링의 제어 기기의 구성, 및 각각의 요소의 기능에 대해서 설명한다. 제어 기기(24)는, 래디얼 방향으로 대향하고 있는 한 쌍의 전자석의 전류의 제어를 개별적으로 행하는 전류 제어 앰프(31xp, 31xm)와, 전류 제어 앰프(31xp, 31xm)로부터의 전류 검출치를 각각 제곱화하는 제곱기(32xp, 32xm)와, 각각 제곱화된 전류 검출치를 가산하는 가산기(33)와, 전류 검출치의 제곱·가산치를 평균화하는 로우패스 필터(34)와, 로우패스 필터(34)로부터 출력된 전류 검출치의 제곱·가산치에 보정 계수를 곱하여 보정 계인 지령치의 평균치를 구하는 보정 계수 승산기(35)와, 보정 계수 승산기(35)로부터 출력된 보정 계인 지령치와 기본 계인 설정치를 가산하여 계인 지령치 G를 구하는 가산기(36)와, 로터축의 래디얼 방향의 4축과 스러스트 방향의 1축의 위치 정보를 가지는 힘 지령 중간 신호를 처리하여 출력하는 보상기(37)와, 보상기(37)로부터 출력된 Xh축

의 힘 지령 중간 신호를 게인 지령치 G에 의거하여 증폭 처리하는 게인 앰프(38)와, 게인 앰프(38)로부터 출력된 비선형인 힘-전류 지령 중간 신호의 특성을 선형화하는 힘-전류 리니어 라이저(39)와, 선형화된 전류 지령 중간 신호를 분기하여 일방의 신호를 반전시키는 반전기(40)와, 반전되지 않는 쪽의 전류 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치를 가산하여 전류 지령치를 구하고 전류 제어 앰프(31xp)로 출력하는 가산기(41xp)와, 반전기(40)로 반전된 전류 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치를 가산하여 전류 지령치를 구하고 전류 제어 앰프(31xm)로 출력하는 가산기(41xm)를 구비하여 구성되어 있다.

[0049] 다음에, 도 5에 나타내는 각 요소의 기능에 대해서 상세하게 설명한다. 전류 제어 앰프(31xp)는, 로터축의 래디얼 방향으로 대향하고 있는 일방의 +x 전자석(3xp)(도 4 참조)으로 적정한 전류(여자 전류)를 흐르게 하기 위한 기능을 구비하고 있다. 전류 제어 앰프(31xm)는, 로터축의 래디얼 방향으로 대향하고 있는 타방의 -x 전자석(3xm)(도 4 참조)으로 적정한 전류(여자 전류)를 흐르게 하기 위한 기능을 구비하고 있다.

[0050] 제공기(32xp) 및 제공기(32xm)는, 각각, 전류 제어 앰프(31xp) 및 전류 제어 앰프(31xm)로부터, 자기 베어링의 로터축(도시하지 않음)을 각각 x축의 반대 방향으로 서로 끌어당기는 전자석 페어(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))의 전류 검출치(Ixhp, Ixhm)를 취득하고, 이들 전류 검출치(Ixhp, Ixhm)를 각각 제곱화하는 기능을 구비하고 있다. 가산기(33)는, 제공기(32xp, 32xm)로 각각 제곱화된 전류 검출치를 가산하여 $(Ixhp^2+Ixhm^2)$ 를 구하는 기능을 구비하고 있다. 로우패스 필터(34)는, 노이즈 등을 제거하기 위해, 가산기(33)로부터 출력된 전류의 제곱·가산치 $(Ixhp^2+Ixhm^2)$ 를 평균화하는 기능을 구비하고 있다.

[0051] 보정 계수 승산기(35)는, 가산기(33)로부터 로우패스 필터(34)를 통하여 출력된 전류의 제곱·가산치 $(Ixhp^2+Ixhm^2)$ 에 대해, 로터축의 변위를 보정하기 위한 보정 계수 Kcd를 곱하고, 자기 베어링의 불안정 스프링 상수를 보정하기 위한 보정 게인 지령치 $Kcomp=Kcd(Ixhp^2+Ixhm^2)$ 의 평균치를 계산하는 기능을 구비하고 있다. 가산기(36)는, 보정 계수 승산기(35)로부터 출력된 보정 게인 지령치 Kcomp와 자기 베어링의 배치 자세에 관계없이 미리 설정되어 있는 기본 게인 설정치 Kctrl을 가산하여 게인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 를 구하는 기능을 구비하고 있다.

[0052] 보상기(37)는, 로터축의 래디얼 방향의 4축 P_{xh}, P_{yh}, P_{xb}, P_{yb}와 스러스트 방향의 1축 P_z로부터의 위치 신호를 처리하여, 로터축의 위치 정보를 가지는 힘 지령 중간 신호를 출력하는 기능을 구비하고 있다. 또한, 위치 신호 P_{xh}는, 도 1에 나타내는 5축 제어형 자기 베어링에 있어서의 상부의 X축(Xh축) 방향의 한 쌍의 전자석(3xp, 3xm)의 상대적 위치 어긋남을 검출하는 한 쌍의 래디얼 센서(4xp, 4xm)의 신호이다. 또, 위치 신호 P_{yh}는, 도 1에 나타내는 5축 제어형 자기 베어링에 있어서의 상부의 Y축(Yh축) 방향의 한 쌍의 전자석(3yp, 3ym)의 상대적 위치 어긋남을 검출하는 한 쌍의 래디얼 센서(4yp, 4ym)의 신호이다. 동일하게 하여, 위치 신호 P_{xb}는, 도 1에 나타내는 5축 제어형 자기 베어링에 있어서의 하부의 X축(Xb축) 방향의 한 쌍의 전자석(5xp, 5xm)의 상대적 위치 어긋남을 검출하는 한 쌍의 래디얼 센서(6xp, 6xm)의 신호이며, 위치 신호 P_{yb}는, 하부의 Y축(Yb축) 방향의 한 쌍의 전자석(5yp, 5ym)의 상대적 위치 어긋남을 검출하는 한 쌍의 래디얼 센서(6yp, 6ym)의 신호이다. 또, 위치 신호 P_z는, 상하 페어로 Z축 방향으로 배치되어 있는 액시얼 전자석(7zm, 7zp)의 상대적 위치 어긋남(스러스트 방향의 위치 어긋남)을 검출하는 액시얼 센서(8z)의 신호이다. 이러한 5축 모든 위치 신호의 처리 계통을 표시하면, 신호 처리 계통의 도면이 복잡하게 되므로, 도 5에서는 대표적으로 위치 신호 P_{xh} 만의 신호 처리 계통이 표시되어 있다. 게인 앰프(38)는, 보상기(37)에서 생성되어 출력된 Xh축의 힘 지령 중간 신호를 입력하고, 가산기(36)로부터 출력되어 설정된 게인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 에 의거하여, Xh축의 힘 지령 중간 신호를 증폭 처리하는 기능을 구비하고 있다.

[0053] 힘-전류 리니어 라이저(39)는, 게인 앰프(38)로부터 출력된 비직선성을 가지는 전류 지령 중간 신호(힘-전류 특성의 신호)를, 바이어스 전류 설정치에 의거하여 선형화하는 기능을 구비하고 있다. 또한, 힘-전류 리니어 라이저(39)는, 바이어스 전류 설정치를 검출하여, 한 쌍의 전자석(5xp, 5xm)의 양쪽에 전류가 존재하지 않을 때만 회로의 전환을 행하여 선형화 기능을 유효화하고 있다. 반전기(40)는, 힘-전류 리니어 라이저(39)로부터 출력된 선형의 전류 지령 중간 신호가 분기된 일방의 신호를 반전시키는 기능을 구비하고 있다. 가산기(41xp)는, 반전되지 않는 쪽의 전류 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치 0Ch를 가산하여 전류 지령치 Cxhp를 구하고, 이 전류 지령치 Cxhp를 전류 제어 앰프(31xp)로 출력하는 기능을 구비하고 있다. 가산기(41xm)는, 반전기(40)로 반전된 전류 지령 중간 신호와 바이어스 전류 설정치 0Ch를 가산하여 전류 지령치 Cxhm을 구하고, 이 전류 지령치 Cxhm을 전류 제어 앰프(31xm)로 출력하는 기능을 구비하고 있다.

[0054] 다음에, 도 5에 나타내는 자기 베어링의 제어 기기의 동작에 대해서 도 4를 참조하면서 설명한다. 여기에서는, 로터축의 래디얼 방향의 Xh축에 대향하는 한 쌍의 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm): 도 4 참조)의 바

이어스 전류를 제어하는 경우를 예로 들어 설명한다.

- [0055] 먼저, 로터축을 각각 반대 방향으로 서로 끌어당기는 한 쌍의 전자석 페어(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))의 전류 검출치(Ixhp, Ixhm)를, 각각, 전류 제어 앰프(31xp, 31xm)로부터 취득하고, 제곱기(32xp, 32xm)와 가산기(33)를 이용하여 전류 검출치의 제곱의 합 ($Ixhp^2+Ixhm^2$)을 계산한다. 그리고, 로우패스 필터(34)를 통과시켜 ($Ixhp^2+Ixhm^2$)를 평균화한 후, 보정 계수 연산기(35)로 평균화한 ($Ixhp^2+Ixhm^2$)에 보정 계수 Kcd를 곱하고, 자기 베어링의 불안정성(불안정 스프링 상수)을 보정하는 보정 계인 지령치 $Kcomp=Kcd(Ixhp^2+Ixhm^2)$ 의 평균치를 계산한다. 또한, 제곱기(32xp, 32xm)로 입력하는 것은, 전류 검출치(Ixhp, Ixhm)가 아닌, 바이어스 전류 지령치(Cxhp, Cxhm)여도 된다. 또, 로우패스 필터(34)를 이용하지 않아도 기본적인 동작에는 지장은 없지만, 자기 베어링의 로터축의 회전에 의해 발생하는 노이즈 장애 등을 방지하기 위해 로우패스 필터(34)를 이용하는 것이 바람직하다.
- [0056] 다음에, 가산기(36)가, 보정 계수 연산기(35)로 구한 보정 계인 지령치 Kcomp와, 자기 베어링의 배치 자세에 관계없이 일의적으로 정해지는 기본 계인 Kctrl을 가산하여 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 를 구하고, 이 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 를 계인 앰프(38)에 설정한다.
- [0057] 한편, 보상기(37)는, 래디얼 방향 4축의 Pxp, Pyp, Pxb, Pyb로부터의 로터축의 위치 신호를 각각 처리하여, 4축의 힘 지령 중간 신호를 생성한다. 여기에서는, 보상기(37)가 Xh축의 힘 지령 중간 신호를 생성하는 경우에 대해서 설명한다. 보상기(37)에서 생성된 Xh축의 힘 지령 중간 신호는, 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 의 설정된 계인 앰프(38)에 입력된다. 이것에 의해, 계인 앰프(38)는, 자기 베어링의 배치 자세에 의거하는 기본 계인 Kctrl에 대해 불안정 스프링 상수가 보정된 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 에 의거하여, Xh축의 힘 지령 중간 신호를 증폭 처리하여 출력한다.
- [0058] 다음에, 전자석의 흡인력은 전류의 제곱에 비례하기 때문에 힘-전류 특성은 비직선성을 가지므로, 계인 앰프(38)로부터의 출력 신호(힘 지령 중간 신호)는, 힘-전류 리니어 라이저(39)에 입력되어 바이어스 전류 설정치 0Ch에 의해 선형화된다. 따라서, 힘-전류 리니어 라이저(39)는, 바이어스 전류 설정치 0Ch를 검출하여, 전류가 존재할 때 만 회로의 전환을 행하여 선형화 기능을 유효화하고 있다. 또한, 힘-전류 리니어 라이저(39)는 이용하지 않아도 되지만, 그 경우는 전류 보정의 제어 성능이 열화된다.
- [0059] 다음에, 힘-전류 리니어 라이저(39)의 출력의 힘 지령 중간 신호를 분기하여, 일방의 신호는 그대로의 극성으로 하고, 타방의 신호를 반전기(40)로 반전시킨다. 이것은, 로터축의 래디얼 방향에 있어서의 Xh축의 양측에 대항하여 개재하는 한 쌍의 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))에 대해 반대 극성의 전류를 흐르게 하기 위해서이다.
- [0060] 즉, 힘-전류 리니어 라이저(39)로부터 출력된 분기 신호의 일방의 힘 지령 중간 신호는, 그대로 가산기(41xp)에서 바이어스 전류 설정치 0Ch가 가산되어 전류 지령치 Cxhp로서 생성되고, 분기 신호의 타방의 힘 지령 중간 신호는, 반전기(40)에 의해 반전되고 나서 가산기(41xm)에서 바이어스 전류 설정치 0Ch가 가산되어 전류 지령치 Cxhm로서 생성되게 된다. 바꾸어 말하면, 래디얼 방향에 있어서 반대 방향으로 서로 끌어당기는 전자석 페어(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))의 각각의 전류 지령치(Cxhp, Cxhm)가 생성되고, 이들 전류 지령치(Cxhp, Cxhm)가 각각 전류 제어 앰프(31xp, 31xm)에 입력된다.
- [0061] 이것에 의해, 전류 제어 앰프(31xp)로부터, 자기 베어링의 배치 자세에 의거하는 불안정 스프링 상수가 보정된 전류가, 래디얼 방향에 있어서의 Xh축의 일방에 배치된 래디얼 전자석(+x 전자석(3xp))에 흐르고, 전류 제어 앰프(31xm)로부터, 자기 베어링의 배치 자세에 의거하는 불안정 스프링 상수가 보정된 전류가, 래디얼 방향에 있어서의 Xh축의 타방에 배치된 래디얼 전자석(-x 전자석(3xm))에 흐른다.
- [0062] 즉, 자기 베어링의 로터축이 중력에 대해 수직으로 설치된 경우는 Xh축에는 중력이 걸리지 않기 때문에, 전자석에는 바이어스 전류 설정치 0Ch에 따른 작은 전류 밖에 흐르지 않는다. 그 때문에, 계인 앰프(38)에 설정되는 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 는 작은 값이 되어, 낮은 계인으로 자기 베어링의 전류가 제어된다.
- [0063] 여기서, 로터축의 자세가 수평으로 변경되면, Xh축에는 중력에 대항하여 로터축을 부상시키기 위해 큰 전류가 전자석에 흐른다. 큰 전류가 흐르면, 자기 베어링의 불안정 스프링 상수 Kd가 증대하여, 그대로는 자기 베어링의 강성이 저하되어 버린다. 그래서, 본 발명에 있어서의 실시예의 구성에서는, 계인 앰프(38)에 설정되는 계인 지령치 $G(Kctrl+Kcomp)$ 가 큰 값이 되어, 높은 계인으로 증폭된 전류 지령치에 의해 자기 베어링이 제어되기 때문에, 자기 베어링의 강성이 저하되지 않아, 자기 베어링은 적절한 강성을 확보할 수 있다.
- [0064] 또한, 도 5에 나타내는 제어 기기에 있어서의 전류 보정 기능은, 자기 베어링 장치의 조정 시 등에 있어서, 임

의로 해제시킬 수 있다. 그 경우는, 도 4에서 서술한 바와 같이, 래디얼 센서(+x 센서(4xp), -x 센서(4xm))에 의한 변위 신호 Sxp, Sxm의 피드백 만의 제어 기능이 된다.

[0065] 다음에, 제어 기기에 의한 자기 베어링의 불안정 스프링 상수의 보상 기능에 대해서, 수식을 이용하여 설명한다. 또한, 이하의 수식에 이용하는 각 부호에 대해서는, 각각 다음과 같이 정의한다.

[0066] Fo : 현재의, 대향하는 양측의 전자석이 발생시키고 있는 합계의 흡인력(힘)

[0067] 단위 [N]

[0068] δo : 현재의, 전자석의 에어 갭 단위 [m]

[0069] Ipluso : 현재의, +측 전자석(+x 전자석(3xp))의 전류 단위 [A]

[0070] Iminuso : 현재의, -측 전자석(-x 전자석(3xm))의 전류 단위 [A]

[0071] ΔF : 현재와 일순간 후의 사이에 변화하는 흡인력(힘) 단위 [N]

[0072] Δ δ : 현재와 일순간 후의 사이에 변화하는 에어 갭 단위 [m]

[0073] F : 일순간 후의, 대향하는 양측의 전자석이 발생시키고 있는 합계의 흡인력(힘) 단위 [N]

[0074] A : 힘과 전류의 제곱의 비례 정수(A=F/I²) 단위 [N/A²]

[0075] Gctrl : 자기 베어링의 스프링 상수(보정 없는 제어 회로의 기본값)

[0076] 단위 [N/m]

[0077] Kctrl : 보정 게인 가산용 게인 앰프의 기본 게인 단위 [무차원]

[0078] Krem : 자기 베어링의 스프링 상수 Gctrl로부터 기본 게인 Kctrl을 제외한 나머지의 계수 단위 [N/m] 에 따라서, Gctrl=Kctrl×Krem이 된다.

[0079] 이상과 같이 각 부호를 정의하면, 일순간 후의, 대향하는 양측의 전자석(+x 전자석(3xp)과 -x 전자석(3xm))이 발생하고 있는 합계의 흡인력(힘)은, 다음의 식 (1)로 표시된다.

[0080]
$$F = F_0 + Gctrl \times \Delta\delta - (2A \times Iplus_0^2 / \delta_0 + 2A \times Iminus_0^2 / \delta_0) \times \Delta\delta \quad \dots (1)$$

[0081] 여기서, 보정 파라미터 Kcd와 보정 게인 Kcomp를 도입한다. 또한, Kcd=2A/δo이며, 에어 갭 δo의 변화량은 적기 때문에, 여기에서는, 보정 파라미터 Kcd는 고정 정수로서 취급한다.

[0082] 따라서, 보정 게인 Kcomp는, 다음의 식 (2)로 표시된다.

[0083]
$$Kcomp = Kcd \times (Iplus_0^2 + Iminus_0^2) = (2A \times Iplus_0^2 / \delta_0 + 2A \times Iminus_0^2 / \delta_0) \quad \dots (2)$$

[0084] 여기서, 보정 게인 Kcomp를 회로의 기본 게인 설정치에 가산하면, 일순간 후의, 대향하는 양측의 전자석이 발생시키고 있는 합계의 흡인력 F는, 다음의 식 (3)으로 표시된다.

[0085]
$$F = F_0 + Gctrl \times \Delta\delta - (2A \times Iplus_0^2 / \delta_0 + 2A \times Iminus_0^2 / \delta_0) \times \Delta\delta + Kcomp \times \Delta\delta \quad \dots (3)$$

[0086] 또한, 일순간 후의 전자석의 힘 “F” 를 나타내는 식 (3)에 있어서, 제1항은 현재의 전자석의 힘, 제2항은 자기 베어링이 로터축을 중심으로 되돌리는 스프링의 힘이며, 제3항은 자기 베어링의 불안정 스프링 상수의 힘이며, 제4항은 로터축의 변위를 보정하는 힘이다.

[0087] 상술한 식 (3)은, 식 (4)와 같이 표시된다.

[0088]
$$F = F_0 + Gctrl \times \Delta\delta \quad \dots (4)$$

[0089] 따라서, 상술한 식 (4)로부터 알 수 있는 바와 같이, 보정 게인 지령치를 기본 게인에 가산함으로써, 대향하는 한 쌍의 전자석의 일순간 후에 있어서의 합계 흡인력(F)은, 한 쌍의 전자석의 현재의 합계 흡인력(F0)에 대해, 로터축을 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 스프링력(Gctrl×Δδ) 만이 가해지는 상태가 되어, 자기 베어링의 불안정한 스프링 상수에 의한 흡인력은 없어진다. 즉, 대향하는 한 쌍의 전자석은, 로터축을 자기 베어링의 중심으로 되돌리는 힘 만이 작용하게 된다.

[0090] 또한, 상술한 각 식으로 나타낸 $(I_{\text{pluso}}^2 + I_{\text{minuso}}^2)$ 에는 자기 베어링의 회전 주파수에 기인하는 리플이나 노이즈가 포함되므로, 식 (2)로 나타낸 보정 계인 $K_{\text{comp}} = K_{\text{cd}} \times (I_{\text{pluso}}^2 + I_{\text{minuso}}^2)$ 의 계산은, 이 신호를 약 1Hz 정도의 로우패스 필터를 통과시키고 나서 실행할 필요가 있다.

[0091] 여기서, 특허 청구의 범위에 있어서의 청구항에서 서술하는 각 수단과 도 5에 나타내는 각 요소의 대응 관계에 대해서 설명한다. 전류 취득 수단은, 2개의 제공기(32xp, 32xm), 및 가산기(33)에 대응한다. 보정 계수 연산 수단은 보정 계수 연산기(35)에 대응한다. 제1 가산 수단은 가산기(36)에 대응한다. 전류 제어 수단은, 게인 앰프(38), 반전기(40), 가산기(41xp, 41xm), 및 전류 제어 앰프(31xp, 31xm)에 대응한다. 제2 가산 수단은 가산기(33)에 대응한다. 선형 수단은 힘-전류 리니어 라이저(39)에 대응한다. 또한, 본 제어 기능(24)는, 연산 증폭기 등을 이용한 전자 부품(디스크리트)으로 실현되어도 되고, 마이크로 컴퓨터나 DSP(Digital Signal Processor) 등을 이용하여 소프트웨어로 실현되어도 된다.

[0092] 이상, 본 발명의 구체적인 실시예를 설명했지만, 본 발명은 이 실시예에 한정되는 것은 아니고, 본 발명의 정신을 일탈하지 않는 한 다양한 개변을 할 수 있으며, 그리고, 본 발명이 그 개변된 것에 이르는 것은 당연하다.

[0093] <산업 상의 이용 가능성>

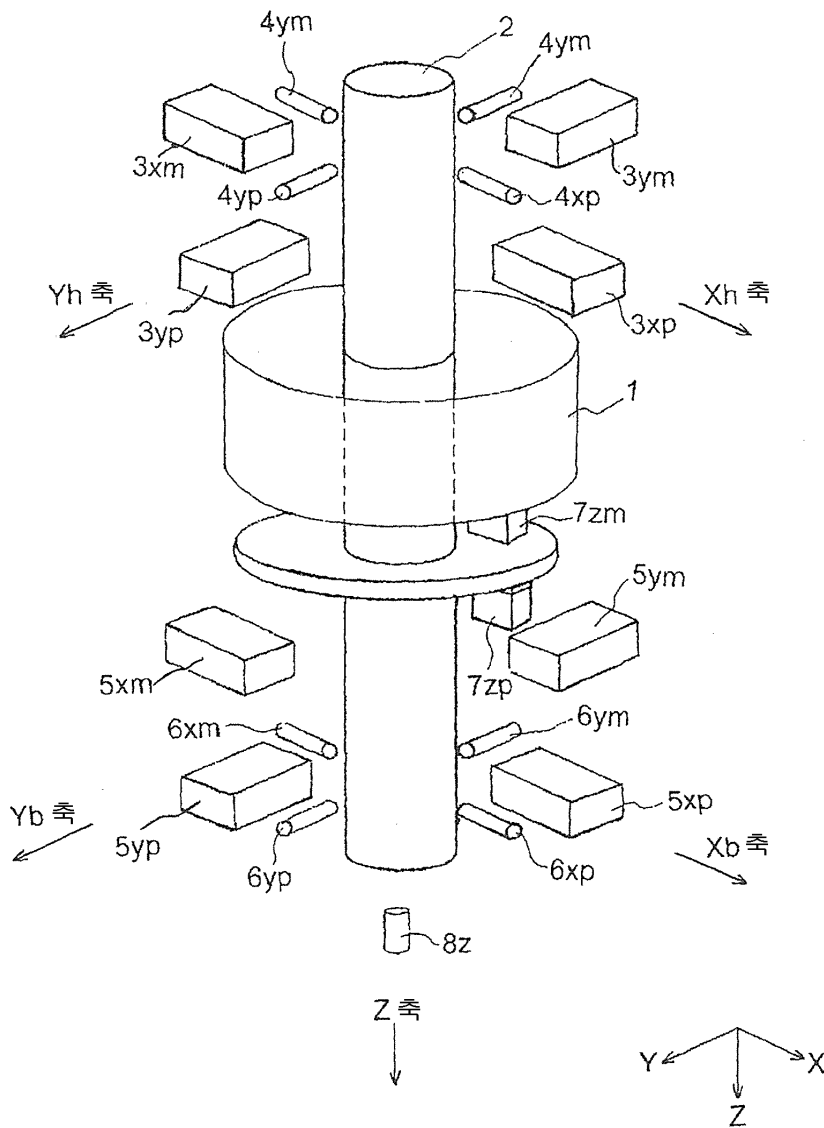
[0094] 본 발명의 자기 베어링 장치는, 비접촉 지지, 무윤활, 또한 저진동이며 초고속 회전이 가능하므로, 진공 펌프에 한정되지 않고, 원심 압축기, 터빈 발전기, 터보 팽창기, 연삭 스핀들, 혈류 펌프, 반도체 제조 장치, 계측·분석 기기 등에도 유효하게 이용할 수 있다.

부호의 설명

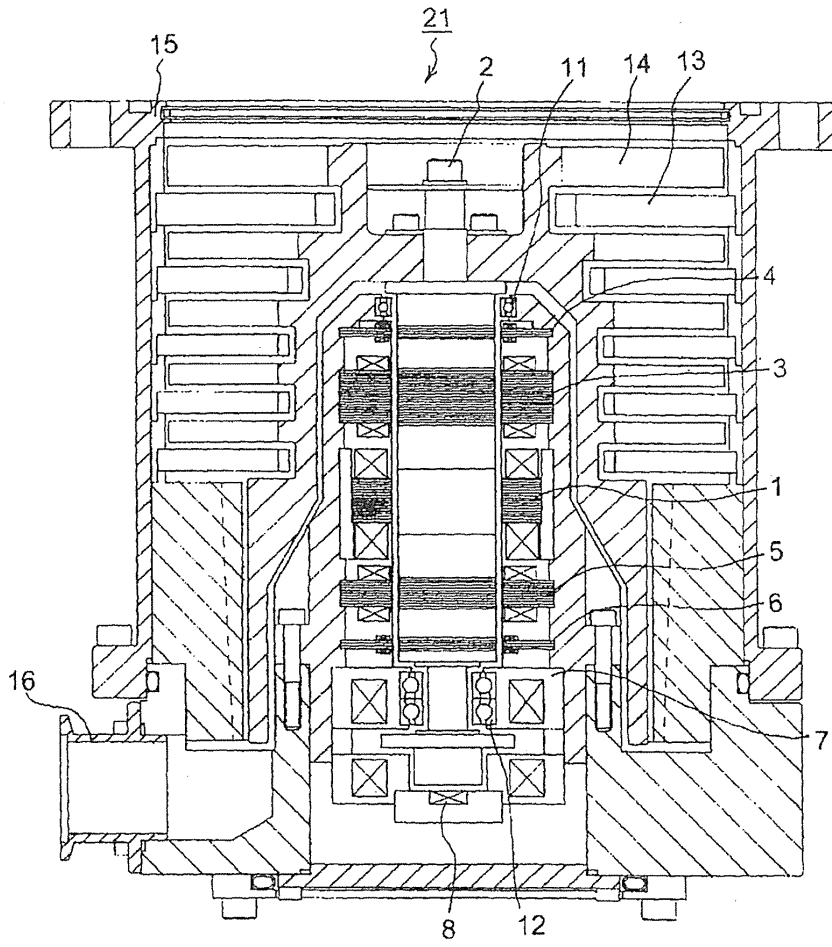
- [0095] 1: DC 모터 2: 로터축
- 3, 3xp, 3xm, 3yp, 3ym, 5, 5xp, 5xm, 5yp, 5ym: 래디얼 전자석
- 4, 4xp, 4xm, 4yp, 4ym, 6, 6xp, 6xm, 6yp, 6ym: 래디얼 센서
- 7, 7zp, 7zm: 액시얼 전자석 8, 8z: 액시얼 센서
- 11, 12: 보호용 드라이 베어링 13: 스테이터 날개
- 14: 로터 날개 15: 흡기구 플랜지
- 16: 배기구 플랜지 20: 자기 베어링 장치
- 21, 21a, 21b, 21c, 21d: 진공 펌프 22: 반도체 제조 장치
- 23: 자기 베어링 24: 제어 기기
- 31xp, 31xm: 전류 제어 앰프(전류 제어 수단)
- 32xp, 32zm: 제공기(전류 취득 수단, 제2 가산 수단)
- 33: 가산기(전류 취득 수단, 제2 가산 수단) 34: 로우패스 필터
- 35: 보정 계수 연산기(보정 계수 연산 수단) 36: 가산기(제1 가산 수단)
- 37: 보상기 38: 게인 앰프(전류 제어 수단)
- 39: 힘-전류 리니어 라이저(선형화 수단) 40: 반전기
- 41xp, 41xm: 가산기(전류 제어 수단)

도면

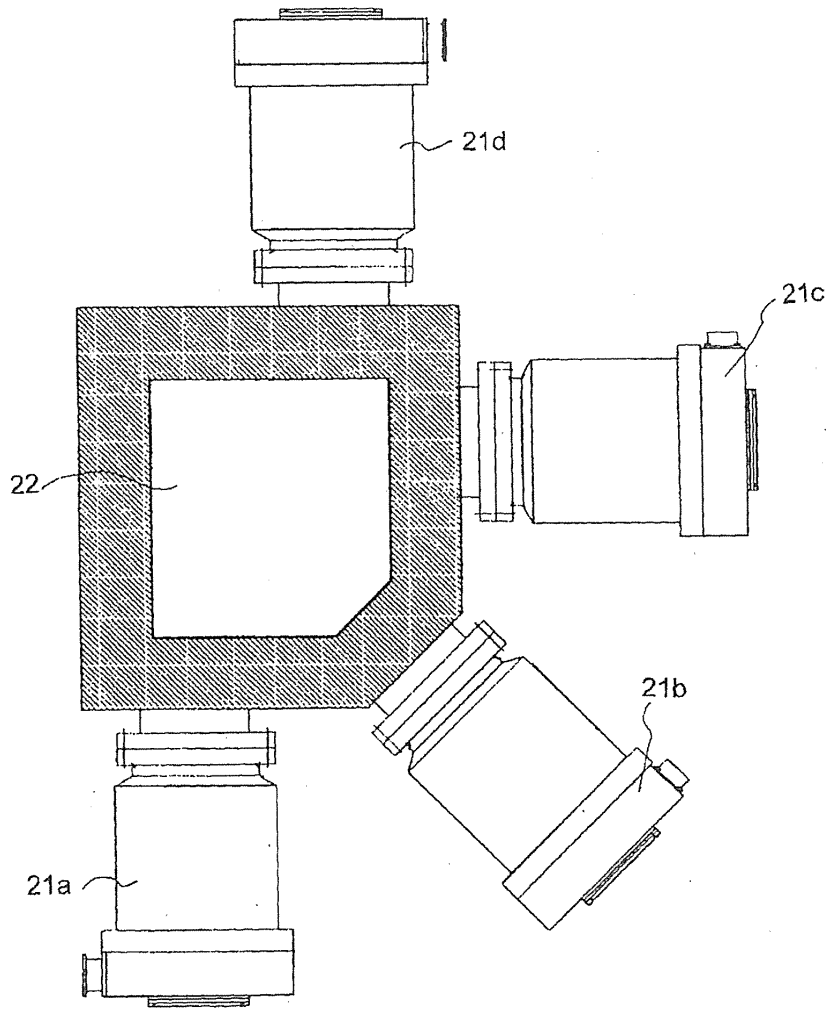
도면1



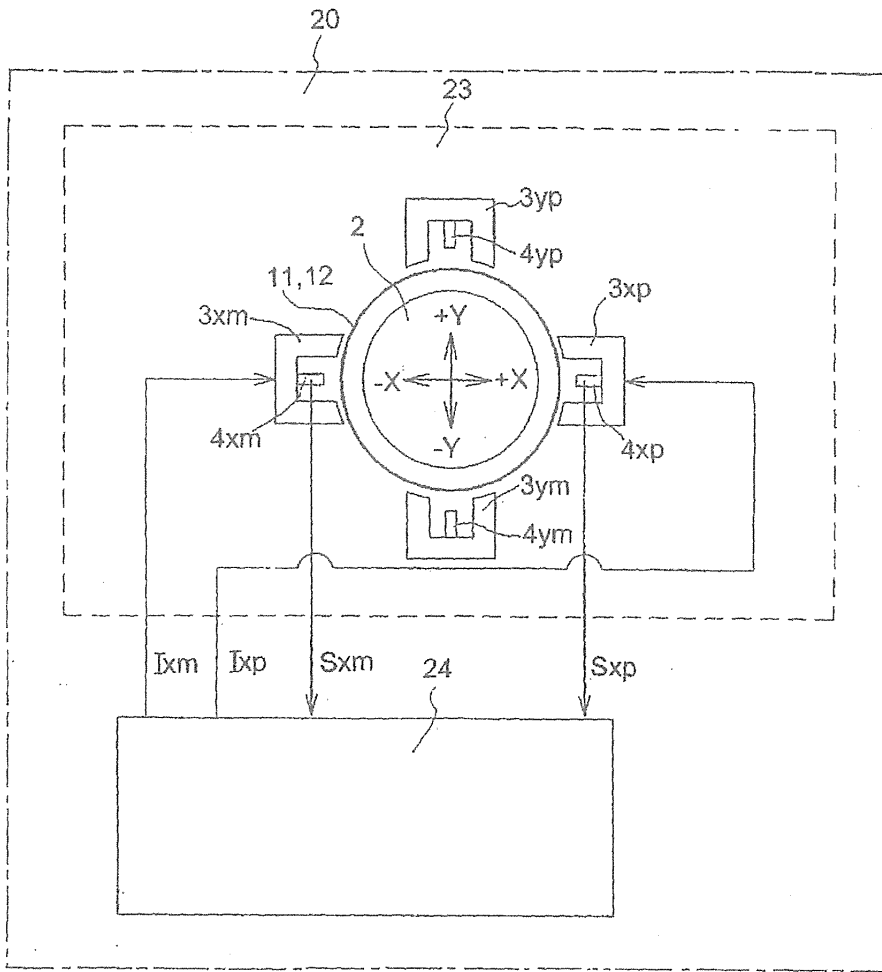
도면2



도면3



도면4



도면5

