



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0095400
(43) 공개일자 2025년06월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

F16C 32/04 (2006.01)

(52) CPC특허분류

F16C 32/0444 (2013.01)

F16C 32/0474 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2023-0186418

(22) 출원일자 2023년12월19일

심사청구일자 2023년12월19일

(71) 출원인

충남대학교산학협력단

대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)

(72) 발명자

노명규

대전광역시 유성구 상대복용로29번길 51, 209동
1103호(상대동, 대전아이파크시티 2단지)

정원진

경기도 평택시 진위면 남부대로 552, 806호(LG전
자 남자기숙사)

(74) 대리인

이재명

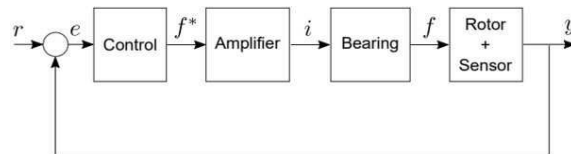
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법

(57) 요약

9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법이 제공된다. 본 발명의 실시예에 따른 비대칭 베어링 제어 시스템은 힘-전류 관계를 획득하여 기 설정된 힘 명령 정보를 생성하고, 상기 힘 명령 정보와 대응하는 전류 명령을 도출하는 전류 명령 도출부; 및 상기 힘-전류 관계로부터 전류 명령 정보를 생성하고, 상기 전류 명령 정보를 통해 보상 이득 값을 획득하는 변위 보상부;를 포함한다.

대표도 - 도10



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415188017
과제번호	00236480
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가관리원
연구사업명	에너지수요관리핵심기술개발(에텍)
연구과제명	대용량 대온도차 히트펌프 운영기술 및 현장 실증
기 여 율	1/1
과제수행기관명	아진피앤피(충남대학교)
연구기간	2023.04.01 ~ 2023.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

기 설정된 제1 외부 직경 및 기 설정된 제1 내부 직경을 포함하도록 형성되며, 9개의 방사형 극이 내부에 형성되는 외부 베어링부; 및

상기 외부 베어링부 내부에 형성되며, 상기 외부 베어링부와 동일한 중심점을 가지도록 형성되며, 기 설정된 제2 외부 직경 및 기 설정된 제2 내부 직경을 포함하도록 형성되며, 상기 제2 외부 직경이 상기 제1 내부 직경보다 작게 형성되는 내부 베어링부;를 포함하도록 형성되고,

상기 외부 베어링부는,

상기 9개의 방사형 극 사이가 기 설정된 각도로 형성되며,

상기 외부 베어링부와 일 측이 연결되는 방사형 극 축; 및

상기 방사형 극 축에 기 설정된 횡수만큼 감기도록 형성되는 코일 권선;을 포함하는 9극 비대칭 베어링.

청구항 2

비대칭 베어링을 제어하기 위해 형성되는 비대칭 베어링 제어 시스템에 있어서,

상기 비대칭 베어링 제어 시스템은,

힘-전류 관계를 획득하여 기 설정된 힘 명령 정보를 생성하고, 상기 힘 명령 정보와 대응하는 전류 명령을 도출하는 전류 명령 도출부; 및

상기 힘-전류 관계로부터 전류 명령 정보를 생성하고, 상기 전류 명령 정보를 통해 보상 이득 값을 획득하는 변위 보상부;를 포함하는, 비대칭 베어링 제어 시스템.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 전류 명령 도출부는,

하기 수식 1을 이용하여 상기 힘 명령 정보를 생성하는 비대칭 베어링 제어 시스템.

수식 1

$$i_r^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} + f_x},$$

$$i_i^* = \frac{\text{sgn}(f_y)}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} - f_x},$$

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 전류 명령 도출부는,

상기 수식 1의 결과에서 상기 전류 명령의 연속성을 보장하기 위해 힘 명령이 2사분면에서 3사분면으로 이동하는 경우, 상기 전류의 위상각에 를 보상하여 하기 수식 2로 표현되는 상기 전류 명령을 도출하는, 비대칭 베어링 제어 시스템.

수식 2

$$\Delta I = |I_2 - I_1| = 2I_0 \sin \frac{\delta}{2}$$

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 변위 보상부는,

상기 전류 명령 정보를 하기 수식 3과 같이 획득하고, 상기 전류 명령 정보에 대하여 선형화 가정을 반영한 후, PID 컨트롤러, 노치 필터 및 로우 패스 필터를 적용하여 상기 보상 이득 값을 획득하는 비대칭 베어링 제어 시스템.

수식 3

$$i_r = i_r^* - (x/g_0)i_r^* - (y/g_0)i_i^* ,$$

$$i_i = i_i^* - (y/g_0)i_r^* + (x/g_0)i_i^* ,$$

(여기서, i^*_r 및 i^*_i 는 힘 반전을 통해 획득한 현재 명령)

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 변위 보상부는,

상기 보상 이득값을 하기 수식 4를 이용하여 획득하는, 비대칭 베어링 제어 시스템.

수식 4

$$C_{PID} = K_P \frac{\tau_z^2 s^2 + 2\zeta_z \tau_z s + 1}{\tau_p^2 s^2 + 2\zeta_p \tau_p s + 1} + \frac{K_I}{s} .$$

$$C_{NF} = \prod_{k=1}^{N_f} \frac{s^2 + 2\zeta_{nz,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2}{s^2 + 2\zeta_{np,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2} .$$

$$C(s) = C_{PID} C_{NF} C_{LPF} .$$

$$\left. \frac{f}{e} \right|_{s=0, \text{biased}} = K_{P, \text{biased}} K_{amp} K_i .$$

$$K_i = \frac{\mu_0 N^2 A_p I_b \cos \theta_p}{g_0^2}$$

$$K_{P,unbiased} = K_{P,baised} I_b \cos \theta_p$$

청구항 7

비대칭 베어링을 제어하기 위해 형성되는 비대칭 베어링 제어 방법에 있어서,

상기 비대칭 베어링 제어 방법은,

전류 명령 도출부를 통해 힘-전류 관계를 획득하여 기 설정된 힘 명령 정보를 생성하고, 상기 힘 명령 정보와 대응하는 전류 명령을 도출하는 전류 명령 도출 단계; 및

변위 보상부를 이용하여 상기 힘-전류 관계로부터 전류 명령 정보를 생성하고, 상기 전류 명령 정보를 통해 보상 이득 값을 획득하는 변위 보상 단계;를 포함하는, 비대칭 베어링 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법에 관한 것으로, 특히, 9극 비대칭 베어링과, 이에 변위 보정을 수행하여 안정된 제어를 수행할 수 있는 제어 시스템 및 방법인 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 능동 자기 베어링(AMB)은 자기력을 사용하여 기계적 접촉 없이 회전자를 공중에 띄우므로 시스템 효율성이 향상되고 작동 속도가 향상되며 기계의 신뢰성이 향상된다는 장점이 존재한다. 하지만 이 경우 개방 루프가 불안정하며 부상을 유지하기 위해 로터의 위치를 이용한 피드백 제어가 요구된다.

[0004] AMB의 코일 전류에서 발생하는 자기력은 코일 전류에 2차, 고정자와 타겟 사이의 간격의 제곱에 반비례한다. 대칭 방사형 베어링을 사용하는 경우 일반적으로 바이어스 선형화를 사용하여 힘-전류 관계를 선형화하여 선형 제어 알고리즘을 사용할 수 있다. 일 예로, 8극 베어링은 두 개의 반대 쌍을 사용하여 쌍을 직렬로 감아 하나의 축을 제어하도록 형성된다. 반대 쌍에 대한 코일 전류는 일정한 바이어스 전류와 제어 전류의 합 또는 차일 수 있다. 여기서, 바이어스 전류는 저항 손실을 증가시키고 코일 전류를 공급하기 위해 필요한 전력 증폭기 용량보다 더 큰 용량을 필요로 한다.

[0005] 종래 기술을 참고하면 이러한 바이어스 전류를 제거하거나 감소시키려는 많은 시도를 확인할 수 있다. 바이어스 전류를 제거하기 위해 개발되었던 종래의 전력 최소화 제어 알고리즘은 일종의 스위칭을 포함하며 제로 바이어스 상태에서 힘 슬루율의 특이성에 영향을 받을 수 있다는 문제점이 존재한다. 또한, 낮은 바이어스 알고리즘은 적응형 또는 미리 결정된 규칙에 따라 바이어스 전류를 조정하지만 높은 힘 슬루율에서는 전압 포화가 발생할 수 있다는 문제점이 존재한다.

[0006] 따라서, 다른 바이어스 전류를 제거하는 방식으로 구조적으로 비대칭 베어링을 사용하는 여러 가지 종래 기술이 공개되고 있다. 일 예로, 3개의 극이 존재하는 베어링은 힘이 상호 작용하더라도 두 개의 직교 방향으로 힘을 생성할 수 있다. 이러한 힘 상호 작용으로 인해 반전이 어려워지더라도 두 직교 축의 두 힘 명령이 동시에 0인 극단적인 경우를 제외하고는 유한 힘 슬루율이 유지될 수 있다는 장점을 가진다.

[0007] 하지만, 3극 베어링은 베어링 크기가 커짐에 따라 로터 적층을 운반하는 샤프트가 점점 작아지기 때문에 베어링이 매우 작은 로터에만 적합하다는 문제점이 존재한다.

[0008] 또, 6극 베어링이나 9극 베어링과 같은 대형 베어링의 경우 다른 비대칭 구성이 존재한다. 그러나 이러한 대형 베어링의 경우에도 바이어스 전류 없는 제어를 구현하거나 산업 규모의 테스트 장비에서 제어 알고리즘을 검증하기 어려운 문제점이 존재한다.

[0010] 한국등록특허 제10-1413790호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 상기와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명의 일 실시예는 9극 비대칭 베어링의 부상 제어를 구현할 수 있는 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법을 제공하고자 한다.

[0013] 또, 상기와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명의 일 실시예는 센서 노이즈로 인한 힘 명령의 급격한 변화를 피할 수 있는 위상 선택 알고리즘을 제공하는 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법을 제공하고자 한다.

[0015] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 기술적 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0017] 위와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 측면에 따르면, 9극 비대칭 베어링이 제공된다. 상기 9극 비대칭 베어링은 기 설정된 제1 외부 직경 및 기 설정된 제1 내부 직경을 포함하도록 형성되며, 9개의 방사형 극이 내부에 형성되는 외부 베어링부; 및 상기 외부 베어링부 내부에 형성되며, 상기 외부 베어링부와 동일한 중심점을 가지도록 형성되며, 기 설정된 제2 외부 직경 및 기 설정된 제2 내부 직경을 포함하도록 형성되며, 상기 제2 외부 직경이 상기 제1 내부 직경보다 작게 형성되는 내부 베어링부;를 포함하도록 형성되고, 상기 외부 베어링부는, 상기 9개의 방사형 극 사이가 기 설정된 각도로 형성되며, 상기 외부 베어링부와 일 측이 연결되는 방사형 극 축; 및 상기 방사형 극 축에 기 설정된 횡수만큼 감기도록 형성되는 코일 권선;을 포함한다.

[0018] 본 발명의 일 측면에 따르면, 비대칭 베어링 제어 시스템이 제공된다. 일례로 상기 9극 비대칭 베어링을 제어하기 위해 상기 비대칭 베어링 제어 시스템은, 힘-전류 관계를 획득하여 기 설정된 힘 명령 정보를 생성하고, 상기 힘 명령 정보와 대응하는 전류 명령을 도출하는 전류 명령 도출부; 및 상기 힘-전류 관계로부터 전류 명령 정보를 생성하고, 상기 전류 명령 정보를 통해 보상 이득 값을 획득하는 변위 보상부;를 포함한다.

[0019] 상기 전류 명령 도출부는, 하기 식 1을 이용하여 상기 힘 명령 정보를 생성할 수 있다.

[0020] 식 1

$$i_r^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} + f_x},$$

[0021]

$$i_i^* = \frac{\text{sgn}(f_y)}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} - f_x},$$

[0022]

[0023] 상기 전류 명령 도출부는, 상기 전류 명령의 연속성을 보장하기 위해 힘 명령이 2사분면에서 3사분면으로 이동하는 경우, 상기 전류의 위상각에 π 를 보상하여 하기 식 2로 표현되는 상기 전류 명령을 도출할 수 있다.

[0024] 식 2

$$\Delta I = |I_2 - I_1| = 2I_0 \sin \frac{\delta}{2}$$

[0025]

[0026] 상기 변위 보상부는, 상기 전류 명령 정보를 하기 식 3과 같이 획득하고, 상기 전류 명령 정보에 대하여 선형화 가정을 반영한 후, PID 컨트롤러, 노치 필터 및 로우 패스 필터를 적용하여 상기 보상 이득 값을 획득할 수 있다

다.

식 3

$$i_r = i_r^* - (x/g_0)i_r^* - (y/g_0)i_i^* ,$$

$$i_i = i_i^* - (y/g_0)i_r^* + (x/g_0)i_i^* ,$$

(여기서, i_r^* 및 i_i^* 는 힘 반전을 통해 획득한 현재 명령)

상기 변위 보상부는, 상기 보상 이득값을 하기 식 4를 이용하여 획득할 수 있다.

식 4

$$C_{PID} = K_P \frac{\tau_z^2 s^2 + 2\zeta_z \tau_z s + 1}{\tau_p^2 s^2 + 2\zeta_p \tau_p s + 1} + \frac{K_I}{s} .$$

$$C_{NF} = \prod_{k=1}^{N_f} \frac{s^2 + 2\zeta_{nz,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2}{s^2 + 2\zeta_{np,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2} .$$

$$C(s) = C_{PID} C_{NF} C_{LPF} .$$

$$\left. \frac{f}{e} \right|_{s=0, \text{biased}} = K_{P, \text{biased}} K_{amp} K_i .$$

$$K_i = \frac{\mu_0 N^2 A_p I_b \cos \theta_p}{g_0^2}$$

$$K_{P, \text{unbiased}} = K_{P, \text{biased}} I_b \cos \theta_p$$

본 발명의 일 측면에 따르면, 비대칭 베어링 제어 방법이 제공된다. 일례로 상기 9극 비대칭 베어링을 제어하기 위해 상기 비대칭 베어링 제어 방법은, 전류 명령 도출부를 통해 힘-전류 관계를 획득하여 기 설정된 힘 명령 정보를 생성하고, 상기 힘 명령 정보와 대응하는 전류 명령을 도출하는 전류 명령 도출 단계; 및 변위 보상부를 이용하여 상기 힘-전류 관계로부터 전류 명령 정보를 생성하고, 상기 전류 명령 정보를 통해 보상 이득 값을 획득하는 변위 보상 단계;를 포함한다.

발명의 효과

본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법은 9극 비대칭 베어링의 편향부상 제어를 구현할 수 있는 효과가 있다.

또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링, 제어 시스템 및 방법은 센서 노이즈로 인한 힘 명령의 점프를 피할 수 있는 위상 선택 알고리즘을 제공할 수 있는 효과가 있다.

본 발명의 효과는 상기한 효과로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 상세한 설명 또는 특허청구범위에 기재된 발명의 구성으로부터 추론 가능한 모든 효과를 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

도면의 간단한 설명

도 1은 8극 방사형 자기 베어링의 예시도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기저항 행렬 및 코일 회전 행렬의 예시이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 베어링의 권선 패턴의 예시도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예와의 참조를 위해 사용되는 8극 대칭 베어링의 설계 매개변수를 나타낸 도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예를 도출하기 위한 설계 사례의 예시도이다.

도 6은 본 발명의 전류 명령의 예시도이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링의 제어 시스템의 블록도이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링의 제어 방법의 순서도이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부에서 제어를 수행하는 블록 다이어그램의 예시도이다.

도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부에서 바이어스 선형화 된 동작을 수행하는 블록 다이어그램의 예시도이다.

도 11은 본 발명의 모의 실험을 위해 제작된 9극 방사형 베어링의 예시도이다.

도 12는 본 발명의 모의실험 결과의 그래프이다.

도 13은 모의실험 결과 중 10Hz에서의 이득을 정리한 도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0047] 이하, 본 개시의 일부 실시예들을 예시적인 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 각 도면의 구성 요소들에 참조 부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 대해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호를 가질 수 있다. 또한, 본 실시예들을 설명함에 있어, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 기술 사상의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 수 있다. 본 명세서 상에서 언급된 "포함한다", "갖는다", "이루어진다" 등이 사용되는 경우 "~만"이 사용되지 않는 이상 다른 부분이 추가될 수 있다. 구성 요소를 단수로 표현한 경우에 특별한 명시적인 기재 사항이 없는 한 복수를 포함하는 경우를 포함할 수 있다.

[0048] 또한, 본 개시의 구성 요소를 설명하는 데 있어서, 제1, 제2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성 요소의 본질, 차례, 순서 또는 개수 등이 한정되지 않는다.

[0049] 구성 요소들의 위치 관계에 대한 설명에 있어서, 둘 이상의 구성 요소가 "연결", "결합" 또는 "접속" 등이 된다고 기재된 경우, 둘 이상의 구성 요소가 직접적으로 "연결", "결합" 또는 "접속" 될 수 있지만, 둘 이상의 구성 요소와 다른 구성 요소가 더 "개재"되어 "연결", "결합" 또는 "접속"될 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 여기서, 다른 구성 요소는 서로 "연결", "결합" 또는 "접속" 되는 둘 이상의 구성 요소 중 하나 이상에 포함될 수도 있다.

[0050] 구성 요소들이나, 동작 방법이나 제작 방법 등과 관련한 시간적 흐름 관계에 대한 설명에 있어서, 예를 들어, "~후에", "~에 이어서", "~다음에", "~전에" 등으로 시간적 선후 관계 또는 흐름적 선후 관계가 설명되는 경우, "바로" 또는 "직접"이 사용되지 않는 이상 연속적이지 않은 경우도 포함할 수 있다.

[0051] 한편, 구성 요소에 대한 수치 또는 그 대응 정보(예: 레벨 등)가 언급된 경우, 별도의 명시적 기재가 없더라도, 수치 또는 그 대응 정보는 각종 요인(예: 공정상의 요인, 내부 또는 외부 충격, 노이즈 등)에 의해 발생할 수 있는 오차 범위를 포함하는 것으로 해석될 수 있다.

[0053] 본 발명에서는 비대칭 베어링을 제안하고 있으며, 특히 본 발명의 일 실시예에서는 9극 비대칭 베어링을 제안하고 있다. 이하에서는 비대칭 베어링의 힘-전류 관계에 대해 설명하고, 이를 근거로 하는 9극 비대칭 베어링에 대하여 설명하도록 한다.

[0055] 1. 비대칭 베어링의 힘-전류 관계

- [0056] 방사형 자기 베어링은 전자기력을 이용하여 방사형 방향으로 로터를 지지하도록 형성된다. 도 1은, 이러한 방사형 자기 베어링 중 8극 방사형 자기 베어링의 예시가 나타나고 있다. 도 1을 참고하면, 방사형 자기 베어링은 총 8개의 극이 존재하며, 각 극에는 코일 권선이 존재하도록 형성된다.
- [0057] 인접한 두 극은 직렬로 연결되며, 전류가 주입될 때 극의 자기 극성이 교대로 나타나도록 형성된다. 이러한 유형의 베어링은 일반적으로 헤테로폴라 말굽 구성으로 정의된다. 반대쪽 쌍 편자는 1 자유도로 양방향 힘을 생성하도록 형성된다. 따라서, 회전자를 공중에 띄우기 위해서는 총 4개의 전류가 요구된다.
- [0058] 방사형 베어링의 형상은 여러 변수에 의해 정의될 수 있다. 외부에 형성되는 베어링 형상인 외부 베어링은 제1 외경 및 제1 내경을 가지도록 형성되며, 제1 외경은 외부 베어링의 중심에서 외각면까지의 거리를 의미하고, 제1 내경은 외부 베어링의 중심에서 내각면까지의 거리를 의미한다. 제1 두께는 외부 베어링의 두께로 제1 외경과 제1 내경의 차이로 형성될 수 있다. 도 1을 참고하면 제1 외경은 r_s , 제1 내경은 r_c 로 표현될 수 있다.
- [0059] 방사형 베어링의 내부에는 내부 베어링이 형성될 수 있다. 내부 베어링과 외부 베어링은 동일한 중심축을 가지도록 형성될 수 있다. 내부 베어링은 제2 외경 및 제2 내경을 가지도록 형성되며, 제2 외경은 내부 베어링의 중심에서 내부 베어링의 외각 면까지의 거리를 의미하고, 제2 내경은 내부 베어링의 중심에서 내부 베어링의 내각 면까지의 거리를 의미할 수 있다. 제2 두께는 내부 베어링의 두께로 제2 외경과 제2 내경의 차이로 형성될 수 있다. 도 1을 참고하면, 제2 외경은 r_j , 제2 내경은 r_r 로 표현될 수 있다.
- [0060] 내부 베어링의 제2 외경은 저널 반경으로 정의 될 수도 있다. 저널 반경은 베어링 위치의 로터 크기를 결정하도록 형성된다. 대부분의 경우, 자속 경로는 규소철과 같은 전기강판을 적층한 시트로 사용될 수 있다. 고정자는 전체가 라미네이션으로 만들어지는 반면, 로터는 구조적 강성과 조립에 필요한 샤프트에 라미네이션 링을 포함하도록 형성될 수 있다.
- [0061] 또, 외부 베어링에 구비되는 방사형 극은 방사형 베어링의 구조에 따라 그 개수가 결정될 수 있으며, 도 1은 상술한 바와 같이 8극 방사형 베어링이므로 총 8개의 극이 존재한다. 방사형 베어링의 방사형 극은 바람직하게는 외부 베어링에서 중심점을 향해 형성될 수 있으며, 그 길이는 기 설정된 길이로 설정될 수 있다. 여기서, 기 설정된 길이는 필요한 코일 권선에 따라 결정될 수 있다. 도 1을 참고하면, 방사형 베어링에서 방사형 극은 외부 베어링과 내부 베어링 사이의 공간에 외부 베어링으로부터 연장되어 형성될 수 있으며, 그 길이는 바람직하게는 제1 내경과 제2 외경의 길이 차이 미만으로 형성될 수 있다.
- [0062] 균일한 자기 경로 크기를 유지하기 위해 일반적으로 베어링 설계와 공칭 공극은 하기 수학식 1과 같이 가정된다.
- [0063] [수학식 1]
- [0064]
$$w = r_j - r_r .$$
- [0065]
$$g_0 = r_p - r_j .$$
- [0066] 한편, 코일 전류는 베어링에 자기장을 생성하여 회전자에 인력을 제공하도록 형성된다. 코일 전류와 힘 사이의 최종 관계는 자기 회로 이론을 사용하여 획득될 수 있다. 고정자와 회전자의 적층이 고투과성 재료를 통해 형성된다고 가정하는 경우, 고정자와 회전자의 저항은 무시될 수 있다.
- [0067] 에어갭의 자기장 밀도는 하기 수학식 2와 같이 표현될 수 있다.
- [0068] [수학식 2]
- [0069]
$$\mathcal{R}b = Ni ,$$
- [0070] 여기서, R 및 N은 각각 자기저항 행렬 및 코일 회전 행렬을 의미하고, i는 코일 전류 벡터를 의미한다.
- [0071] 도 1을 참고하면, 이러한 행렬은 도 2와 같이 나타날 수 있다. 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기저항 행렬 및 코일 회전 행렬의 예시이고, 코일 전류 벡터는 하기 수학식 3으로 표현된다.
- [0072] [수학식 3]
- [0073]
$$\mathbf{i} = [i_{xp} \ i_{yp} \ i_{xn} \ i_{yn}]^T .$$

[0074] 이를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에서 인력은 하기 수학식 4와 같이 표현될 수 있으며, 극 면적 행렬은 하기 수학식 5로 표현될 수 있다.

[0075] [수학식 4]

$$f_x = \mathbf{b}^T \mathbf{A}_x \mathbf{b} ,$$

$$f_y = \mathbf{b}^T \mathbf{A}_y \mathbf{b}$$

[0078] [수학식 5]

$$\mathbf{A}_x = \frac{A_p}{2\mu_0} \text{diag}(\cos \theta_i) ,$$

$$\mathbf{A}_y = \frac{A_p}{2\mu_0} \text{diag}(\sin \theta_i) .$$

[0081] 여기서, A_p 는 극의 단면적을 의미하고, θ_i 는 i 번째 극의 각도를 의미한다.

[0082] 상기 수학식 3과 수학식 5를 이용하면, 하기 수학식 6과 같은 결과를 획득할 수 있다.

[0083] [수학식 6]

$$f_m = \mathbf{i}^T \mathbf{M}_m \mathbf{i}, \quad m = x, y ,$$

[0085] 여기서 $\mathbf{M}_m = \mathbf{R} - T \mathbf{A}_m \mathbf{R}$ 로 표현될 수 있다. 상기 수학식 6은, 벡터 형식의 방정식이지만 이를 스칼라 방정식으로 변환할 수 있으며, 일 예로 수평 방향의 힘은 하기 수학식 7과 같이 표현될 수 있다.

[0086] [수학식 7]

$$f_x = \frac{\mu_0 A_p N^2 \cos \theta_p}{4} \left[\frac{i_{xp}^2}{(g_0 - x \cos \theta_p)^2} - \frac{i_{xn}^2}{(g_0 + x \cos \theta_p)^2} \right]$$

[0089] 상술한 수학식 6에서 표현하고 있는 힘-전류 관계는 2차식이며 일대일의 관계가 아니다. 이를 유일한 관계로 만들기 위해서 바이어스 전류가 도입되며, 바이어스 전류 I_b 는 하기 수학식 8로 표현될 수 있다.

[0090] [수학식 8]

$$\begin{bmatrix} i_{xp} \\ i_{yp} \\ i_{xn} \\ i_{yn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ I_b \end{bmatrix} = \mathbf{W} \mathbf{i}_c ,$$

[0093] 위에서 설명한대로 바이어스 전류는 대칭형 8극 베어링의 힘-전류 관계를 선형화하기 위해 사용된다. 하지만, 이러한 바이어스 전류로 인해, 고정자 코일의 저항 손실과 증폭기 용량이 증가한다는 문제점이 존재한다. 따라서, 이러한 바이어스 전류를 줄이거나 제거하려는 많은 시도가 제로 바이어스에서 힘 슬루율의 특이성 또는 낮은 바이어스에서의 과도한 전압 요구 사항으로 인해 큰 성공을 거두지 못하였다.

[0094] 이러한 바이어스 전류를 제거하는 다른 접근 방식은 비대칭 베어링을 사용하는 방법이다. 이러한 일반적인 비대칭 베어링의 일 예시는 3극 베어링일 수 있다. 구조 자체는 매우 간단하지만 3극 베어링은 베어링의 특성상 매우 작은 로터에만 적용 가능하며, 이는 로터 크기가 커지면 로터 적층을 유지하는 샤프트가 비례적으로 감소하기 때문이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 3극 베어링의 필요한 부하 용량을 수용하기 위해 극 폭이 증가하

게 되면, 로터 반격 rr이 감소할 수 있다. 작은 샤프트는 굽힘 모드 주파수 및 분리 마진을 감소시키는 결과를 초래할 수 있다.

[0095] 3극 베어링의 구조 변형을 통해 대형 베어링을 도출하는 경우 그 예시가 6극 베어링 또는 9극 베어링일 수 있다. 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 베어링의 권선 패턴의 예시도이다. 도 3의 예시로 제공되는 9극 베어링의 힘-전류 관계는 자기저항 행렬 및 코일회전 행렬이 정의되는 경우 상기 수학식 6으로 표현될 수 있다.

[0096] 상기 수학식 6을 통해 도출되는 베어링 힘은 하기 수학식 9와 같이 변형되어 표현될 수 있다.

[0097] [수학식 9]

$$f_m = [i_A \quad i_B \quad i_C] \mathbf{M}_m \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad m = x, y.$$

[0098]

[0099] 상술한 수학식 9에서 힘-전류 관계는 일대일 대응이 아니기 때문에 역전이 불가능하다. 이에 따라, 제어 전류에 해당하는 제어 명령을 도입하여 수학식 9를 하기 수학식 10으로 표현할 수 있다.

[0100] [수학식 10]

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} i_r \\ i_i \end{bmatrix}$$

[0101]

[0102] 여기서, 매핑 행렬이 만족하는 경우는 수학식 11을 만족하는 경우로 정의할 수 있으며, 이 경우 힘-전류 관계는 수학식 12로 변환될 수 있다.

[0103] [수학식 11]

$$\mathbf{W}^T \mathbf{M}_x \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

[0104]

$$\mathbf{W}^T \mathbf{M}_y \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

[0105]

[0106] [수학식 12]

$$f_x + j f_y = c (i_r + j i_i)^2,$$

[0107]

$$c = \frac{\mu_0 N^2 A_p}{g_0}.$$

[0108]

[0109] 한편, 수학식 11의 매핑 행렬에서 고정자의 평균 자속 수준과 코일 전류가 모두 최소화되는 최적화 프로세스를 적용하고, 그 결과 나타나는 매핑 행렬은 하기 수학식 13을 통해 제안될 수 있다.

[0110] [수학식 13]

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1.026 & 0 \\ -0.5131 & -0.8887 \\ -0.5131 & 0.8887 \end{bmatrix}$$

[0111]

[0112] 상기 수학식 13은, x축이 A상 코일과 정렬된 경우이며, 매핑 매트릭스인 수학식 13의 열 합은 0이고, 이는 위상 전류가 균형을 이루는 것을 의미한다.

- [0114] 2. 9극 비대칭 베어링
- [0115] 상술한 매핑 행렬을 이용하여 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)에 대하여 설명하도록 한다.
- [0116] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)과의 객관적인 비교를 수행하기 위해서 8극 대칭 베어링의 참조 설계를 이용하였다. 이러한 8극 대칭 베어링은 터보 냉각기 압축기에 사용되며, 하중 용량은 1120N이고, 도 4에 이러한 베어링의 설계 매개변수가 도시되고 있다.
- [0118] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)을 도출하기 위해서는 서로 다른 여러가지 비대칭 설계 대안이 고려될 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서 베어링의 축방향 길이, 공극 및 저널 직경은 고정될 수 있다. 베어링의 크기는 필요한 부하 용량을 생성하는 동안 베어링의 모든 부품이 포화 상태에 도달하지 않도록 결정되며, 베어링의 극면적 A_p 는 하중 용량과 연관되며, 하기 수학적 식 14와 같이 표현될 수 있다.
- [0119] [수학적 식 14]
- $$F_{load} = f_{load} \frac{B_{sat}^2 A_p}{\mu_0}$$
- [0120]
- [0121] 여기서, 하중계수 f_{load} 는 비대칭 베어링에 대한 매핑 행렬을 획득할 때 결정되는 계수이며, 이는 최적화가 지속 밀도 수준을 고려하기 때문이다. 베어링의 축 방향 길이가 고정되어 있는 경우, 극 폭은 단순히 극면적을 축 방향 길이로 나눈 값일 수 있다. 고정자 백철 크기 역시, 최적화 과정을 통해 결정될 수 있다. 최소 고정자 경로 두께는 고정자에서 포화가 발생하는 크기이며, 상술한 바와 같이 본 발명의 일 실시예에서는 고정자 경로 두께는 최소 고정자 경로 두께 이상으로 형성되어야 포화 상태에 도달하지 않을 수 있다. 이러한 고정자 경로 두께와 극 폭 비율은 하기 수학적 식 15와 같이 정의 될 수 있다.
- [0122] [수학적 식 15]
- $$\alpha = \frac{r_s - r_c}{w}$$
- [0123]
- [0124] 또한, 본 발명의 일 실시예를 도출하기 위한 설계 사례가 도 5에 도시되고 있다. 도 5에는, 비대칭 베어링을 설계하기 위한 3, 5, 6 및 9극 베어링의 다양한 설계 요인이 개시되고 있다. 도 5에 개시되는 고정자 크기, 고정자 질량 및 회전자 크기는 모두 도 4의 설계에 대한 비율을 의미한다.
- [0125] 5극 베어링을 설계하는 경우, 고정자가 감소하는 이점이 존재하지만, 샤프트의 크기가 참조 설계의 72%에 불과하여 너무 작다는 문제점이 존재한다. 또한, 5상 구동이 필요한 구조이지만, 이러한 5상 구동은 일반적인 구동이 아니기 때문에 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 사용되기 어렵다는 문제점을 가진다.
- [0126] 6극 베어링을 설계하는 경우는 말굽형 3극 베어링을 변형한 것으로, 로터 샤프트는 여전히 작게 형성되지만, 고정자 크기가 기대 설계와 거의 동일한 크기를 가진다.
- [0127] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)은 도 3에 도시된 바와 같은 권선 구성을 가지도록 형성된다. 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)을 설계한 결과를 비교하면, 고정자가 기대 설계값보다 작은 반면, 회전자 크기가 기대 설계 값과 동일하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 본 발명의 9극 비대칭 베어링(2)은 3개의 인접한 극이 직렬로 연결되어 단일 3상 드라이브를 베어링용 전력 증폭기로 사용할 수 있는 장점을 가진다. 이는, 8극 대칭 베어링에 비해 중요한 이점이다.
- [0128] 8극 대칭 베어링에서는 바이어스 제어를 사용하는 경우 하프 브리지를 채택하더라도 방사형 베어링을 구동하기 위해서는 최소 8개의 전원 스위치가 요구된다. 많은 상용 전력 모듈이 3상 6스위치 패키지로 제공된다. 따라서, 상술한 바이어스 된 8극 베어링을 구동하는 경우, 일부 스위치가 활용되지 않는 경우가 존재할 수 있다. 전원 스위치를 감소시키는 경우 비용이 절감될 뿐 아니라 전력 증폭기의 신뢰성이 향상되는 장점이 존재한다.
- [0129] 즉, 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)은 다른 베어링과 달리 기대 설계와 유사한 크기로 형성되어 높은 신뢰성을 가지도록 형성될 수 있다.
- [0130] 이를 위해 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)은 외부 베어링 부(21) 및 내부 베어링 부(23)를

포함하도록 형성된다. 내부 베어링 부(23)는 베어링의 구조를 설명하는 과정에서 그 구조를 설명하였기 때문에 생략하도록 한다.

[0131] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)의 외부 베어링 부(21)는, 외부 베어링(211)과 방사형 극(213)을 포함하도록 형성된다. 방사형 극(213)은 본 발명에서 정의 한 바와 같이 9개의 극으로 형성된다. 이때, 각 방사형 극(213) 사이의 각도는 360/9로 이루어질 수 있다.

[0132] 방사형 극(213)은 방사형 극 축(2131)과 방사형 극 축(2131)에 형성되는 코일 권선(2133)을 포함하도록 형성될 수 있다.

[0133] 본 발명의 도면에 부호로 지정되지는 않았지만, 본 발명에는 3개의 상이 형성되며, 이 상은 각각 A, B 및 C로 표현되고 있다. 도 3을 참고하면, 1A+, 2A- 및 3A+ 3개의 극이 A 상을 형성하고 있으며, 4B+, 5B- 및 6B+ 3개의 극이 B 상을 형성하고 있고, 7C+, 8C- 및 9C+ 3개의 극이 C상을 형성하도록 형성된다. 즉 본 발명의 일 실시예에 따른 3상 구조는 각각 2개의 양극과 두 양극 사이에 형성되는 1개의 음극을 가지도록 형성될 수 있다.

[0134] 이를 통해 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링(2)은 3상 전원에 사용될 수 있는 효과를 가진다.

[0136] 3. 9극 비대칭 베어링 제어 시스템

[0137] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링 제어 시스템(1)은, 전류 명령 도출부(11) 및 변위 보상부(13)를 포함하도록 형성된다.

[0138] 본 발명의 일 실시예에 따른 전류 명령 도출부(11)에서 9극 비대칭 베어링을 제어하기 위해서는 먼저 힘-전류 관계의 반전이 요구된다. 이는, 상술한 수학식 12를 변환시켜 획득되는 하기 수학식 16으로 표현될 수 있다.

[0139] [수학식 16]

$$i_r^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} + f_x},$$

[0140]

$$i_i^* = \frac{\text{sgn}(f_y)}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} - f_x},$$

[0141]

[0142] 여기서, $\text{sgn}(\cdot)$ 함수는, 인수의 부호에 따라 양 또는 음의 부호를 취하도록 형성된다. 상기 수학식 16을 반전시킬 때 중요한 점은 전류 명령의 큰 변화를 방지할 수 있도록 위상을 유지하는 것이다. 본 발명의 일 실시예에 따른 전류 명령 도출부(11)은, 이를 위해 힘 명령이 복소 평면의 음의 실수 축에 가깝다고 가정하면, 힘 방정식은 하기 수학식 17로 표현될 수 있다.

[0143] [수학식 17]

$$F_1 = F_0 e^{j(\pi-\delta)},$$

[0144]

$$F_2 = F_0 e^{j(-\pi+\delta)}$$

[0145]

[0146] F1은 제2사분면에서의 힘 명령이며, F1는 제3사분면에서의 힘 명령을 의미한다. 여기서, 각도 δ 는 양수이고 0에 가깝게 형성된다. 또, 위상각은 $-\pi$ 내지 π 사이에 존재하며, 이를 전류 명령으로 변경하면 하기 수학식 18과 같이 표현될 수 있다.

[0147] [수학식 18]

$$I_1 = I_0 e^{j(\pi-\delta)/2} \approx jI_0,$$

[0148]

$$I_2 = I_0 e^{j(-\pi+\delta)/2} \approx -jI_0.$$

[0149]

[0150] 상기 수학식 17 및 18의 예시도가 도 6에 도시되고 있다. 도 6을 참고하면, 강제 명령이 음의 실수 축을 교차하는 경우, 전류 명령에서 큰 간격이 발생할 수 있다. 따라서, 이를 방지하기 위해 위상각에 상수를 추가할 수 있

으며, 그 결과가 도 6b에 도시되고 있다. 본 발명에서 추가된 위상각 상수는 π 일 수 있으며, 하기 수학적 식 19로 전류 명령을 도출할 수 있다.

[수학적 식 19]

$$\Delta I = |I_2 - I_1| = 2I_0 \sin \frac{\delta}{2}$$

자기력은, 코일 전류에 따라 달라질 뿐만 아니라 폴 팁과 베어링 저널 사이의 공극에 의해서도 영향을 받는다. 일반적인 방사형 베어링의 경우 에어 갭의 제곱에 반비례하지만, 로터의 변위가 에어 갭에 비해 작은 경우 힘 방정식은 변위에 대해 선형화가 가능하다. 본 발명의 비대칭 베어링의 경우에는 이러한 선형화는 변위 보상부 (13)에서 이루어질 수 있으며, 상기 수학적 식 10을 하기 수학적 식 20으로 표현할 수 있다.

[수학적 식 20]

$$i_r = i_r^* - (x/g_0)i_r^* - (y/g_0)i_i^* ,$$

$$i_i = i_i^* - (y/g_0)i_r^* + (x/g_0)i_i^* ,$$

여기서, i_r^* 및 i_i^* 는 힘 반전을 통해 획득한 현재 명령이며, 상기 수학적 식 16일 수 있다. 도 9은 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부(13)에서 제어를 수행하는 블록 다이어그램의 예시도이다.

도 9을 참고하면, 점선 부분에 포함되는 블록에는 제어의 비선형성이 포함되기 때문에 베어링에 의 생성된 힘 f_x 및 f_y 가 제어 명령 f_x^* 및 f_y^* 에 대해 선형으로 형성된다. 이는 상술한 바와 같이 본 발명의 일 실시예에 로터의 변위가 에어 갭에 비해 작은 경우가 적용되기 때문이다. 따라서, 본 발명의 변위 보상부(13)는 리드-지연 보상기(lead-lag compensator)와 같은 선형 제어 알고리즘을 사용할 수 있다.

능동 자기 베어링의 경우, 개방 루프가 불안정하다. 이러한 베어링을 안정화하기 위해 사용되는 가장 일반적인 제어 알고리즘은 비례 미분(PD) 방식일 수 있다. 이러한 비례 미분 방식은 미분 동작이 양의 위상을 제공하기 때문에 리드 필터라고도 일컬어진다.

본 발명의 일 실시예의 변위 보상부(13)는 하기 수학적 식 21과 같은 PID 유형 컨트롤러를 사용하도록 형성될 수 있다.

[수학적 식 21]

$$C_{PID} = K_P \frac{\tau_z^2 s^2 + 2\zeta_z \tau_z s + 1}{\tau_p^2 s^2 + 2\zeta_p \tau_p s + 1} + \frac{K_I}{s} .$$

변위 보상부(13)에는 로터의 유연한 모드의 여기를 억제하기 위한 노치 필터가 추가되며, 이러한 노치 필터는 제어 대역폭에 따라 하기 수학적 식 23으로 표현될 수 있다.

[수학적 식 23]

$$C_{NF} = \prod_{k=1}^{N_f} \frac{s^2 + 2\zeta_{nz,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2}{s^2 + 2\zeta_{np,k} \omega_{nf,k} s + \omega_{nf,k}^2} .$$

여기서, N_f 는 제어 대역폭을 의미한다.

또, 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부(13)는 고주파수에서 센서 잡음의 영향을 줄이기 위해 로우 패스 필터가 적용될 수 있으며, 변위 보상부(13)에서 베어링을 컨트롤하기 위한 동작 정보는 하기 수학적 식 24를 통해 획득될 수 있다.

[수학적 식 24]

$$C(s) = C_{PID} C_{NF} C_{LPF} .$$

본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부(13)는 적분기를 고려하지 않는 경우에는 도 9이 아닌 도 10의 바이어

스 선형화 된 동작을 수행하는 변위 보상부의 예시를 사용할 수 있다. 이러한 구조를 적용한 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상부(13)는 바이어스 선형화 된 베어링 컨트롤을 수행하여야 하며, 따라서 이에 대한 정적 이득은 하기 수학식 25로 표현되는 값으로 획득될 수 있다.

[0171] [수학식 25]

$$\left. \frac{f}{e} \right|_{s=0, \text{biased}} = K_{P, \text{biased}} K_{amp} K_i .$$

$$K_i = \frac{\mu_0 N^2 A_p I_b \cos \theta_p}{g_0^2}$$

편향되지 않은 제어의 비례 이득은 편향 선형화 된 제어의 이득 부분과 일치하여야 하기 때문에 본 발명의 변위 보상부(13)는 하기 수학식 26의 이득을 이용할 수 있다.

[0175] [수학식 26]

$$K_{P, \text{unbiased}} = K_{P, \text{biased}} I_b \cos \theta_p$$

[0178] 4. 9극 비대칭 베어링 제어 방법

[0179] 본 발명의 일 실시예에 따른 9극 비대칭 베어링 제어 방법(10)은, 전류 명령 도출 단계(S11) 및 변위 보상 단계(S13)를 포함하도록 형성된다.

[0180] 본 발명의 일 실시예에 따른 전류 명령 도출 단계(S11)에서 9극 비대칭 베어링을 제어하기 위해서는 먼저 힘-전류 관계의 반전이 요구된다. 이는, 상술한 수학식 12를 변환시켜 획득되는 상기 수학식 16으로 표현될 수 있다.

[0181] 여기서, $\text{sgn}(\cdot)$ 함수는, 인수의 부호에 따라 양 또는 음의 부호를 취하도록 형성된다. 상기 수학식 16을 반전시킬 때 중요한 점은 전류 명령의 큰 변화를 방지할 수 있도록 위상을 유지하는 것이다. 본 발명의 일 실시예에 따른 전류 명령 도출 단계(S11)은, 이를 위해 힘 명령이 복소 평면의 음의 실수 축에 가깝다고 가정하며, 힘 방정식은 상기 수학식 17로 표현될 수 있다.

[0182] F1은 제2사분면에서의 힘 명령이며, F1는 제3사분면에서의 힘 명령을 의미한다. 여기서, 각도 δ 는 양수이고 0에 가깝게 형성된다. 또, 위상각은 $-\pi$ 내지 π 사이에 존재하며, 이를 전류 명령으로 변경하면 상기 수학식 18과 같이 표현될 수 있다.

[0183] 상기 수학식 17 및 18의 예시도가 도 6에 도시되고 있다. 도 6을 참고하면, 강제 명령이 음의 실수 축을 교차하는 경우, 전류 명령에서 큰 간격이 발생할 수 있다. 따라서, 이를 방지하기 위해 위상각에 상수를 추가할 수 있으며, 그 결과가 도 6b에 도시되고 있다. 본 발명에서 추가된 위상각 상수는 π 일 수 있으며, 상기 수학식 19로 전류 명령을 도출할 수 있다.

[0184] 자기력은, 코일 전류에 따라 달라질 뿐만 아니라 폴 팁과 베어링 저널 사이의 공극에 의해서도 영향을 받는다. 일반적인 방사형 베어링의 경우 에어 갭의 제공에 반비례하지만, 로터의 변위가 에어 갭에 비해 작은 경우 힘 방정식은 변위에 대해 선형화가 가능하다. 본 발명의 비대칭 베어링의 경우에는 이러한 선형화는 변위 보상 단계(S13)에서 이루어질 수 있으며, 상기 수학식 10을 상기 수학식 20으로 표현할 수 있다.

[0185] 여기서, i^*r 및 i^*i 는 힘 반전을 통해 획득한 현재 명령이며, 상기 수학식 16일 수 있다. 도 9은 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상 단계(S13)에서 제어를 수행하는 블록 다이어그램의 예시도이다.

[0186] 도 9을 참고하면, 점선 부분에 포함되는 블록에는 제어의 비선형성이 포함되기 때문에 베어링에 의 생성된 힘 f_x 및 f_y 가 제어 명령 f^*x 및 f^*y 에 대해 선형으로 형성된다. 이는 상술한 바와 같이 본 발명의 일 실시예에 로터의 변위가 에어 갭에 비해 작은 경우가 적용되기 때문이다. 따라서, 본 발명의 변위 보상 단계(S13)는 리드-지연 보상기(lead-lag compensator)와 같은 선형 제어 알고리즘을 사용할 수 있다.

[0187] 능동 자기 베어링의 경우, 개방 루프가 불안정하다. 이러한 베어링을 안정화하기 위해 사용되는 가장 일반적인 제어 알고리즘은 비례 미분(PD) 방식일 수 있다. 이러한 비례 미분 방식은 미분 동작이 양의 위상을 제공하기

때문에 리드 필터라고도 일컬어진다.

- [0188] 본 발명의 일 실시예의 변위 보상 단계(S13)는 상기 수학식 21과 같은 PID 유형 컨트롤러를 사용하도록 형성될 수 있다.
- [0189] 변위 보상 단계(S13)에는 로터의 유연한 모드의 여기를 억제하기 위한 노치 필터가 추가되며, 이러한 노치 필터는 제어 대역폭에 따라 상기 수학식 23으로 표현될 수 있다.
- [0190] 여기서, N_f 는 제어 대역폭을 의미한다.
- [0191] 또, 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상 단계(S13)는 고주파수에서 센서 잡음의 영향을 줄이기 위해 로우 패스 필터가 적용될 수 있으며, 변위 보상 단계(S13)에서 베어링을 컨트롤하기 위한 동작 정보는 상기 수학식 24를 통해 획득될 수 있다.
- [0192] 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상 단계(S13)는 적분기를 고려하지 않는 경우에는 도 9이 아닌 도 10의 바이어스 선형화 된 동작을 수행하는 변위 보상부의 예시를 사용할 수 있다. 이러한 구조를 적용한 본 발명의 일 실시예에 따른 변위 보상 단계(S13)는 바이어스 선형화 된 베어링 컨트롤을 수행하여야 하며, 따라서 이에 대한 정적 이득은 상기 수학식 25로 표현되는 값으로 획득될 수 있다.
- [0193] 편향되지 않은 제어의 비례 이득은 편향 선형화 된 제어의 이득 부분과 일치하여야 하기 때문에 본 발명의 변위 보상 단계(S13)는 상기 수학식 26의 이득을 이용할 수 있다.
- [0195] 5. 모의실험
- [0196] 상술한 9극 방사형 베어링, 제어 시스템 및 방법에 대한 모의실험 결과에 대하여 설명하도록 한다. 본 발명의 모의실험에서는 상술한 구조, 제어 시스템 및 방법을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 본 발명의 모의 실험에 사용된 9극 방사형 베어링은 하중 용량이 1120N이고 도 4의 기준 베어링과 동일한 크기를 갖도록 형성되며, 도 9a와 같이 설계 및 제작되었다. 또 도 9b에 표시된 프로토타입 압축기에는 도 6a의 베어링이 2개가 구비되며 1개의 스러스트 베어링이 구비되도록 제작되었다.
- [0197] 컨트롤러는 0.1ms의 샘플링 시간에 MATLAB Simulink-RT를 사용하여 구현되었으며, 3개의 서보 증폭기(AMC)가 각 방사형 베어링에 대한 코일 전류를 생성하도록 사용되었다. 또, 프로토타입 압축기에서는 FCB를 이용하여 자체 개발한 위치 센서를 이용하였다.
- [0198] 모의실험을 통한 결과를 비교하기 위해 8극 대칭 베어링을 갖춘 또다른 프로토타입 압축기를 준비하였으며, 압축기의 용량은 상술한 9극 압축기와 동일하도록 형성되며, 가장 큰 차이점은 8극 베어링을 갖춘 압축기는 상용 위치 센서를 사용한 것이다.
- [0199] 본 모의실험에서 센서의 변화로 인해 언바이어스 압축기의 로터는 센서 위치 및 센서 대상 크기 측면에서 바이어스 압축기의 로터와 차이를 보이게 되고, 이러한 차이로 인해 주파수 변화를 가능하게 하였다.
- [0200] 이러한 모의 실험 결과가 도 12에 도시되고 있다. 도 12는 본 발명의 모의실험 결과의 그래프이다. 도 12a 및 도 12b를 참고하면, 두 압축기의 플랜트 전달 기능은 매우 유사한 것으로 확인되며, 도 12c 및 도 12d를 참고하면, 굽힘 주파수에서 두 압축기의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또, 도 12e를 참고하면, 본 발명의 모의실험 결과 특징이 나타나는 부분은 저주파에서의 이득이다. 도 12e에서 편향 압축기의 경우 플랜트 이득이 유사하게 나타나지만, 비편향 압축기의 플랜트 이득은 편향 압축기에 비해 매우 크게 나타나는 것으로 확인된다. 이러한 이득 중 10Hz에서의 모의실험 결과가 도 13에 나타나고 있다. 또, 도 12f 및 도 12g를 참고하면, 본 발명의 변위 보정부 또는 변위 보정 단계를 적용하면 공중 부양 제어를 수행하는 과정에서 충분한 안정성을 얻을 수 있다는 점을 확인할 수 있다.
- [0202] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

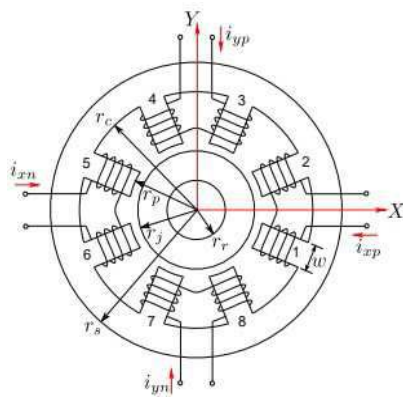
[0203] 본 발명의 범위는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

부호의 설명

[0205] 1: 9극 비대칭 베어링 제어 시스템
2: 9극 비대칭 베어링
11: 전류 명령 도출부
13: 변위 보상부
21: 외부 베어링 부
23: 내부 베어링 부
211: 외부 베어링
213: 방사형 극
2131: 방사형 극 축
2133: 코일 권선

도면

도면1

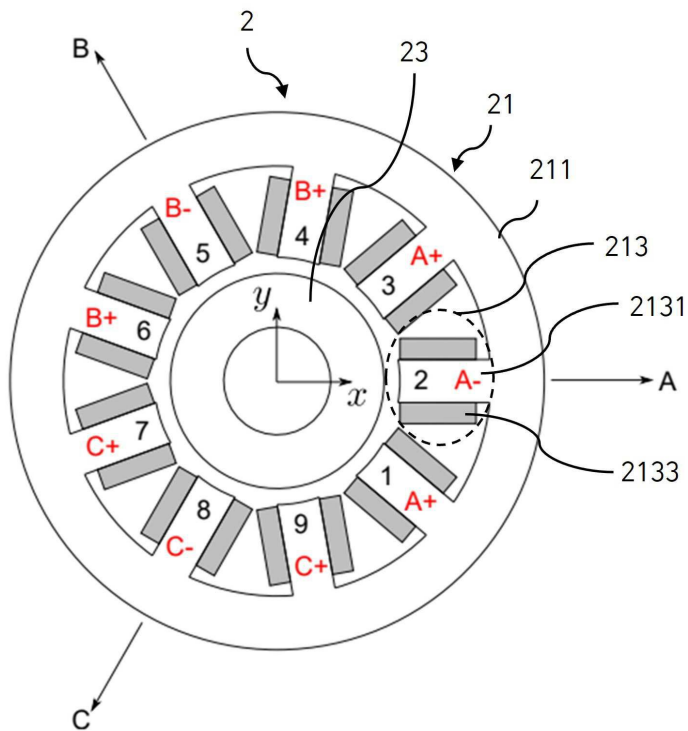


도면2

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & -g_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & -g_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_4 & -g_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_5 & -g_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_6 & -g_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_7 & -g_8 \\ g_0 & g_0 & g_0 & g_0 & g_0 & g_0 & g_0 & g_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = N \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

도면3



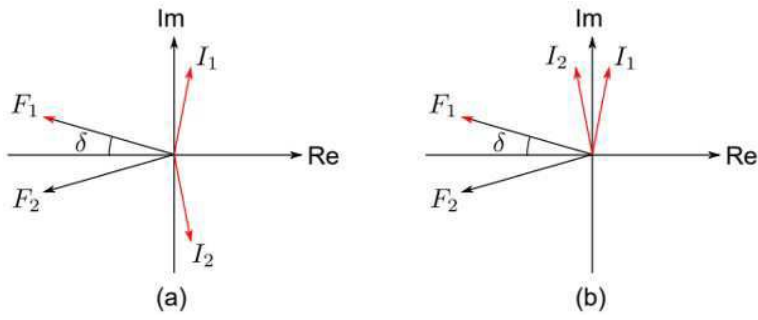
도면4

Parameter	Symbol	Value	Unit
Nominal gap	g_0	0.5	mm
Number of coil turns	N	32	
Journal radius	r_j	46.6	mm
Pole width	w	16.6	mm
Rotor shaft radius	r_r	30	mm
Stator outer radius	r_s	77	mm
Stator mass	m_{stator}	4.5	kg
Actuator gain	K_i	141	N/A
Open-loop stiffness	K_s	-1826	N/mm

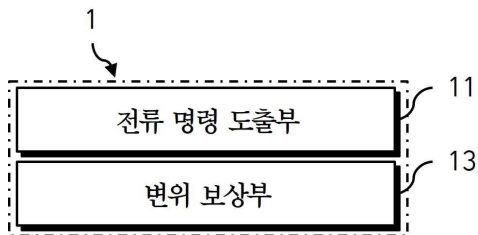
도면5

Pole count	f_{load}	α	Stator size	Stator mass	Rotor size
3	0.375	0.578	1.38	2.96	0.19
5	0.625	0.526	0.90	0.78	0.72
6	0.650	1.000	1.03	1.26	0.75
9	0.950	0.670	0.94	0.74	1.01

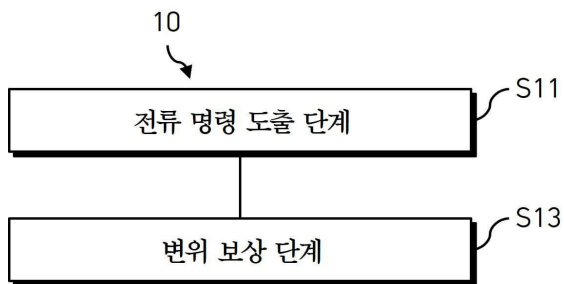
도면6



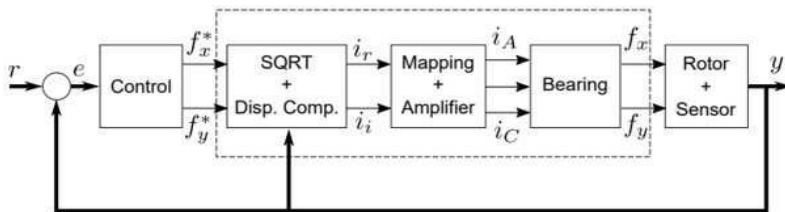
도면7



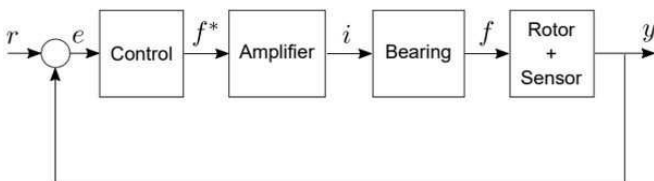
도면8



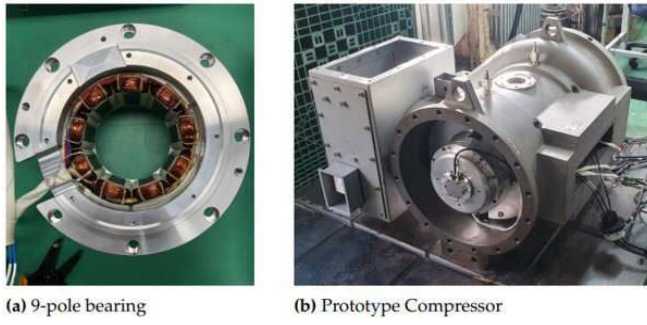
도면9



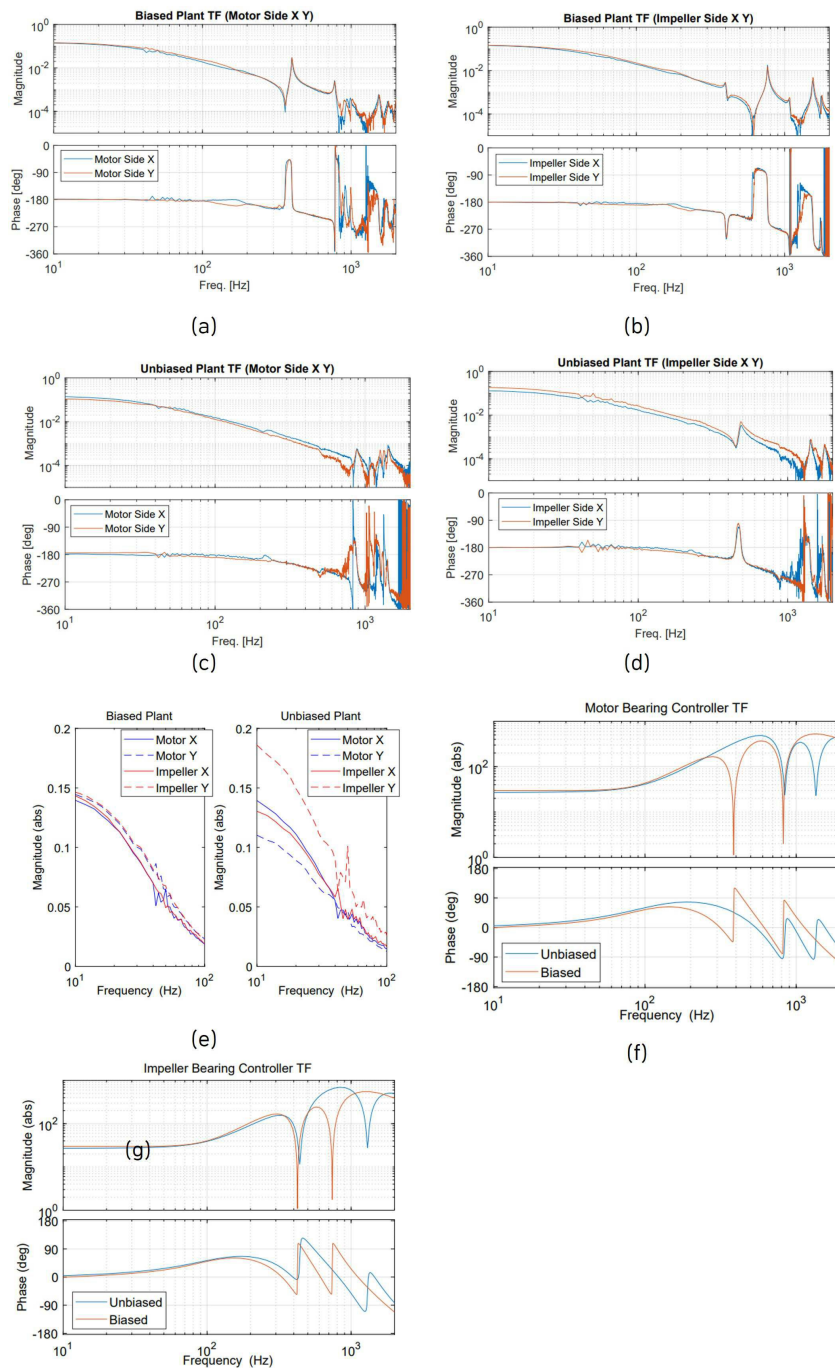
도면10



도면11



도면12



도면13

Compressor	Bearing	X	Y	Ratio
Biased	Motor	0.1395	0.1444	1.035
	Impeller	0.1303	0.1464	1.123
Unbiased	Motor	0.1395	0.1102	0.790
	Impeller	0.1433	0.1860	1.298