



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년04월10일
(11) 등록번호 10-1251859
(24) 등록일자 2013년04월01일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02K 15/02 (2006.01) H02K 19/06 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-0032171
(22) 출원일자 2012년03월29일
심사청구일자 2012년03월29일
(56) 선행기술조사문헌
2009년도 대한전기학회 학계학술대회
논문집(2009.07.14-17.)*
KR1020100080653 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
이중호
대전광역시 유성구 노은동로 187, 열매마을 607동
1504호 (지족동)
(74) 대리인
남승호

전체 청구항 수 : 총 7 항

심사관 : 김재현

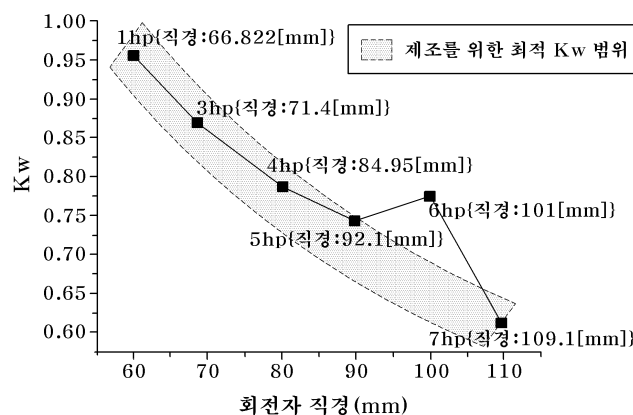
(54) 발명의 명칭 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법

(57) 요약

본 발명은 토크 밀도 향상을 위한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법에 관한 것이다. 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 이상의 자속장벽을 갖는 4개의 자속장벽군이 이격되어 형성되고, 상기 자속장벽의 단부에는 영구자석이 삽입된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법은, 상기 회전자를 설계하기 위한 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 회전자의 직경, 각각의 상기 자속장벽 군에 포함되는 자속장벽의 수, 각각의 상기 자속장벽의 폭을 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 d축-q축 인덕턴스 차(L_d-L_q)를 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 d축-q축 인덕턴스 차를 저장하는 단계; 상기 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 될 때의 상기 설계변수의 값을 출력하는 단계; 를 포함한다.

이러한 구성에 따르면, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 특성이 향상된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법을 제공할 수 있다.

대표도 - 도6



특허청구의 범위

청구항 1

증상에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 이상의 자속장벽을 갖는 4개의 자속장벽군이 이격되어 형성되고, 상기 자속장벽의 단부에는 영구자석이 삽입된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법에 있어서,

상기 회전자를 설계하기 위한 캐드 파일을 초기화하는 단계;

상기 회전자의 직경, 각각의 상기 자속장벽군에 포함되는 자속장벽의 수, 각각의 상기 자속장벽의 폭을 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계;

통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위를 설정하는 단계;

유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 d축-q축 인덕턴스 차(L_d-L_q)를 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 d축-q축 인덕턴스 차를 저장하는 단계;

상기 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 될 때의 상기 설계변수의 값을 출력하는 단계;

를 포함하고,

상기 회전자의 직경은 66.82 내지 109.1mm 이고, 각각의 상기 자속장벽군에 포함되는 상기 자속장벽의 수는 3 내지 6인 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

전체 자속장벽의 폭과 전체 철심영역의 폭의 비를 K_w 라 할때,

K_w 가 0.5 내지 1 사이 범위에 있도록 상기 설계변수의 범위를 설정하는 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

여기서, $K_w = \sum W_{air} / \sum W_{iron}$ 이고, $\sum W_{air}$ 는 전체 자속장벽의 폭, $\sum W_{iron}$ 은 전체 철심영역의 폭이다.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 캐드 파일을 초기화하는 단계에서는 상기 회전자의 슬롯수를 24로 선택하는 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

청구항 5

제1항, 제3항 및 제4항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 중심합성계획법에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해 분산분석을 이용하는 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 분산분석에서 회귀선의 타당성은 결정계수(R^2)와 수정결정계수(R_A^2)에 의해 이루어지는 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

청구항 7

제1항, 제3항 및 제4항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 설계변수의 값을 변화시킬 때 노드 수, 요소 수, 경계 조건은 변화하지 않는 것을 특징으로 하는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법.

청구항 8

삭제

청구항 9

제1항, 제3항 및 제4항 중 어느 한 항에 따른 설계 방법에 의해 제작된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 토크 밀도 향상을 위한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor: SynRM)는 저효율, 저출력 특성으로 크게 실용화되지 못했으나, 최근에는 전력전자 소자 및 회로 기술의 발달과 더불어 단점이 보완되면서 많은 관심을 받고 있다. 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자는 권선이 없는 간단한 구조이므로 고장이 적고 신뢰도가 높아서 장시간 운전이 필요한 곳에 적합하며 유지 보수가 용이한 장점이 있다.

[0003] 동기형 릴럭턴스 전동기는 회전자의 회전에 따른 자기저항의 변화에 의해서 회전력이 발생하는 원리를 이용한 모터이다. 회전자는 복수의 강판 시트가 적층되어 이루어진 코어를 포함하는데, 상기 코어에는 수개의 자속장벽이 형성된다.

[0004] 회전자가 기동되면, 자속의 흐름이 자속장벽에 의해 방해되어 자속장벽측 방향(즉 q축)과 각각의 자속장벽군 사이 방향(즉, d축)의 자기저항이 달라지는데, 이러한 d축과 q축의 자기저항 차이에 의해 리럭턴스 토크가 발생된다. 리럭턴스 토크는 고정자의 자속과 동기되므로 회전자가 리럭턴스 토크에 의해 동기속도로 회전하게 된다.

[0005] 적절한 양의 영구자석을 회전자의 자속장벽에 매립하게 되면 동기 릴럭턴스 전동기의 q축 인덕턴스를 감소시켜 토크 밀도와 역률을 개선할 수 있다. 이러한 전동기를 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(Permanent Aagnet Assisted Synchronous Reluctance Motor; PMASynRM)라 한다.

[0006] 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 특성을 향상시키기 위해서는 토크에 영향을 주는 설계변수를 찾고, 설계변수들의 상호작용에 대한 영향을 고려하여 고정자 및 회전자를 설계하는 것이 중요하다.

[0007] 따라서, 적절한 설계변수를 찾고, 설계변수를 변화시키면서 최적의 성능을 나타내는 설계변수값을 출력할 수 있는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법이 요구된다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 대한민국 특허 제10-1069048호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 상기 사정을 감안하여 발명한 것으로, 토크 특성을 향상시킬 수 있는 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법을 제공하고자 함에 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0010] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 측면에 의하면, 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 이상의 자속장벽을 갖는 4개의 자속장벽군이 이격되어 형성되고, 상기 자속장벽의 단부에는 영구자석이 삽입된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법은, 상기 회전자를 설계하기 위한 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 회전자의 직경, 각각의 상기 자속장벽군에 포함되는 자속장벽의 수, 각각의 상기 자속장벽의 폭을 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 d축-q축 인덕턴스 차(L_d-L_q)를 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 d축-q축 인덕턴스 차를 저장하는 단계; 상기 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 될 때의 상기 설계변수의 값을 출력하는 단계; 를 포함한다.
- [0011] 또한, 상기 회전자의 직경은 66.82 내지 109.1mm 이고, 각각의 상기 자속장벽군에 포함되는 상기 자속장벽의 수는 3 내지 6인 것을 특징으로 한다.
- [0012] 또한, 전체 자속장벽의 폭과 전체 철심영역의 폭의 비를 K_w 라 할때, K_w 가 0.5 내지 1 사이 범위에 있도록 상기 설계변수의 범위를 설정하는 것을 특징으로 하고, 여기서, $K_w = \sum W_{air} / \sum W_{iron}$ 이고, $\sum W_{air}$ 는 전체 자속장벽의 폭, $\sum W_{iron}$ 은 전체 철심영역의 폭이다.
- [0013] 또한, 상기 캐드 파일을 초기화하는 단계에서는 상기 회전자의 슬롯수를 24로 선택하는 것을 특징으로 한다.
- [0014] 또한, 상기 중심합성계획법에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해 분산분석을 이용하는 것을 특징으로 한다.
- [0015] 또한, 상기 분산분석에서 회귀선의 타당성은 결정계수(R^2)와 수정결정계수(R_A^2)에 의해 이루어지는 것을 특징으로 한다.
- [0016] 또한, 상기 설계변수의 값을 변화시킬 때 노드 수, 요소 수, 경계 조건은 변화하지 않는 것을 특징으로 한다.
- [0017] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 측면에 의하면, 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 이상의 자속장벽을 갖는 복수 개의 자속장벽군이 이격되어 형성되고, 상기 자속장벽의 단부에는 영구자석이 삽입된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 방법은, 상기 회전자를 설계하기 위한 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 회전자의 직경, 각각의 상기 자속장벽군에 포함되는 자속장벽의 수, 각각의 상기 자속장벽의 폭을 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 d축-q축 인덕턴스 차(L_d-L_q) 및 토크 리플을 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 d축-q축 인덕턴스 차를 저장하는 단계; 상기 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 될 때의 상기 설계변수의 값을 출력하는 단계; 를 포함한다.
- [0018] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 측면에 의하면, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 상기 전동기 설계 방법에 의해 제작된다.

발명의 효과

- [0019] 본 발명에 따르면, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 특성이 향상된 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0020] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기에서 영구자석이 삽입된 회전자의 단면과 그에 따른 페이지저를 도시하는 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 1/4 모델을 도시하는 도면이다.
- 도 3은 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.
- 도 4는 초기 전동기 모델 및 본 발명에 따른 전동기 모델에서 각도에 따른 토크 특성을 비교하여 나타낸 그래프

이다.

도 5는 초기 전동기 디자인과 본 발명에 따른 전동기의 최적 디자인을 비교하여 도시한 도면이다.

도 6은 본 발명에 따른 전동기 설계 방법에서 회전자 직경에 따른 최적 Kw 값의 변화를 도시하는 도면이다.

도 7은 본 발명에 따른 전동기 설계 방법에 의해 설계된 최적 모델을 전동기 용량별로 비교하여 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0021] 이하 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 대한 구성 및 작용을 상세히 설명하면 다음과 같다. 여기서 각 도면의 구성요소들에 대해 참조부호를 부가함에 있어서 동일한 구성요소들에 한해서는 비록 다른 도면에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호로 표기되었음에 유의하여야 한다.
- [0022] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기에서 영구자석이 삽입된 회전자의 단면과 그에 따른 페이지도를 도시하는 도면이다. 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 1/4 모델을 도시하는 도면이다.
- [0023] 도 1을 참조하면, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(또는 PMASynRM)의 회전자(20)의 중앙에는 회전축공(23)이 형성되고, 상기 회전축공(23)의 주위로 자속장벽군이 배치되어 있다. 본 실시예에서는 4개의 자속장벽군이 배치되고, 각각의 자속장벽군은 3개의 자속장벽(21)을 갖는다. 자속장벽(21)의 단부에는 영구자석(22)이 삽입된다.
- [0024] 일반적인 동기 릴럭턴스 전동기는 유도전동기보다 다소 낮은 역률에서 작동된다. 이러한 문제는 본 실시예의 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기와 같이 회전자 세그먼트 내에 영구자석을 삽입함으로써 경감될 수 있다.
- [0025] 영구자석이 q축 플럭스 경로에 포함되면, 플럭스 관련식은 다음과 같이 표현된다.
- [0026]
$$\lambda_d = L_d i_d \quad \text{식(1)}$$
- [0027]
$$\lambda_q = L_q i_q + \lambda_{mq(pm)} \quad \text{식(2)}$$
- [0028] 여기서, L_d 및 L_q 는 d축 및 q축 인덕턴스이고, $L_d \neq L_q$ 이다. 토크 표현식은 다음과 같다.
- [0029]
$$T_{pmr} = (3/2)(p/2)[(L_d - L_q)i_q i_d + \lambda_{mq(pm)} i_d] \quad \text{식(3)}$$
- [0030] L_q 가 0으로 가면, PMASynRM의 이론적인 최대 토크가 달성될 수 있다. 고정자 q축 MMF의 방향에 의해 정의된 양의 방향에 대해 자석의 극성이 반대로 되는 것을 가정할 수 있다. 이 경우, 토크 표현식은 다음과 같다.
- [0031]
$$T_{pmr} = (3/2)(p/2)[L_d i_q i_d - (L_q i_q - \lambda_{mq(pm)}) i_d] \quad \text{식(4)}$$
- [0032] q축 인덕턴스는 이론적으로 0으로 갈 수 있다. L_q 가 충분히 낮기 때문에 영구자석에 의해 보상 플럭스가 얻어질 수 있다.
- [0033] 도 1 우측의 페이지도는 q축 플럭스가 완전히 없어질 때의 영구자석의 효과를 나타내고 있다. 이와 같이, 동기 릴럭턴스 전동기의 자속장벽 내에 영구자석을 삽입함으로써, 전동기의 토크를 극대화할 수 있다.
- [0034] 도 2를 참조하면, 본 발명의 PMASynRM은 고정자(10)와 회전자(20)를 갖는다. 고정자(10)는 중앙에 회전자(20)를 수용하기 위한 수용영역을 갖는다. 고정자(10)는 원주방향을 따라 일정한 간격으로 이격되어 방사상으로 돌출된 다수의 티스(teeth; 11)를 갖고, 티스(11)에는 코일이 권선된다. 인접하는 티스(11) 사이에는 슬롯(12)이 형성된다.
- [0035] 고정자(10)에서, 티스(11)와 슬롯(12)의 수는 동일하다. 본 실시예는 PMASynRM의 1/4 모델에서 6개의 슬롯을 갖는 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하고 있고, 마찬가지로 티스(11)의 수도 6개가 된다. 따라서, 전체 PMASynRM의 슬롯(12)은 24개가 되고, 티스(11)의 수도 24개가 된다.
- [0036] 고정자(10)의 수용영역에는 회전자(20)가 수용되어 회전하게 된다. 회전자(20)의 중앙에는 회전축공(23)이 형성된다. 회전자(20)는 얇은 박편으로 이루어진 코어가 축방향으로 적층되어 형성될 수 있다.

- [0037] 회전자(20)에는 반경방향으로 이격된 복수의 자속장벽(flux barrier; 21)을 갖는 자속장벽군이 형성된다. 자속장벽(21)은 회전자(20)에 형성된 개구로서, 공기가 통할 수 있는 공기영역이 된다. 자속장벽(21)은 q축 방향(자속장벽을 가로지르는 방향)의 인덕턴스를 감소시키고, d축 방향(자속장벽군 사이 방향)의 인덕턴스를 증가시켜, 결과적으로 토크 및 역률 특성을 개선하는 역할을 한다.
- [0038] 회전자(20)에 형성되는 자속장벽군의 수는 전동기의 극수에 따라 달라지고, 본 실시예에서는 4극 전동기로서 4개의 자속장벽군이 형성된다. 각각의 자속장벽군에는 많은 수의 자속장벽(21)이 형성될수록 토크 향상에 유리하지만, 자속장벽(21) 수를 계속 늘리면 제한된 회전자(20) 반경 내의 철심 영역이 상대적으로 감소하여 포화가 일어난다. 따라서, 적절한 자속장벽(21) 수의 결정은 최대 토크를 얻기 위한 회전자 설계의 중요한 변수가 된다. 도 2에는 3개의 자속장벽(21)이 형성된 전동기가 도시된다.
- [0039] 자속장벽(21)은 회전자(20)의 회전축공(23)에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3이라 하기로 한다. 자속장벽 1 및 2는 회전자(20)의 단부에서 단부로 이어지면서 2개의 굴곡부를 거치면서 연결되는 형태가 된다. 자속장벽 3은 회전자(20)의 가장 단부쪽에 형성되고 짧은 직선 형태가 된다.
- [0040] 자속장벽 1 및 2의 양 단부에는 영구자석(22)이 삽입된다. 영구자석(22)은 q축 인덕턴스를 감소시켜, 결과적으로 전동기의 토크를 향상시킨다.
- [0041] 각각의 자속장벽(21)의 폭은 회전자(20)의 설계에서 중요한 설계변수가 된다. 여기서, 자속장벽 1의 폭을 L1, 자속장벽 2의 폭을 L2, 자속장벽 3의 폭을 L3라 한다. 그리고, 회전자(20)의 반경방향에서 철심부분의 폭을 회전축공(23)에 가까운 순으로 R1, R2, R3, R4라 하기로 한다.
- [0042] 전체 자속장벽의 폭과 전체 철심영역의 폭의 비를 Kw라 할때, $Kw = \sum W_{air} / \sum W_{iron}$ 이다. 여기서, $\sum W_{air}$ 는 전체 자속장벽의 폭, $\sum W_{iron}$ 은 전체 철심영역의 폭이다. 본 실시예에서, $\sum W_{air}$ 는 $L_1+L_2+L_3$ 이고, $\sum W_{iron}$ 은 $R_1+R_2+R_3+R_4$ 가 된다.
- [0043] Kw가 적절한 범위에 있을 때, PMASynRM의 토크 특성이 좋아지므로, Kw는 회전자의 중요한 설계변수가 된다. 이러한 Kw는 전체 자속장벽의 폭을 적절히 조절함으로써 조절 가능하다.
- [0044] 고정자(10)와 회전자(20)는 일정한 간격으로 이격되어, 그 사이에는 공극(24)이 존재하게 된다. 공극(24)은 돌극비를 개선하기 위해 작게 유지해야 하지만, 제작상의 문제 등으로 0.35 내지 0.45mm, 바람직하게는 0.4mm로 한다.
- [0045] 본 실시예에서, 전동기의 회전자(20) 직경은 66.82 내지 109.1mm일 수 있다. 고정자(10) 직경은 124.98 내지 181.3mm 일 수 있다.
- [0046] 도 3은 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.
- [0047] 반응표면법(Response Surface Methodology; RSM)은 설계변수와 응답 간의 관계를 찾아내고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적의 동기형 토크전동기의 고정자 및 회전자 모델에 대한 응답을 찾아낸다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력 값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고, 실제 응답 값은 기대값 또는 평균값으로 이루어진다.
- [0048] 따라서, 본 발명에서는 설계변수와 출력 값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 유한요소해석(finite element method)을 통해서 관측자료를 획득하였다. 반응표면법에서 k개의 설계변수에 대한 실제 응답 y는 다음과 같이 가정한다.
- [0049] $y=f(X, \theta)$ 식 (1)
- [0050] 식 (1)에서 변수 ($X_1, X_2, \dots, X_k$)는 자연변수(natural variables)이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답 함수 f의 근사함수인 y는 테일러(Taylor) 급수 전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다.
- [0051] 본 발명에서 선택한 연구대상의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다. 따라서, 실제 응답함수 f와 근사함수 y와의 관계는 식(2)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

식 (2)

여기서, ϵ 은 응답의 오차항이고, 변수 ($x_1, x_2, \dots, x_k$)는 코드 변수이다. 여기서, ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고, 분산 σ 를 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플자료에서 추정된 출력 값 y 는 행렬의 형태로서 식(3)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon$$

식 (3)

여기서, X 는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다. 그리고 식(3)에서 추정된 함수 $\hat{y}$ 는 식(4)과 같다.

$$\hat{y} = Xb$$

식 (4)

본 발명의 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계에 이용된 반응표면법(RSM)에는 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 발명에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(central composite design : CCD)을 이용하였다.

2^k 요인실험(2^k factorial experiments)은 각 변수의 2수준(평면)에서만 실험이 되므로 변수의 수준변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 식(2)의 이차 다항회귀모형에서 제곱항의 계수 등을 추정할 수 없다. 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정하기 위하여 다음과 같이 중심점과 축점을 2^k 요인실험에 추가시킨 실험계획을 중심합성계획법이라 한다.

표 1

분산분석

요인	자유도	제곱합	평균제곱	F_0
회귀	k	SS_R	$SS_R / k = MS_R$	MS_R / MS_E
잔차	n-k-1	SS_E	$SS_E / (n-k-1) = MS_E$	
총	n-1	S_{yy}	$S_{yy} / n-1$	

통계적인 근사방법인 반응표면법은 항상 오차를 포함하고 있고, 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법에도 오차를 포함하고 있으므로, 설계한 후 추정된 근사함수의 오차 정도를 확인해야만 한다.

본 발명에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해서 분산분석(Analysis of variance : ANOVA)을 이용하였으며, 표 1에서 n 은 실험의 총계이고, k 는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타내었다. 모델의 적합성을 판단하는데 있어서 중요한 역할을 하는 세 가지 오차합계인 잔차 제곱합(SS_E), 총 편차의 제곱합(S_{yy}) 및 회귀 제곱합(SS_R)이 있다.

잔차 제곱합을 SS_E 라 하고, 총 편차의 제곱합을 S_{yy} 라 할 때, 회귀 제곱합 $SS_R = S_{yy} - SS_E$ 이다.

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

여기서, y_i : 관측 값, $\hat{y}_i$: 예측 값, $\bar{y}$: 평균 값이다.

결정계수 R^2 은 S_{yy} 와 SS_R 로 식(5)과 같다.

$$R^2 = SS_R / S_{yy}$$

식 (5)

- [0067] 결정계수는 총변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다. R^2 을 수정하기 위한 수정 결정계수는
- [0068]
$$R_A^2 = 1 - (SS_E / (n-k-1)) / (S_{yy} / (n-1))$$
 식 (6)
- [0069] 표 1에서 보는 것과 같이 평균제곱은 제곱합을 자유도로 나눈 것이다. 식 (6)은 총평균제곱 ($S_{yy}/(n-1)$)이고, 측도비율(R_A^2)은 총 평균제곱에 이용되는 추정된 오차분산 값을 분모로 하고, 잔차 평균제곱에 의하여 제공된 추정된 오차분산 값을 분자로 하여 얻은 값이다. 그러므로 회귀선의 타당성은 결정계수(R^2)와 수정결정계수(R_A^2)에 의하여 결정된다.
- [0070] 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법과 유한요소해석을 이용하는 본 발명의 실시예에 따른 영구자석 매입형 동기 킬러전기 전동기의 회전자 설계 방법을 도 1 및 도 2를 참조하여 설명하면 다음과 같다.
- [0071] 먼저, 회전자(20)를 설계하기 위한 캐드(CAD) 파일을 초기화하는 단계이다. 다음에, 전처리(pre-processor) 작업으로 유한요소 모델링을 위한 데이터를 설정한다. 이때, 설계의 목적은 토크 밀도를 향상시키고 토크 리플을 저감하기 위한 회전자 설계에 필요한 구조를 얻는 것이다.
- [0072] 다음에, 회전자(20)의 설계변수로서 회전자(20)의 직경, 각각의 자속장벽군에 포함되는 자속장벽(21) 수, 각각의 자속장벽(21)의 폭을 채택하여 유한요소 해석을 위한 설계 데이터를 모델링하는 단계이다.
- [0073] 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 아래의 표 2에 나타낸 것처럼 중심합성계획법을 이용하여 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다. 여기서, 회전자(20)의 직경은 전동기의 마력 수에 따라 66.82mm 에서 109.1mm로 범위를 설정하고, 자속장벽(21) 수는 3 내지 6개로 설정한다. 또한, 본 발명의 실시예에서 실험횟수(N)는 1~32까지 설정했다.
- [0074] 또한, 회전자(20)의 직경, 각각의 자속장벽군에 포함되는 자속장벽(21) 수, 각각의 자속장벽(21)의 폭이 결정되면 Kw 값을 계산할 수 있다. 상술한 바와 같이, Kw는 회전자(20)의 전체 자속장벽의 폭과 전체 철심영역의 폭의 비가 되고, 여기서, $Kw = \sum W_{air} / \sum W_{iron}$ 이고, $\sum W_{air}$ 는 전체 자속장벽의 폭, $\sum W_{iron}$ 은 전체 철심영역의 폭이다. 상기 설계변수의 범위를 설정할 때는 Kw가 0.5 내지 1 사이 범위에 있도록 하는 것이 바람직하다. 이는 본 발명의 방법에 따라 실험한 결과 Kw가 0.5 내지 1 사이 범위를 벗어나면 토크 특성이 나빠지는 것을 확인했기 때문이다.
- [0075] 다음에, 유한요소해석(FEA) 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 d축-q축 인덕턴스 차($L_d - L_q$)를 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 d축-q축 인덕턴스 차를 저장하는 단계이다. 이때, 상기 설계변수 값에 따른 토크 리플도 함께 계산할 수 있다. 상기 유한요소는 작은 격자 형태로 주어지고, 생성된 하나의 격자를 메쉬(mesh)라고 하며, 메쉬의 꼭지점을 이루는 점을 노드(node)라 하고, 노드로 연결된 메쉬의 영역을 요소(element)라고 한다.
- [0076] 다음에, 실험회수 N을 32로 설정하였을 때 $N > 32$? 를 체크하는 단계이다. N이 32보다 클 때에는 d축-q축 인덕턴스 차가 최대일 때를 고찰하며, N이 32보다 작을 때에는 N값에서 1을 더하여 계속 d축-q축 인덕턴스 차를 연산하도록 구성되어 있다.
- [0077] N값에서 1을 더하여 설계변수의 변화에 따르는 변화된 회전자 형상을 해석할 때, 유한요소해석을 위하여 전처리 작업을 다수 수행해야하는 어려움이 따른다.
- [0078] 이러한 이유로, CAD 파일은 자동적으로 자속장벽 폭의 변화에 대하여 다시 그려지도록 프로그램되어 있다. 다음으로 자동으로 메쉬 작업이 다시 이루어진다(remesh). 여기서 동일한 자속장벽 수에서 회전자의 x, y 좌표만이 변하고, 마디번호(node number), 요소 번호(element number), 경계 조건(boundary condition) 등은 변하지 않는다.
- [0079] 이러한 자동 형상변화 프로그램은 본 발명의 설계 프로그램에 포함하여 프로그램을 설계하여 수행하므로 설계시간을 단축한다. 이러한 실험절차는 N=32까지 실행된다.
- [0080] 다음에, 처음에 설정한 실험회수에 도달하면 상기 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 될 때의 상기 설계변수의 값을

출력하는 단계이다. 이때, 상기 계산된 토크 리플 값도 고려하는 것이 바람직하다. 즉, 특정 설계변수 값에서 d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 된다고 할지라도 계산된 토크 리플이 일정 범위를 벗어나는 경우에는, d축-q축 인덕턴스 차가 최대가 아닐지라도 토크 리플을 고려한 적절한 설계변수의 값을 출력하는 것이다.

표 2

[0081] 설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 범위						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
L1(mm)	3.575	3.675	3.775	3.875	3.975	4.075	4.175
L2(mm)	3.559	3.659	3.759	3.859	3.959	4.059	4.159

[0082] 표 3은 회전자 직경이 66.82mm인 모델에서 본 발명의 중심합성계획법을 이용한 설계 방법에 따른 실험 결과를 나타낸다. 도 4는 초기 전동기 모델 및 본 발명에 따른 전동기 모델에서 각도에 따른 토크 특성을 비교하여 나타낸 그래프이다. 도 5는 초기 전동기 디자인과 본 발명에 따른 전동기의 최적 디자인을 비교하여 도시한 도면이다.

표 3

[0083] 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	L1	L2	Ld-Lq(mH)	토크 리플(%)
1	3.8751	3.8591	88.33	42.6
2	4.1751	3.5591	86.26	39.3
3	3.7751	3.8591	88.58	35.4
...	...	...	...	...
15	3.6751	3.8591	88.65	35.8
16	3.8751	3.6591	87.21	40.4
17	4.0751	3.5591	89.24	38.0
...	...	...	...	...
30	4.1751	3.7591	86.51	37.2
31	3.6751	4.0591	86.32	37.9
32	4.0751	3.9591	87.41	39.7

[0084] L1: 자속장벽 1의 폭, L2: 자속장벽 2의 폭

[0085] 도 2 및 표 3을 참조하면, L1과 L2의 폭을 조절함으로써 d축-q축 인덕턴스 차와 토크 리플이 달라지게 된다. 전체 실험회수 32회 중에서, 17회 때의 d축-q축 인덕턴스 차가 89.24 mH로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이때, L1은 4.0751mm이고, L2는 3.5597mm 이다.

[0086] 도 4를 참조하면, 초기 PMASynRM의 평균 토크는 0.698 Nm이고, 토크 리플은 37.3% 임에 비해, 본 발명의 PMASynRM의 평균 토크는 0.748 Nm이고, 토크 리플은 35.49% 로 토크 특성이 향상된 것을 확인할 수 있다.

[0087] 표 4는 본 발명의 중심합성계획법을 이용한 설계 방법에서 전동기 용량에 따른 최적의 실험 결과를 나타낸다. 도 6은 본 발명에 따른 전동기 설계 방법에서 회전자 직경에 따른 최적 Kw 값의 변화를 도시하는 도면이다. 도 7은 본 발명에 따른 전동기 설계 방법에 의해 설계된 최적 모델을 전동기 용량별로 비교하여 도시한 도면이다.

표 4

[0088]

중심합성계획법을 이용한 실험 결과

용량	Ld-Lq(mH)	Kw	직경(mm)	자속장벽 수	정격 전류(A)
1HP	89.24	0.95523	66.822	3	2
3HP	115.84	0.858	71.4	3	6
4HP	71.23	0.7855	84.95	5	11
5HP	64.64	0.7423	92.1	5	14
6HP	60.46	0.774	101	6	17
7HP	47.76	0.61	109.1	6	20

[0089]

표 4를 참조하면, 1HP의 전동기에서는 3개의 자속장벽을 갖고, Kw값이 0.95523일 때 d축-q축 인덕턴스 차가 89.24 mH로 최대인 것을 알 수 있다. 또한, 7HP의 전동기에서는 6개의 자속장벽을 갖고, Kw값이 0.61일 때 d축-q축 인덕턴스 차가 47.76 mH로 최대인 것을 알 수 있다.

[0090]

도 6을 참조하면, 전동기 용량이 작아짐에 따라 전동기 제조를 위한 최적 Kw는 1에 수렴하고, 전동기 용량이 커짐에 따라 최적 Kw는 0.5에 수렴함을 알 수 있다. 이와 같이, 전동기 용량에 따른 Kw의 범위를 정해두면 신속하고 용이한 전동기 설계가 가능하게 된다.

[0091]

또한, 전동기의 용량이 커짐에 따라 최적의 자속장벽 수는 달라지고, 전체 전동기 용량에서 이상적인 자속장벽의 수는 3~6개 사이임을 알 수 있다.

[0092]

도 7을 참조하면, (a)는 용량이 1HP 이고, 회전자 직경이 66.822mm 인 PMASynRM의 회전자 최적 설계 형상을 나타내고, (b)는 용량이 3HP 이고, 회전자 직경이 71.4mm 인 PMASynRM, (c)는 용량이 4HP 이고, 회전자 직경이 84.95mm 인 PMASynRM, (d)는 용량이 5HP 이고, 회전자 직경이 92.1mm 인 PMASynRM, (e)는 용량이 6HP 이고, 회전자 직경이 101mm 인 PMASynRM, (f)는 용량이 7HP 이고, 회전자 직경이 109.1mm 인 PMASynRM의 회전자 최적 설계 형상을 나타낸다.

[0093]

상술한 바와 같이, 본 발명은 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계와 관련하여 회전자의 설계변수를 기초로 CAD파일, 전처리 작업데이터를 설정하는 단계를 거쳐서, 반응표면법 중에서 중심합성계획법을 이용하여 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하였다. 다음에, 유한요소해석(FEA)을 이용하여 d축-q축 인덕턴스 차 및 토크 리플 값을 계산하는 단계를 거쳐서, 최적의 회전자의 설계변수를 제공하므로 생산비를 절감하고 전동기의 성능을 향상시킬 수 있다.

[0094]

본 발명은 상기 실시예에 한정되지 않고 본 발명의 기술적 요지를 벗어나지 아니하는 범위 내에서 다양하게 수정 또는 변형되어 실시될 수 있음은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 있어서 자명한 것이다.

부호의 설명

[0095]

10 : 고정자

11 : 티스

12 : 슬롯

20 : 회전자

21 : 자속장벽

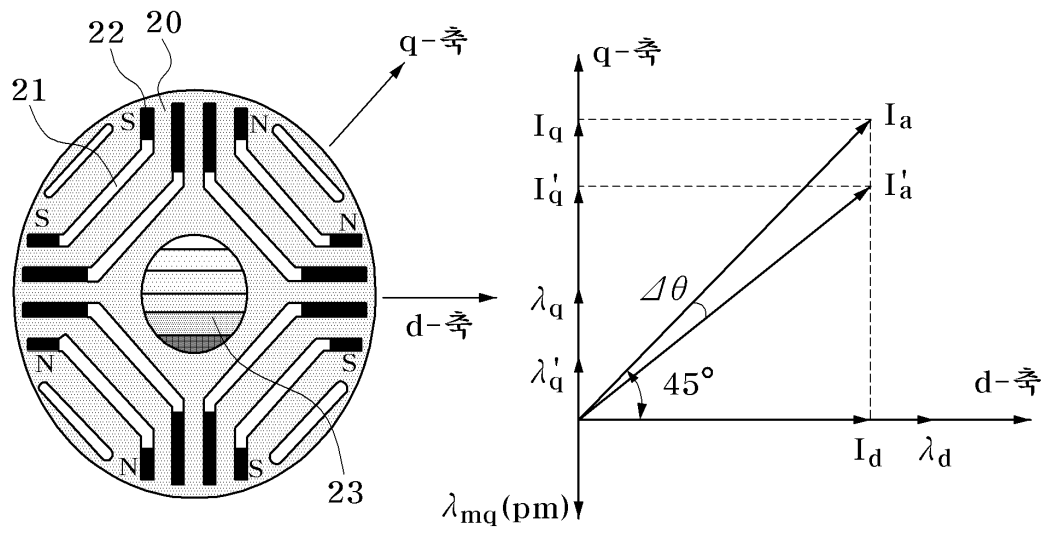
22 : 영구자석

23 : 회전축공

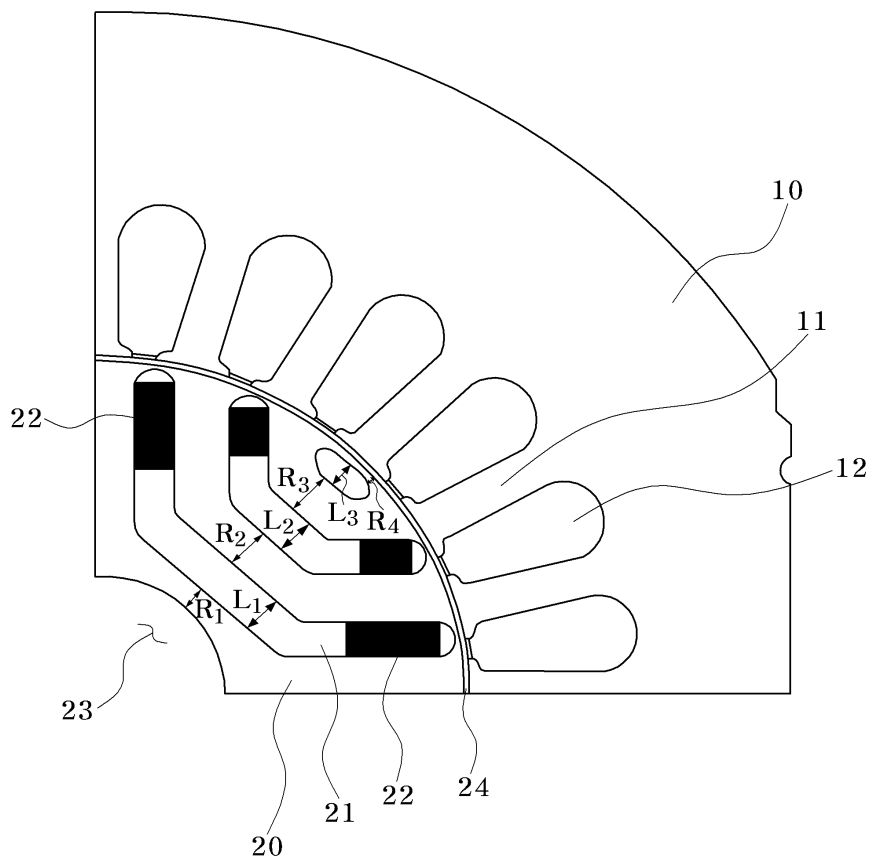
24 : 공극

도면

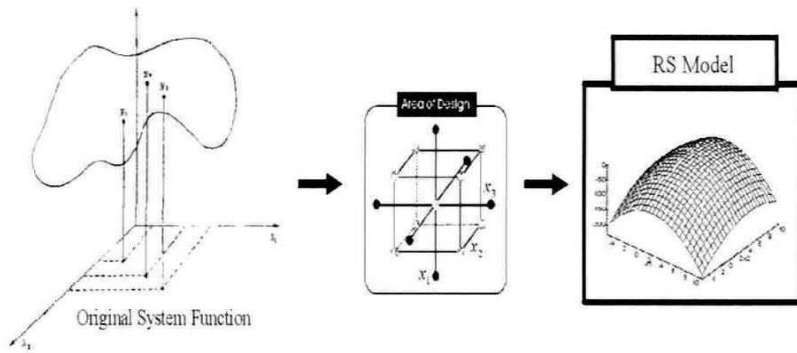
도면1



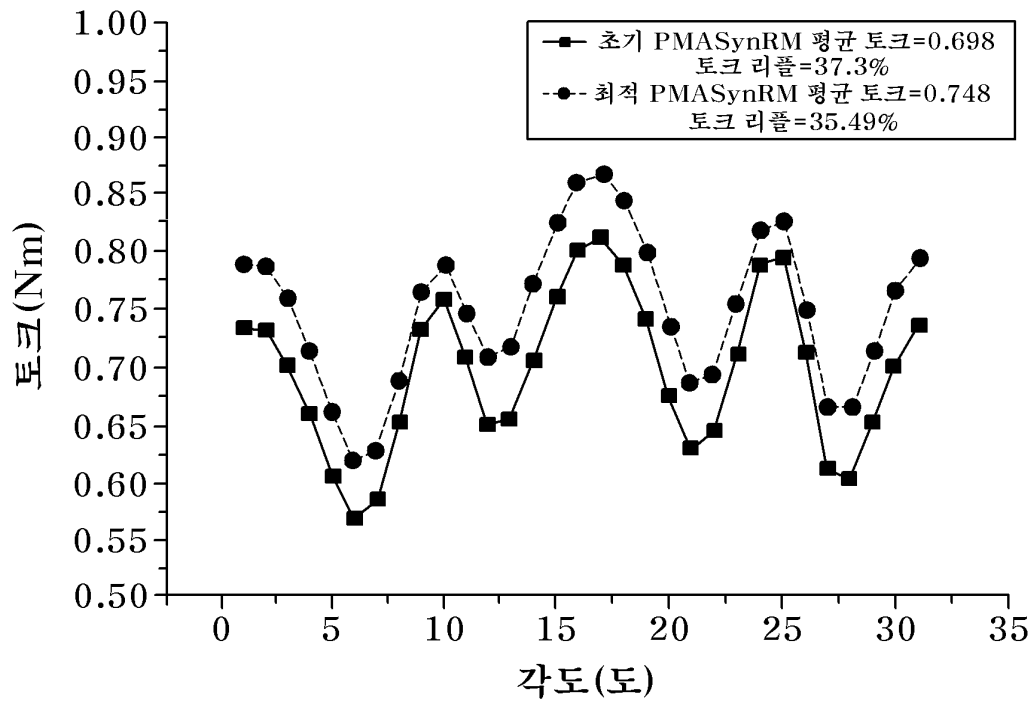
도면2



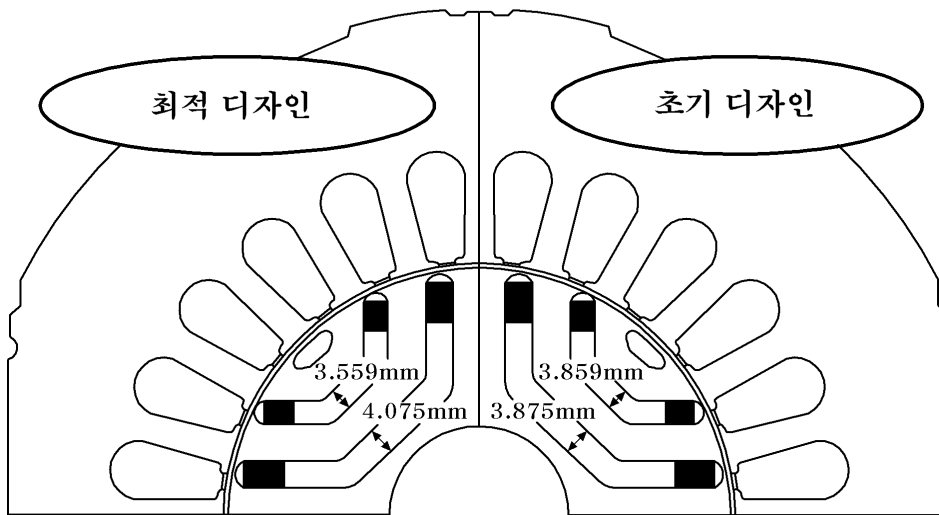
도면3



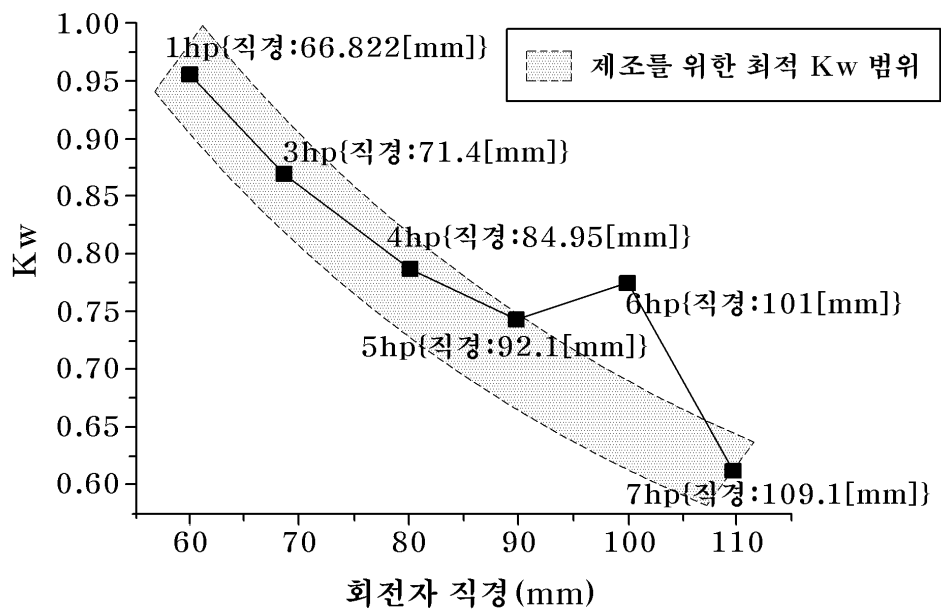
도면4



도면5



도면6



도면7

