



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0080635
(43) 공개일자 2013년07월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H02K 19/10 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2012-0001542

(22) 출원일자 2012년01월05일

심사청구일자 2012년01월05일

(71) 출원인

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 6 항

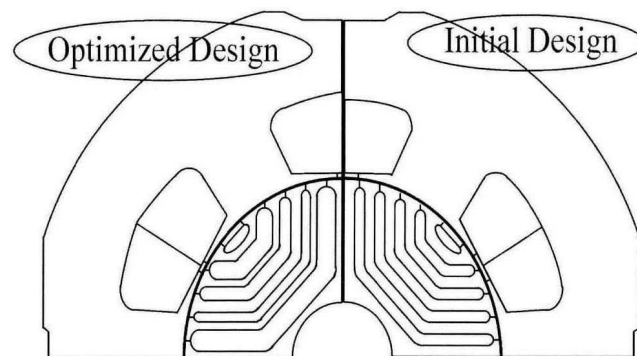
(54) 발명의 명칭 토크 리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기

(57) 요약

본 발명은 토크 리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기에 관한 것이다. 동기형 릴럭턴스 전동기는, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 6개의 티스와, 인접하는 상기 티스 사이에 형성된 슬롯을 갖고 중앙에 수용영역이 형성된 고정자; 상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 내지 5개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 복수 개 형성된 회전자; 를 포함하고, 각각의 상기 티스에는 코일이 집중권선형으로 권선되고, 상기 슬롯의 깊이 대 상기 티스의 폭의 비는 1 : 1.1~1.2 인 것을 특징으로 한다.

이러한 구성에 따르면, 본 발명에 따르면, 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 리플이 저감된 집중권선형의 동기형 릴럭턴스 전동기를 제공할 수 있다.

대표도 - 도6



특허청구의 범위

청구항 1

동기형 릴럭턴스 전동기에 있어서,

원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 6개의 티스와, 인접하는 상기 티스 사이에 형성된 슬롯을 갖고 중앙에 수용 영역이 형성된 고정자;

상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 내지 5개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 복수 개 형성된 회전자;

를 포함하고,

각각의 상기 티스에는 코일이 집중권선형으로 권선되고,

상기 슬롯의 깊이 대 상기 티스의 폭의 비는 $1 : 1.1 \sim 1.2$ 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 슬롯의 깊이 대 상기 슬롯의 오픈폭의 비는 $1 : 0.1 \sim 0.3$ 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 회전자에는 5개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 4개 형성되고,

각각의 상기 자속장벽군에서 상기 회전축공에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3, 자속장벽 4 라 하고,

상기 자속장벽 1의 폭을 L1, 상기 자속장벽 2의 폭을 L2, 상기 자속장벽 3의 폭을 L3, 상기 자속장벽 4의 폭을 L4라 할 때, $(L2, L3) < L4 < L1$ 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 회전자에는 4개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 4개 형성되고,

각각의 상기 자속장벽군에서 상기 회전축공에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3 이라 하고,

상기 자속장벽 1의 폭을 L1, 상기 자속장벽 2의 폭을 L2, 상기 자속장벽 3의 폭을 L3라 할 때, $L2 < L3 < L1$ 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

청구항 5

제3항 또는 제4항에 있어서,

상기 고정자와 상기 회전자 사이의 공극은 0.35 내지 0.45mm 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

청구항 6

제3항 또는 제4항에 있어서,

상기 회전자의 립은 0.4 내지 0.6mm 인 것을 특징으로 하는 동기형 릴럭턴스 전동기.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 토크 리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기에 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 회전된다.

[0005] 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 권선을 종래의 분포권선형이 아니라 집중권선형으로 했을 때는 슬롯의 수가 적기 때문에 고정자를 제작하는 비용이 줄어들고, 제조 시 권선 작업이 단순해지는 장점이 있다. 또한, 분포권선형에 비해 집중권선형은 상대적으로 슬롯의 면적이 넓고 고정자 밖으로 돌출되는 코일의 양이 줄어들어 동손이 감소되는 효과가 있다.

[0006] 그러나, 동기형 릴럭턴스 전동기의 권선방법을 집중권선형으로 했을 때는 토크리플이 증가되는 등의 문제점이 발생된다. 따라서, 집중권선형의 동기형 릴럭턴스 전동기를 설계할 때는, 토크리플의 크기에 영향을 주는 설계변수를 찾고, 설계변수들의 상호작용에 대한 영향을 고려하여 고정자 및 회전자를 설계하는 것이 매우 중요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국 특허 공개 제10-2003-0081828호

(특허문헌 0002) 한국 특허 공개 제10-2010-0080653호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 따라서, 본 발명은 상기 사정을 감안하여 발명한 것으로, 토크 리플을 감소시킬 수 있는 집중권선형의 동기형 릴럭턴스 전동기를 제공하고자 함에 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 측면에 의하면, 동기형 릴럭턴스 전동기는, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 6개의 티스와, 인접하는 상기 티스 사이에 형성된 슬롯을 갖고 중앙에 수용영역이 형성된 고정자; 상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공이 형성되고, 상기 회전축공의 주위로 3 내지 5개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 복수 개 형성된 회전자; 를 포함하고, 각각의 상기 티스에는 코일이 집중권선형으로 권선되고, 상기 슬롯의 깊이 대 상기 티스의 폭의 비는 1 : 1.1~1.2 인 것을 특징으로 한다.

[0010] 또한, 상기 슬롯의 깊이 대 상기 슬롯의 오픈폭의 비는 1 : 0.1~0.3 인 것을 특징으로 한다.

[0011] 또한, 상기 회전자에는 5개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 4개 형성되고, 각각의 상기 자속장벽군에서 상기 회전축공에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3, 자속장벽 4라 하고, 상기 자속장벽 1의 폭을 L1, 상기 자속장벽 2의 폭을 L2, 상기 자속장벽 3의 폭을 L3, 상기 자속장벽 4의 폭을 L4라 할 때, (L2, L3) <

$L4 < L1$ 인 것을 특징으로 한다.

[0012] 또한, 상기 회전자에는 4개의 자속장벽을 갖는 자속장벽군이 4개 형성되고, 각각의 상기 자속장벽군에서 상기 회전축공에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3 이라 하고, 상기 자속장벽 1의 폭을 $L1$, 상기 자속장벽 2의 폭을 $L2$, 상기 자속장벽 3의 폭을 $L3$ 라 할 때, $L2 < L3 < L1$ 인 것을 특징으로 한다.

[0013] 또한, 상기 고정자와 상기 회전자 사이의 공극은 0.35 내지 0.45mm 인 것을 특징으로 한다.

[0014] 또한, 상기 회전자의 립은 0.4 내지 0.6mm 인 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0015] 본 발명에 따르면, 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 리플이 저감된 집중권선형의 동기형 릴럭턴스 전동기를 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0016] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하는 도면이다.

도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하는 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 회전자의 변화점 변수와 변화 방향을 도시하는 도면이다.

도 4는 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 절차를 나타내는 흐름도이다.

도 6은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 및 회전자 설계에 대한 종래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.

도 7은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 설계에 대한 종래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.

도 8은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계에 대한 종래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 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 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호로 표기되었음에 유의하여야 한다.

[0018] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하는 도면이다. 도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하는 도면이다. 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 회전자의 변화점 변수와 변화 방향을 도시하는 도면이다.

[0019] 도 1을 참조하면, 본 발명의 동기형 릴럭턴스 전동기(또는 전동기)는 고정자(10)와 회전자(20)를 갖는다. 도 1은 동기형 릴럭턴스 전동기의 1/4 모델을 도시하고 있다.

[0020] 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 갖는다. 인접하는 티스(11) 사이에는 슬롯(12)이 형성된다. 고정자(10)에서, 티스(11)와 슬롯(12)의 수는 동일하다. 본 실시예는 6개의 슬롯을 갖는 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하고 있고, 마찬가지로 티스(11)의 수도 6개가 된다.

[0021] 각각의 티스(11)에는 코일이 집중적으로 권선되어 집중권선형 동기형 릴럭턴스 전동기가 된다. 코일의 권선을 집중권선형으로 했을 때는 슬롯의 수가 적어지기 때문에 고정자를 제작하는 비용이 줄어들고, 권선 작업이 간단하여 제작 시간 및 비용을 절감하는 효과가 있다. 또한, 분포권선형에 비해 집중권선형은 상대적으로 슬롯의 면적이 넓고 고정자 밖으로 돌출되는 코일의 양이 줄어들어 동손이 감소되는 효과도 얻을 수 있다.

[0022] 그러나, 코일의 권선을 집중권선형으로 할 때 토크리플이 증가되는 문제점이 있어, 토크리플을 줄일 수 있는 설계가 필요하게 된다.

- [0023] 고정자의 설계변수로서 슬롯(12)이 개방되는 폭을 나타내는 슬롯 오픈폭(X1), 슬롯(12)의 종방향 최대 길이를 나타내는 슬롯 깊이(X2), 티스의 폭을 나타내는 티스 폭(X3)이 있다.
- [0024] 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.
- [0025] 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.
- [0026] 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 변수이고, 3 내지 5개의 자속장벽(21)이 형성되는 것이 바람직하다. 도 1에는 5개의 자속장벽(21)이 형성된 전동기가 도시된다.
- [0027] 자속장벽(21)은 회전자(20)의 회전축공(23)에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3, 자속장벽 4, 자속장벽 5라 하기로 한다. 자속장벽 1 내지 4는 회전자(20)의 단부에서 단부로 이어지면서 2개의 굴곡부를 거치면서 연결되는 형태가 된다. 자속장벽 5는 회전자(20)의 가장 단부쪽에 형성되고 직선 형태가 된다.
- [0028] 각각의 자속장벽(21)의 폭은 회전자(20)의 설계에서 중요한 설계변수가 된다. 여기서, 자속장벽 1의 폭을 L1, 자속장벽 2의 폭을 L2, 자속장벽 3의 폭을 L3, 자속장벽 4의 폭을 L4라 한다.
- [0029] 자속장벽(21)의 단부와 회전자(20)의 단부 사이에는 림(22)이 형성된다. 림(22)의 폭은 가능한 한 작게 하는 것이 누설자속을 줄이는데 바람직하나, 기계 구조상 줄이는데 한계가 있다. 본 실시예에서 림(22)의 폭은 성능이나 강도를 고려하여 0.4 내지 0.6mm, 바람직하게는 0.5mm가 된다.
- [0030] 고정자(10)와 회전자(20)는 일정한 간격으로 이격되어, 그 사이에는 공극(15)이 존재하게 된다. 공극(15)은 돌극비를 개선하기 위해 작게 유지해야 하지만, 제작상의 문제 등으로 0.35 내지 0.45mm, 바람직하게는 0.4mm로 한다.
- [0031] 본 실시예에서, 전동기의 회전자(20) 직경은 28 내지 32mm(예를 들어, 30.1mm), 고정자(10) 직경은 86 내지 90mm(예를 들어, 87.9mm)일 수 있다. 전동기 속도는 3600 rpm, 회전자(20) 적층 길이는 70 내지 85mm(예를 들어, 77mm)일 수 있다.
- [0032] 도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기를 도시하고 있다. 도 1과 동일한 부분에 대해서는 동일부호로 처리하고, 상세한 설명은 생략하기로 한다.
- [0033] 본 실시예에서는, 자속장벽(21)이 4개가 형성된다. 자속장벽(21)은 회전자(20)의 회전축공(23)에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3, 자속장벽 4라 하기로 한다. 자속장벽 1 내지 3은 회전자(20)의 단부에서 단부로 이어지면서 2개의 굴곡부를 거치면서 연결되는 형태가 된다. 자속장벽 4는 회전자(20)의 가장 단부쪽에 형성되고 직선 형태가 된다.
- [0034] 각각의 자속장벽(21)의 폭은 회전자(20)의 설계에서 중요한 설계변수가 되고, 여기서, 자속장벽 1의 폭을 ℓ_1 , 자속장벽 2의 폭을 ℓ_2 , 자속장벽 3의 폭을 ℓ_3 라 한다.
- [0035] 본 실시예에서, 전동기의 회전자(20) 직경은 28 내지 32mm(예를 들어, 30.1mm), 고정자(10) 직경은 86 내지 90mm(예를 들어, 87.9mm)일 수 있다. 전동기 속도는 3600 rpm, 회전자(20) 적층 길이는 70 내지 85mm(예를 들어, 77mm)일 수 있다.
- [0036] 도 3은 회전자 측의 자속장벽이 3개 일 때 자속장벽 폭에 따른 형상변화를 위한 변화점 변수와 변화방향을 보여준다. 각각 한 쌍이 되는 (W1, W8), (W2, W7), (W3, W6)……은 q축을 기준으로 하여 대칭적으로 움직인다. 그리고, P1~P8점들은 자속장벽 폭에 따라 변화하는 상태로 움직인다.
- [0037] 도 4는 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.
- [0038] 반응표면법(Response Surface Methodology; RSM)은 설계변수와 응답 간의 관계를 찾아내고, 관측된 자료를 사용

하여 통계적인 근사방법을 통해 최적의 동기형 릴렉턴스 전동기의 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.

[0039] 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.

$$y=f(X, \theta) \quad \text{식 (1)}$$

[0041] 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.

[0042] 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.

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

[0044] 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 n개의 샘플자료에서 추정된 출력 값 y는 행렬의 형태로서 식(3)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad \text{식 (3)}$$

[0046] 여기서, X는 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.

$$\hat{y} = Xb \quad \text{식 (4)}$$

[0048] 본 발명의 동기형 릴렉턴스 전동기의 고정자 및 회전자 설계에 이용된 반응표면법(RSM)에는 많은 실험적인 설계 방법이 있다. 본 발명에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(central composite design : CCD)을 이용하였으며, 이는 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되는 방법이다.

[0049] 2^k 요인실험(2^k factorial experiments)은 각 변수의 2수준(평균)에서만 실험이 되므로 변수의 수준변화에 따라 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}	$S_{yy} / n-1$	

[0051] 통계적인 근사방법인 반응표면법은 항상 오차를 포함하고 있고, 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법에도 오차를 포함하고 있으므로, 설계한 후 추정된 근사함수의 오차 정도를 확인해야만 한다.

[0052] 본 발명에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해서 분산분석(Analysis of variance : ANOVA)을 이용

하였으며, 표 1에서 n은 실험의 총계이고, k는 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.

[0053] 잔차 제곱합을 SS_E 라 하고, 총 편차의 제곱합을 S_{yy} 라 할 때, 회귀 제곱합 SS_R = S_{yy} - SS_E 이다.

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

[0054] 여기서, y_i: 관측 값, $\hat{y}_i$: 예측 값, $\bar{y}$: 평균 값이다.

[0056] 결정계수 R² 은 S_{yy}와 SS_R로 식(5)과 같다.

$$R^2 = SS_R / S_{yy} \quad \text{식 (5)}$$

[0058] 결정계수는 총변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다. R² 을 수정하기 위한 수정 결정계수는

$$R_A^2 = 1 - (SS_E/n-k-1)/(S_{yy}/n-1) \quad \text{식 (6)}$$

[0060] 표 1에서 보는 것과 같이 평균제곱은 제곱합을 자유도로 나눈 것이다. 식 (6)은 총평균제곱 (S_{yy}/n-1)이고, 측도비율(R_A²)은 총 평균제곱에 이용되는 추정된 오차분산 값을 분모로 하고, 잔차 평균제곱에 의하여 제공된 추정된 오차분산 값을 분자로 하여 얻은 값이다. 그러므로 회귀선의 타당성은 결정계수(R²)와 수정결정계수(R_A²)에 의하여 결정된다.

[0061] 도 5는 본 발명에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자의 설계변수를 기초로 토크리플을 저감하기 위한 회전자 및 고정자 설계의 흐름도를 나타낸 것이다. 도 5의 설계 흐름도에 나타난 회전자 및 고정자 설계 방법을 순서에 기초하여 기술하면 다음과 같다.

[0062] 1. 먼저, CAD 파일 초기화 및 선처리(pre-processor) 작업으로 유한요소 모델링을 위한 데이터를 설정하는 단계이다. 상기 선처리 작업 데이터의 설정은 토크리플을 저감하기 위한 회전자와 고정자 설계에 필요한 구조를 유한요소해석하기 위해 설계 데이터를 모델링하는 것이다.

[0063] 2. 다음에, 토크리플을 저감하기 위한 회전자와 고정자의 설계변수는 토크리플에 영향을 주는 고정자 측의 슬롯 오픈폭(X1), 슬롯 깊이(X2), 티스 폭(X3), 회전자 측의 자속장벽 폭(L1~L4)을 채택하고, 회전자의 립 폭은 제조상의 한계 때문에 고정값으로 설정하는 단계이다.

[0064] 3. 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 아래의 표 2와 표 4에 나타난 것처럼 중심합성계획법을 이용하여 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다. 본 발명의 실시예에서 실험횟수(N)는 1~90까지 설정했다.

[0065] 4. 다음에, 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자 설계를 위하여 개발 제작된 유한요소해석(FEA)을 위한 프로그램을 이용하여 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크리플 값을 계산하는 단계이다.

[0066] 5. 다음에, 개발 제작된 프로그램에 의하여 FEA로부터 연산된 토크리플 값을 저장하는 단계이다.

[0067] 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.

[0068] 6. 다음에, 실험회수 N을 90으로 설정하였을 때 N > 90 ? 를 체크하는 단계이다. N이 90보다 클 때에는 최적 토크리플을 고찰하며, N이 90보다 작을 때에는 N값에서 1을 더하여 계속 토크리플 값을 연산하도록 구성되어 있다.

[0069] N값에서 1을 더하여 토크리플 값을 연산하기 위해 설계변수(X1, X2, X3, L1~L4)의 변화에 따르는 변화된 고정

자 및 회전자 형상을 해석할 때, 유한요소해석을 위하여 선처리 작업을 다수 수행해야하는 어려움이 따른다.

[0070] 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.

[0071] 이러한 자동 형상변화 프로그램은 본 발명의 설계 프로그램에 포함하여 프로그램을 설계하여 수행하므로 설계시간을 단축한다. 이러한 실험절차는 N=90까지 실행된다.

[0072] 7. 다음에, 설정된 설계변수 및 실험주기의 범위에 따라 유한요소해석을 통해 얻어진 데이터에 의해 반응표면의 모델을 형성하고 최적 토크리플을 고찰한다.

표 2

[0073] 설계변수의 범위

설계 변수	설계변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
X1(mm)	1.318	2.000	3.000	4.000	4.682
X2(mm)	12.659	13.000	13.500	14.000	14.341
X3(mm)	13.659	14.000	14.500	15.000	15.341
L1(mm)	3.451	3.480	3.522	3.564	3.592
L2(mm)	1.448	1.653	1.953	2.253	2.457
L3(mm)	1.448	1.653	1.953	2.253	2.457
L4(mm)	3.006	3.033	3.072	3.111	3.137

표 3

[0074] 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	X1	X2	X3	L1	L2	L3	L4	T _{ripple}
1	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.953	3.137	61.79
2	3.000	13.5	14.5	3.592	1.953	1.953	3.072	62.34
3	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.448	3.072	60.91
...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.953	3.072	67.95
21	4.000	14.0	14.0	3.564	2.253	2.253	3.033	78.83
22	2.000	14.0	14.0	3.564	1.653	2.253	3.033	56.31
...	...	...	...	...	...	...	...	...
88	2.000	14.0	14.0	3.564	2.253	2.253	3.111	60.79
89	2.000	13.0	15.0	3.480	2.253	1.653	3.033	67.08
90	4.000	13.0	15.0	3.564	2.253	2.253	3.033	78.14

[0075] X1: 슬롯 오픈폭, X2: 슬롯 깊이, X3: 티스 폭, L1: 자속 장벽 1의 폭, L2: 자속 장벽 2의 폭, L3: 자속 장벽 3의 폭, L4: 자속 장벽 4의 폭, T_{peak}: peak-peak Torque (Nm), T_{ave}: average Torque (Nm), T_{ripple}: T_{peak} / T_{ave} (%)

표 4

[0076] 분산분석

요인	자유도	제곱합	평균제곱	F ₀
회귀	35	3994.57	114.1305	20.01

잔차	53	302.25	5.7029	
블록	1	182.20	1.0051	
총	89	4479.02	50.326	

- [0077] 표 2는 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법에 의한 설계변수의 범위를 나타내고, 표 3은 표 2의 설계변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸다. 표 3에서 나타난 토크리플은 유한요소법으로 구하였다.
- [0078] 이러한 실험 결과를 이용하면 2차 다항식은
- [0079] $\hat{y} = 3307.08 - 53.99X_1 - 17.04X_2 + 21.71X_3 - 1401.44L_1 + \dots - 31.46L_4 - 48.901L_3L_4$ 식 (7)
- [0080] 이 된다.
- [0081] 표 4는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하여 설계된 모델의 적합성 여부의 판단을 위해 표 1에 주어진 수식에 따라 수행된 분산분석의 결과이다.
- [0082] $F_0=20.01$ 은 $F(35, 53, 0.05)=0.1561$ 을 초과했기 때문에 모든 계수 β 가 0을 나타내는 무효의 가설은 기각된다. $R^2 = 0.892$ 과 $R_A^2 = 0.887$ 에서 총 변동 88.7%는 80% 이상이므로, 적합한 모델임이 식 (7)에 의하여 설명될 수 있다. 잔차 평균제곱에 의해 제공된 잔차 변동의 추정은 표 1의 수식에서 총 평균제곱을 분모로 하고, 잔차 평균제곱을 분자로 하여 얻은 것으로 11.3%이다.
- [0083] 표 3, 도 1 및 도 6을 참조하여, 본 발명에 따라 설계된 토크리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 및 회전자 모델의 적합성에 대해 해석 및 분석하기로 한다. 도 6은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 및 회전자 설계에 대한 종래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.
- [0084] 본 발명의 동기형 릴럭턴스 전동기는 집중권선형이고, 자속장벽의 수는 5개이다. 표 3에 나타난 것처럼, N=88에서 X_1 이 2.00mm, X_2 가 14.00mm, X_3 이 14.00mm이고, L_1 이 3.564mm, L_2 가 2.253mm, L_3 이 2.253mm, L_4 가 3.111mm 일 때, 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 리플은 60.79%가 된다
- [0085] 또한, N=22에서 X_1 이 2.00mm, X_2 가 14.00mm, X_3 이 14.00mm이고, L_1 이 3.564mm, L_2 가 1.653mm, L_3 이 2.253mm, L_4 가 3.033mm 일 때, 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크리플은 56.31%로서 최소가 된다.
- [0086] 결과적으로, 본 실시예에서 전동기의 고정자 및 회전자 설계 모델의 토크 리플(56.31%)은 24슬롯의 분포권선형 전동기 모델의 토크 리플(48.3%)에 상당히 근접하였다.
- [0087] 이러한 결과로부터, 슬롯의 깊이(X_2) 대 티스의 폭(X_3)의 비는 1 : 1.1~1.2 일 때 토크 리플의 저감에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 슬롯의 깊이(X_2) 대 슬롯의 오픈폭(X_1)의 비는 1 : 0.1~0.3 일 때, 토크 리플의 저감에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 종래의 6슬롯 집중권선형 동기형 릴럭턴스 전동기에서 X_1 이 10.9046mm, X_2 가 12.7605mm, X_3 이 16.3435mm 인 것과 구별되는 것이다.
- [0088] 한편, 토크 리플이 저감되는 모델에서 자속장벽이 5개인 경우, 회전자의 단부에 가장 가까운 자속장벽 5를 제외하고, 자속장벽 1의 폭 L_1 이 가장 크고, 자속장벽 4의 폭 L_4 가 그 다음이고, 그 다음에 나머지 L_2 , L_3 순으로 될 때 토크 리플의 저감에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, $(L_2, L_3) < L_4 < L_1$ 일 때, 토크 리플의 저감에 효과가 있었다. L_2 와 L_3 의 크기 순서는 토크 리플의 저감에 큰 영향이 없었다.
- [0089] L_1 과 L_2 의 비는 1:0.8~0.9 가 바람직하다. L_2 와 L_3 는 L_1 및 L_4 의 80% 이하인 것이 바람직하다.
- [0090] 종래의 전동기 모델의 경우, 복수의 자속장벽을 형성하는 경우 각각의 자속장벽의 폭은 동일하게 구성하는 것이 일반적이었다.
- [0091] 도 7은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 설계에 대한 종래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.
- [0092] 표 5는 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법에 의한 고정자 설계변수의 범위를 나타내고, 표 6은 표 5의 설계변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸다.

[0093] 여기서, X1: 슬롯 오픈폭, X2: 슬롯 깊이, X3: 티스 폭이 된다.

표 5

[0094] 고정자 설계변수의 범위

설계 변수	설계변수의 범위				
	-1.682	-1	0	1	1.682
X1(mm)	1.318	2.000	3.000	4.000	4.681
X2(mm)	12.659	13.000	13.500	14.000	14.34
X3(mm)	13.659	14.000	14.500	15.000	15.34

표 6

[0095] 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

		X1(mm)	X2(mm)	X3(mm)	T _{ripple} (%)
집중권선형	1	3.0	13.5	14.5	111.09
	2	4.681	13.5	14.5	111.31
6슬롯	3	3.0	13.5	15.341	109.80
	4	3.0	13.5	13.659	118.42
SynRM	5	4.0	13.0	14.0	113.05
	6	2.0	13.0	15.0	113.23
	7	2.0	14.0	14.0	123.82
	8	3.0	14.341	14.5	110.91
	9	3.0	12.659	14.5	111.10
	10	4.0	14.0	15.0	110.87
	11	1.318	13.5	14.5	128.11
	12	4.0	13.0	15.0	111.16
	13	2.0	13.0	14.0	123.78
	14	2.0	14.0	15.0	113.45
	15	4.0	14.0	14.0	113.28
총래의 24슬롯 분포권선형 SynRM		2.3	13.699	3.77	48.17

[0096] 표 6 및 도 7을 참조하여, 본 발명에 따라 설계된 토크리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 모델의 적합성에 대해 해석 및 분석하기로 한다.

[0097] 본 발명의 동기형 릴럭턴스 전동기는 집중권선형이고, 6개의 슬롯을 갖는다. 표 6에 나타난 것처럼, N=3에서 X1이 3.00mm, X2가 13.5mm, X3이 15.341mm 일 때, 토크 리플은 109.80%로서 최소가 된다.

[0098] 최적설계된 6슬롯 모델의 토크 리플은 총래의 24슬롯 분포권선형 전동기 모델의 토크 리플보다는 크지만, 총래의 6슬롯 집중권선형 동기형 릴럭턴스 전동기 모델에서 X1이 10.9046mm, X2가 12.7605mm, X3이 16.3435mm 일 때 토크 리플이 203.80%인 것보다 상당히 진전된 결과를 나타냈다.

[0099] 이러한 결과로부터, 슬롯의 깊이(X2) 대 티스의 폭(X3)의 비는 1 : 1.1~1.2 일 때, 그리고 슬롯의 깊이(X2) 대 슬롯의 오픈폭(X1)의 비는 1 : 0.1~0.3 일 때, 토크 리플의 저감에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

[0100] 도 8은 6슬롯 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계에 대한 총래의 모델과 본 발명에 따라 최적 설계된 모델의 비교 형상을 나타낸 도면이다.

[0101] 표 7은 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법에 의한 회전자 설계변수의 범위를 나타내고, 표 8은 표 7의 설계변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸다.

[0102] 여기서, L1은 자속 장벽 1의 폭, L2는 자속 장벽 2의 폭, L3는 자속 장벽 3의 폭, L4는 자속 장벽 4의 폭이 된다.

표 7

회전자 설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
L1(mm)	2.586	2.633	2.677	2.718	2.757
L2(mm)	1.534	1.653	1.87	2.253	2.382
L3(mm)	1.534	1.653	1.87	2.253	2.382
L4(mm)	2.553	2.596	2.633	2.674	2.711

표 8

중심합성계획법을 이용한 실험 결과

실험 횟수	설계변수				
	L1(mm)	L2(mm)	L3(mm)	L4(mm)	T _{ripple} (%)
1	2.633	2.253	2.253	2.674	83.2
2	2.677	1.870	1.870	2.633	72.3
3	2.677	1.870	1.870	2.633	72.3
4	2.718	1.653	1.653	2.674	68.5
5	2.757	1.870	1.870	2.633	63.8
6	2.718	2.253	2.253	2.674	71.0
7	2.633	1.653	1.653	2.674	79.5
8	2.677	1.534	1.870	2.633	69.7
...	...	...	...	...	...
23	2.718	1.653	2.253	2.596	72.1
24	2.677	1.870	1.870	2.633	72.3
25	2.718	2.253	1.653	2.674	70.2
26	2.677	1.870	1.870	2.633	72.3
27	2.718	1.653	1.653	2.596	69.1
28	2.633	2.253	1.653	2.674	81.8
29	2.677	1.870	1.870	2.711	80.4
30	2.677	1.870	1.870	2.553	75.1
31	2.718	2.253	2.253	2.596	74.4

[0105] 표 8 및 도 8을 참조하여, 본 발명에 따라 설계된 토크리플 저감을 위한 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 모델의 적합성에 대해 해석 및 분석하기로 한다.

[0106] 본 발명의 동기형 릴럭턴스 전동기는 집중권선형이고, 자속장벽의 수는 5개이다. 표 8에 나타난 것처럼, N=5에서 L1이 2.757mm, L2가 1.870mm, L3이 1.870mm, L4가 2.633mm 일 때, 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 리플은 63.8%로서 최소가 된다. 전동기의 회전자 설계 모델의 토크 리플(63.8%)은 24슬롯 분포권선형 전동기 모델의 토크 리플(48.3%)에 상당히 근접하였다.

[0107] 이러한 결과로부터, 자속장벽이 5개인 경우, 회전자의 단부에 가장 가까운 자속장벽 5를 제외하고, 자속장벽 1의 폭 L1이 가장 크고, 자속장벽 4의 폭 L4가 그 다음이고, 그 다음에 나머지 L2, L3 순으로 될 때 토크 리플의 저감에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, (L2, L3) < L4 < L1 일 때, 토크 리플의 저감에 효과가 있었다. L2와 L3는 L1 및 L4의 80% 이하인 것이 바람직하다. L2와 L3의 크기 순서는 토크 리플의 저감에 큰 영향이 없었다.

[0108] 종래의 전동기 모델의 경우, 복수의 자속장벽을 형성하는 경우 각각의 자속장벽의 폭은 동일하게 구성하는 것이 일반적이었다.

[0109] 또한, 자속장벽의 수가 4개인 모델에서, 회전자의 회전축공에 가까운 순으로 자속장벽 1, 자속장벽 2, 자속장벽 3, 자속장벽 4라 할 때, L1이 3.317mm, L2가 2.001mm, L3이 3.140mm 일 때, 토크 리플은 98.1%로서 최소가 되

었다.

[0110] 이러한 결과로부터도, 회전자의 단부에 가장 가까운 자속장벽 4를 제외하고, 자속장벽 1의 폭 L1이 가장 크고, 자속장벽 3의 폭 L3가 그 다음이고, 자속장벽 2의 폭 L2가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 즉, $L2 < L3 < L1$ 일 때, 토크 리플의 저감에 효과가 있었다. L2는 L1 및 L3의 80% 이하인 것이 바람직하다.

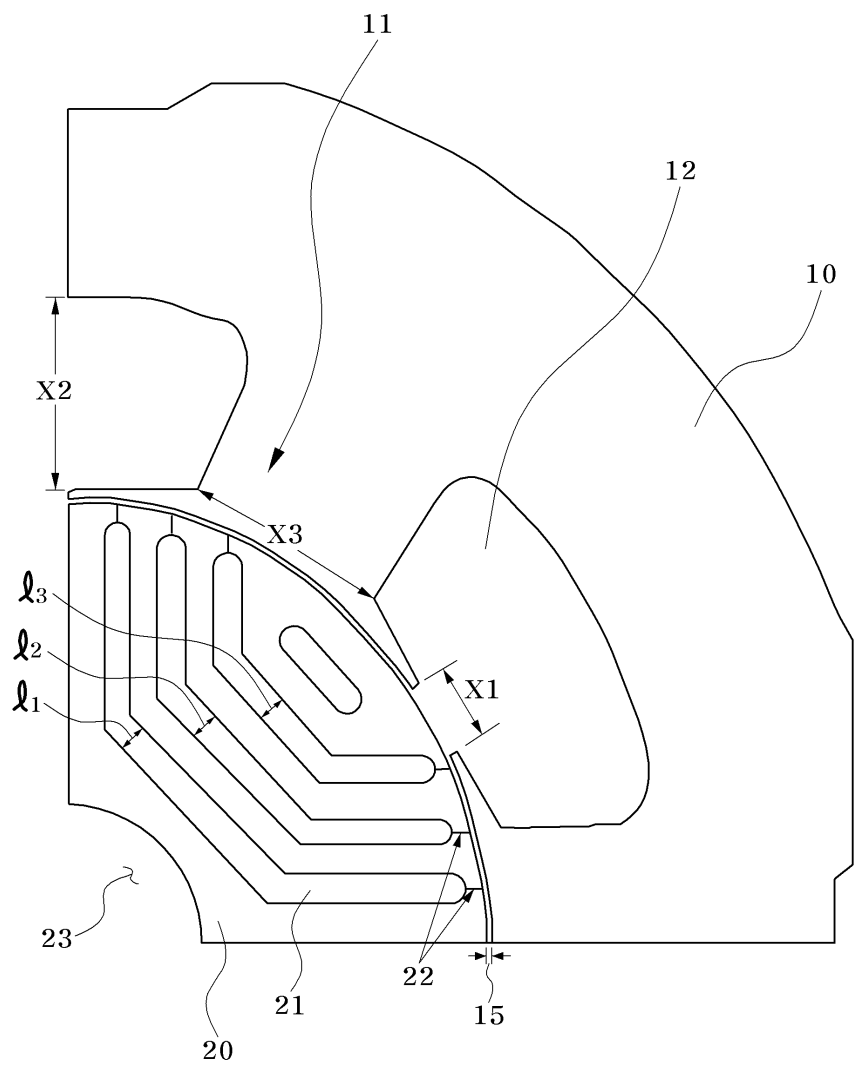
[0111] 본 발명은 집중권선형 전동기의 토크리플과 관련하여 고정자 또는 회전자의 설계변수를 기초로 CAD파일, 선처리 작업데이터를 설정하는 단계를 거쳐서, 반응표면법 중에서 중심합성계획법을 이용하여 설계변수의 범위와 실험 횟수를 설정하였다. 다음에, 유한요소해석(FEA)을 이용하여 토크리플 값을 계산하는 단계를 거쳐서, 토크리플이 가장 낮은 고정자 및 회전자의 설계변수를 제공하므로 생산비를 절감하고 전동기의 성능을 향상시킬 수 있다.

[0112] 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.

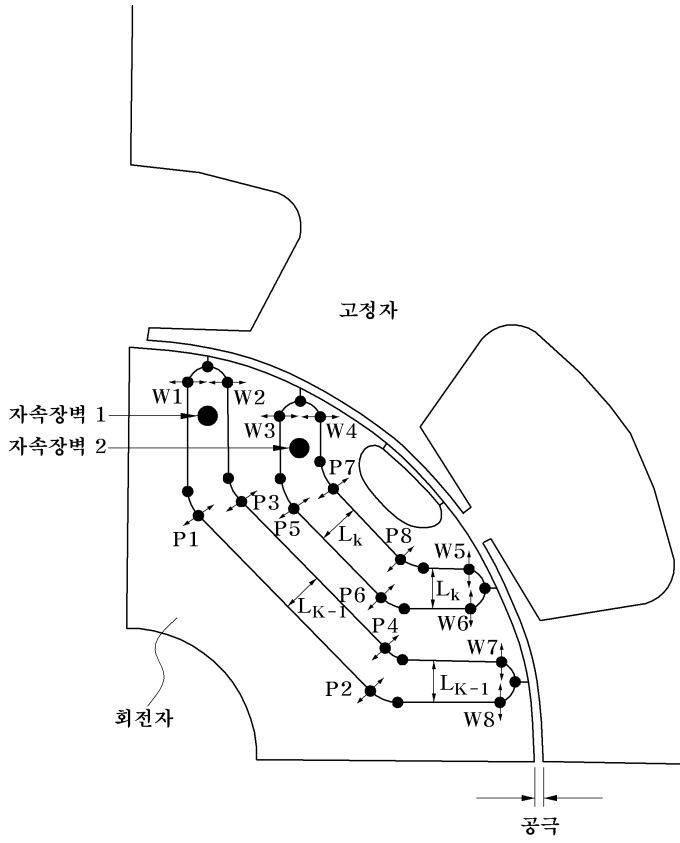
부호의 설명

[0113] 10 : 고정자
11 : 티스
12 : 슬롯
15 : 공극
20 : 회전자
21 : 자속장벽
22 : 립
23 : 회전축공

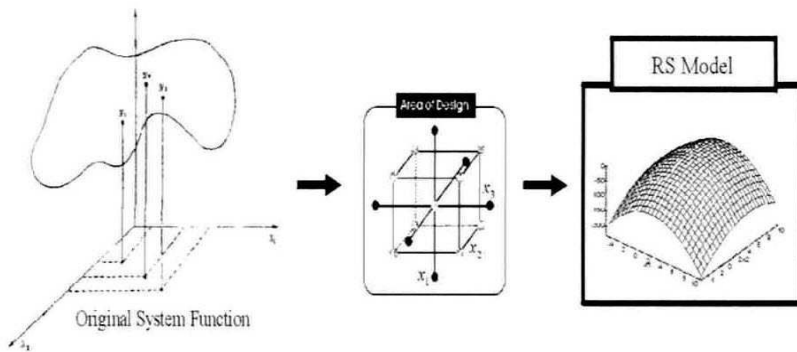
도면2



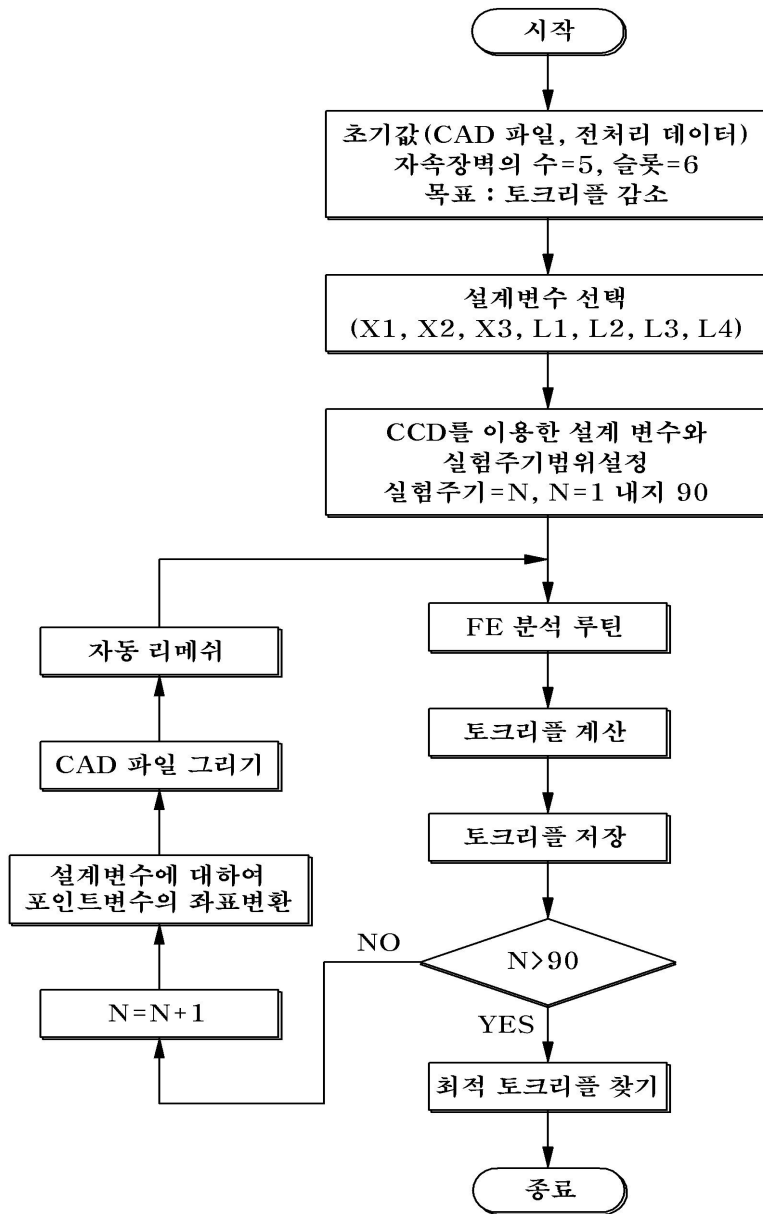
도면3



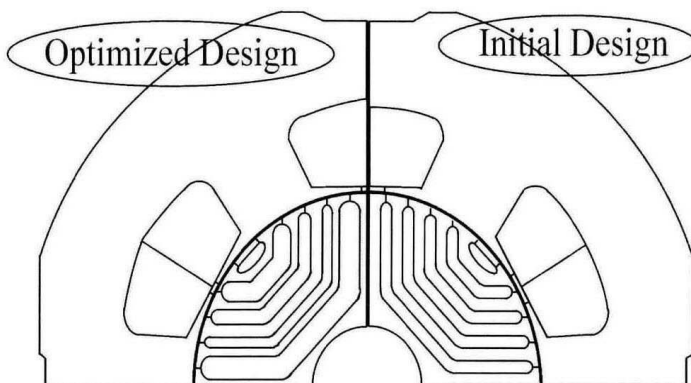
도면4



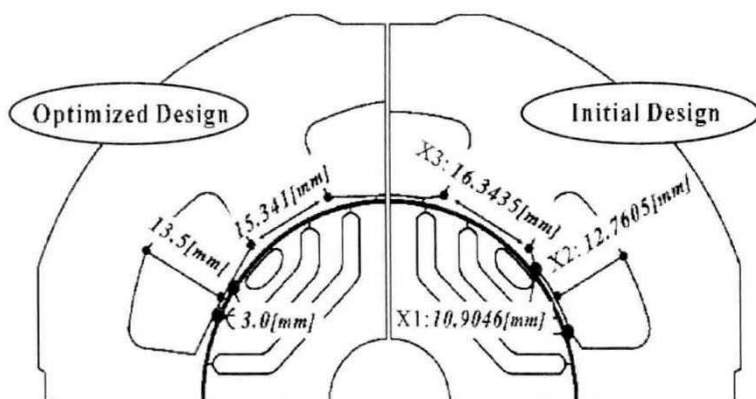
도면5



도면6



도면7



도면8

