



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년06월10일
(11) 등록번호 10-1273046
(24) 등록일자 2013년06월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G06F 17/50 (2006.01) H02K 15/02 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2012-0037541

(22) 출원일자 2012년04월10일

심사청구일자 2012년04월10일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020100080653 A*

반응표면법과 유한요소법을 이용한 플럭스 스위칭 전동기의 최대토크밀도와 최저토크리플을 위한 최적설계, 전기학회논문지 제59권 제3호(2010.3.)*

*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 3 항

심사관 : 안지현

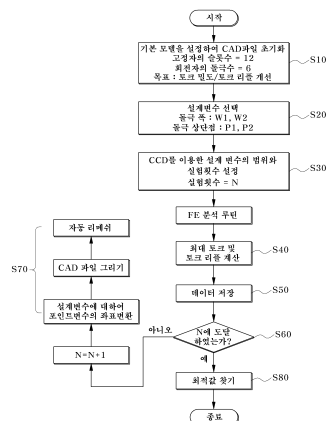
(54) 발명의 명칭 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법

(57) 요약

본 발명은 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법에 관한 것이다. 상기 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법은, 티스가 형성된 고정자와 돌극이 형성된 회전자를 갖는 플럭스 스위칭 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 돌극의 중심을 상기 티스의 중심과 정렬한 상태에서 상기 돌극의 중심선을 기준으로 좌측의 돌극 폭을 W1, 우측의 돌극 폭을 W2라 하고, 상기 W1과 상기 W2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 플럭스 스위칭 전동기의 토크 및 토크리플을 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 토크와 토크리플을 저장하는 단계; 를 포함한다.

이러한 구성에 따르면, 플럭스 스위칭 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계 방법을 제공할 수 있다.

대표도 - 도5



특허청구의 범위

청구항 1

삭제

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

청구항 9

삭제

청구항 10

플렉스 스위칭 전동기에 있어서,

원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 티스와, 인접하는 상기 티스 사이에 형성된 슬롯을 갖고 중앙에 수용영역이 형성된 고정자;

상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공이 형성되고, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 돌극이 형성된 회전자;

를 포함하고,

각각의 상기 돌극의 일측 상단부는 70 내지 110°의 모서리각을 형성하고, 타측 상단부는 라운드진 곡면을 형성하는 플렉스 스위칭 전동기.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 라운드진 곡면은 곡률반경이 5mm 이상인 플렉스 스위칭 전동기.

청구항 12

제10항 또는 제11항에 있어서,

상기 티스 수는 12개, 상기 돌극 수는 6개인 플럭스 스위칭 전동기.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 플럭스 스위칭 전동기(Flux switching motor; FSM)는 가장 최근에 등장하고 개발된 전동기로서 1999년 영국의 Leicester 대학의 Charles Pollock 교수에 의해 제안되었다. 플럭스 스위칭 전동기는 스위치드 릴럭턴스 전동기나 동기형 릴럭턴스 전동기와 같이 릴럭턴스 토크를 이용하고, 고정자 및 회전자의 구조면에서는 유사하나 제어회로 및 운전 알고리즘에서는 상당히 다른 면을 보이고 있다.

[0003] 현재 공기청정기 송풍기용 전동기로는 유도전동기나 브러시리스 영구자석 전동기(BLDC Motor) 등이 널리 사용되고 있으나, FSM은 공기청정기의 운전영역인 저속에서 브러시리스 영구자석 전동기와 동등의 고효율 특성을 가지면서도 제작의 용이성으로 대량생산이 가능하며 견고하고 간단한 구조를 갖기 때문에 저렴한 제조원가를 실현할 수 있는 장점이 있다.

[0004] 효율과 토크 리플 등의 문제는 전동기의 성능 평가에 매우 중요하다. 이러한 특성들은 전동기의 고정자와 회전자 형상에 의해 결정된다. 따라서, FSM의 성능을 개선할 수 있는 회전자의 형상 개발이 필요하고, 또한 이러한 FSM의 최적 설계를 가능하게 하는 FSM의 설계 방법이 요구된다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 한국 특허 공개 제10-2003-0029873호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 따라서, 본 발명은 상기 사정을 감안하여 발명한 것으로, 토크를 향상시키고 토크 리플을 감소시킬 수 있는 회전자 구조를 갖는 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계 방법을 제공하고자 함에 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 측면에 의하면, 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법은, 티스가 형성된 고정자와 돌극이 형성된 회전자를 갖는 플럭스 스위칭 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 돌극의 중심을 상기 티스의 중심과 정렬한 상태에서 상기 돌극의 중심선을 기준으로 좌측의 돌극 폭을 W1, 우측의 돌극 폭을 W2라 하고, 상기 W1과 상기 W2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 플럭스 스위칭 전동기의 토크 및 토크리플을 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 토크와 토크리플을 저장하는 단계; 를 포함한다.

[0008] 또한, 설정된 상기 실험횟수에 도달하면 토크 및 토크리플을 기초로 최적의 상기 설계변수의 값을 찾는 단계; 를 더 포함한다.

[0009] 또한, 상기 설계변수의 값을 찾는 단계에 의해 상기 W1과 상기 W2의 값이 결정되면, 결정된 상기 W1과 상기 W2 값에 따라 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 돌극의 중심을 상기 티스의 중심과 정렬한 상태에서 상기 돌극의 좌측 상단점을 P1, 우측 상단점을 P2라 하고, 상기 P1과 상기 P2의 좌표를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링 하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 P1과 상기 P2의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 P1과 상기 P2

의 값을 변화시키면서 플럭스 스위칭 전동기의 토크 및 토크리플을 계산하고, 상기 P1, P2 및 계산된 상기 토크와 토크리플을 저장하는 단계; 설정된 상기 실험횟수에 도달하면 계산된 토크 및 토크리플을 기초로 최적의 상기 P1과 상기 P2의 값을 찾는 단계; 를 포함하고, 상기 P1과 상기 P2는 상기 회전자의 원주 상을 움직이고, 상기 P1 또는 상기 P2가 이동하면 이동된 상기 P1 또는 상기 P2는 각각 상기 돌극의 측부와 호형으로 연결된다.

[0010] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 측면에 의하면, 플럭스 스위칭 전동기의 설계방법은, 티스가 형성된 고정자와 돌극이 형성된 회전자를 갖는 플럭스 스위칭 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화하는 단계; 상기 돌극의 중심을 상기 티스의 중심과 정렬한 상태에서 상기 돌극의 좌측 상단점을 P1, 우측 상단점을 P2라 하고, 상기 P1과 상기 P2의 좌표를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위해 설계 데이터를 모델링하는 단계; 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법을 이용하여 상기 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계; 유한요소해석 프로그램을 이용하여 상기 설계변수의 값을 변화시키면서 플럭스 스위칭 전동기의 토크 및 토크리플을 계산하고, 상기 설계변수 및 계산된 상기 토크와 토크리플을 저장하는 단계; 를 포함하고, 상기 P1과 상기 P2는 상기 회전자의 원주 상을 움직이고, 상기 P1 또는 상기 P2가 상기 기본 모델에서 이동하면 이동된 상기 P1 또는 상기 P2는 각각 상기 돌극의 측부와 호형으로 연결된다.

[0011] 또한, 설정된 상기 실험횟수에 도달하면 계산된 토크 및 토크리플을 기초로 최적의 상기 설계변수의 값을 찾는 단계; 를 더 포함한다.

[0012] 또한, 상기 기본 모델에서 상기 티스 수는 12개, 상기 돌극 수는 6개이다.

[0013] 또한, 상기 중심합성계획법에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해 분산분석을 이용한다.

[0014] 또한, 상기 분산분석에서 회귀선의 타당성은 결정계수(R^2)와 수정결정계수(R_A^2)에 의해 이루어진다.

[0015] 또한, 상기 설계변수의 값을 변화시킬 때 노드 수, 요소 수, 경계 조건은 변화하지 않는다.

[0016] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 측면에 의하면, 플럭스 스위칭 전동기는, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 티스와, 인접하는 상기 티스 사이에 형성된 슬롯을 갖고 중앙에 수용영역이 형성된 고정자; 상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공이 형성되고, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 돌극이 형성된 회전자; 를 포함하고, 각각의 상기 돌극의 일측 상단부는 70 내지 110°의 모서리각을 형성하고, 타측 상단부는 라운드진 곡면을 형성한다.

[0017] 또한, 상기 라운드진 곡면은 곡률반경이 5mm 이상이다.

발명의 효과

[0018] 본 발명에 따르면, 플럭스 스위칭 전동기의 설계변수를 결정하고, 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기 및 플럭스 스위칭 전동기의 설계 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 설계 방법을 설명하는 도면이다.

도 2는 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 회전자의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다.

도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 회전자의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다.

도 5는 본 발명의 다른 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 회전자의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다.

도 6은 기본 모델의 플럭스 스위칭 전동기의 형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다.

도 7은 본 발명의 전동기 설계 방법에 의해 돌극 폭이 최적화된 플럭스 스위칭 전동기의 형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다.

도 8은 본 발명의 전동기 설계 방법에 의해 돌극 폭 및 돌극 에지의 형상이 최적화된 플럭스 스위칭 전동기의

형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0020] 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.
- [0021] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 설계 방법을 설명하는 도면이다.
- [0022] 플럭스 스위칭 전동기(Flux switching motor; FSM)(또는 전동기)의 구조는 돌극형 회전자와 돌극 또는 비돌극 형태의 고정자로 이루어지고, 고정자 권선은 필드 권선(Field winding)과 아마추어 권선(Armature winding)으로 구성되어 있다.
- [0023] 필드 권선에는 일정한 직류 전류를 입력하고, 아마추어 권선에는 전자적 제어를 통해 듀티비에 따라 두 아마추어 권선 중 하나의 권선에만 직류를 흘린다는 특징이 있다. 또한, 저비용으로 대량 생산할 수 있으며, 전기적인 무정류 제어가 가능하고, 고수명, 매우 다양한 분야에 이용, 정밀한 토크, 속도, 위치 제어 등에 추가적인 비용이 들지 않는 장점이 있다.
- [0024] 플럭스 스위칭 전동기에서, 효율과 토크 리플 등의 문제는 전동기의 성능 평가에 매우 중요하다. 이러한 특성들은 전동기의 고정자와 회전자의 형상에 의해 결정되므로 수치적인 평가와 설계가 요구된다.
- [0025] 본 실시예에서, 플럭스 스위칭 전동기는 고정자(10)와 회전자(20)를 갖는다. 도 1은 플럭스 스위칭 전동기의 1/2 모델을 도시하고 있다.
- [0026] 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 12개의 슬롯(12)을 갖는 플럭스 스위칭 전동기를 도시하고 있고, 마찬가지로 티스(11)의 수도 12개가 된다. 도 1에 도시된 1/2 모델의 전동기에는 고정자(10)에 6개의 티스(11)와 슬롯(12)이 나타난다.
- [0027] 티스(11)는 폭이 일정하게 연장되다가 단부 근처에서 양측으로 폭이 넓어져서 뒤집혀진 T자 형태가 될 수 있다. 인접하는 티스(11) 사이에 형성되는 슬롯(12)도 입구는 폭이 좁지만 안쪽은 넓은 형태가 된다.
- [0028] 고정자(10)의 수용영역에는 회전자(20)가 수용되어 회전하게 된다. 회전자(20)의 중앙에는 회전축공(22)이 형성된다. 회전자(20)는 얇은 박편으로 이루어진 코어가 축방향으로 적층되어 형성될 수 있다.
- [0029] 회전자(20)에는 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 돌극(21)이 형성된다. 돌극(21)의 형상은 일정한 폭을 갖고 단부는 회전자(20)가 회전하는 가상의 원의 원주를 따라 약간 라운드지는 형태가 될 수 있다. 본 실시예는 6개의 돌극(21)을 갖는 플럭스 스위칭 전동기를 도시하고 있고, 도 1에 도시된 1/2 모델의 전동기에는 3개의 돌극(21)이 나타난다.
- [0030] 고정자(10)와 회전자(20)는 일정한 간격으로 이격되어, 그 사이에는 공극(25)이 존재하게 된다. 공극(25)은 작게 유지하는 것이 유리하지만, 제작상의 문제 등으로 한계가 있다. 공극(25)은 대체로 1mm 미만이 된다.
- [0031] 도 1에 도시된 1/2 모델의 전동기는 본 발명의 방법에 따라 플럭스 스위칭 전동기를 설계하기 위한 기본 모델이 될 수 있다. 여기서, 기본 모델은 회전자(20)의 형상을 변화시켜 토크 특성을 개선하기 위한 전동기 설계의 기초가 되는 모델이다.
- [0032] 도 1은 돌극(21)의 중심을 티스(11)의 중심과 정렬한 상태를 나타낸다. 돌극(21)의 중심과 티스(11)의 중심을 지나는 선을 중심선(ℓ)이라 한다.
- [0033] 돌극(21)의 중심선(ℓ)을 기준으로 좌측의 돌극 폭을 W1, 우측의 돌극 폭을 W2라 한다. 또한, 돌극(21)의 좌측 상단점을 P1, 우측 상단점을 P2라 한다. 여기서, W1, W2, P1, P2는 전동기를 설계하기 위한 설계변수가 된다.
- [0034] 따라서, 기본 모델을 기준으로 W1, W2, P1, P2를 변화시켜 회전자(20)의 돌극(21) 형상에 변화를 줌으로써 전동기의 토크 특성을 개선할 수 있다.
- [0035] W1, W2가 커지면 돌극(21)의 폭이 증가하는 것이고, W1, W2가 작아지면 돌극(21)의 폭이 줄어드는 것이다. P1,

P2는 회전자(20)가 회전하는 원주 상을 움직인다. P1 또는 P2가 기본 모델의 위치에서 원주 상에서 이동하게 되면, 이동된 P1 또는 P2는 돌극(21)의 측부와 부드러운 원호를 그리면서 호형으로 연결된다.

[0036] 이와 같이, W1, W2, P1, P2를 설계변수로 하여 이를 변화시키면서 중심합성법을 통한 유한요소해석에 의해 토크 및 토크 리플을 계산하게 된다. 일정한 실험횟수를 설정하고, 설정된 실험횟수에 도달하게 되면 가장 우수한 토크 특성을 나타낸 W1, W2, P1, P2 값을 판단하게 된다. 따라서, W1, W2, P1, P2 값을 기초로 전동기의 회전자(20)를 설계함으로써 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.

[0037] 이하에서는, 본 발명의 플럭스 스위칭 전동기 설계방법에서 사용되는 유한요소해석을 위한 반응표면법의 개념을 살펴보기로 한다.

[0038] 도 2는 반응표면법의 기본 개념을 도시하는 도면이다.

[0039] 반응표면법(Response Surface Methodology; RSM)은 설계변수와 응답 간의 관계를 찾아내고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적의 플럭스 스위칭 전동기의 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.

[0040] 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.

[0041]
$$y=f(X, \theta)$$
 식 (1)

[0042] 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.

[0043] 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.

[0044]
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$
 식 (2)

[0045] 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.

[0046]
$$y=X\beta + \epsilon$$
 식 (3)

[0047] 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.

[0048]
$$\hat{y} = Xb$$
 식 (4)

[0049] 본 발명의 유도전동기의 회전자 설계에 이용된 반응표면법(RSM)에는 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 발명에서는 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(central composite design : CCD)을 이용하였다.

[0050] 2^k 요인실험(2^k factorial experiments)은 각 변수의 2수준(평면)에서만 실험이 되므로 변수의 수준변화에 따라 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 식(2)의 이차 다항회귀모형에서 제곱항 x_j^2 의 계수 β_{jj} 등을 추정할 수 없다.

[0051] 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정하기 위하여 다음과 같이 중심점과 축점을 2^k 요인 실험에 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}		

[0053] 통계적인 근사방법인 반응표면법은 항상 오차를 포함하고 있고, 통계적인 근사방법인 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법에도 오차를 포함하고 있으므로, 설계한 후 추정된 근사함수의 오차 정도를 확인해야만 한다.

[0054] 본 발명에서는 추정된 근사함수의 오차정도를 확인하기 위해서 분산분석(Analysis of variance : ANOVA)을 이용하였으며, 표 1에서 n은 실험의 총계이고, k는 적합한 모델에 대한 설계변수의 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.

[0055] 잔차 제곱합을 SS_E 라 하고, 총 편차의 제곱합을 S_{yy} 라 할 때, 회귀 제곱합 SS_R = S_{yy} - SS_E 이다.

[0056]
$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

[0057] 여기서, y_i: 관측 값, $\hat{y}$: 예측 값, $\bar{y}$: 평균 값이다.

[0058] 결정계수 R² 은 S_{yy}와 SS_R로 식(5)과 같다.

[0059]
$$R^2 = SS_R / S_{yy} \quad \text{식 (5)}$$

[0060] 결정계수는 총변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다. R² 을 수정하기 위한 수정 결정계수는

[0061]
$$R_A^2 = 1 - (SS_E/(n-k-1))/(S_{yy}/(n-1)) \quad \text{식 (6)}$$

[0062] 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.

[0063] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 회전자(20)의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다.

[0064] 도 1 및 도 3을 참조하면, 먼저, 티스(11)가 형성된 고정자(10)와 돌극(21)이 형성된 회전자(20)를 갖는 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드(CAD) 파일을 초기화한다(S10). 여기서, 전동기의 고정자(10) 슬롯(11) 수는 12, 회전자(20)의 돌극(21) 수는 6으로 선택할 수 있다. 본 전동기 설계의 목표는 토크 밀도를 향상시키고 토크 리플을 최소화하는 플럭스 스위칭 전동기를 제공하는 것이다.

[0065] 다음에, 토크 향상을 위한 유한요소해석을 위해 회전자(20)의 설계변수를 채택한다. 돌극(21)의 중심을 티스(11)의 중심과 정렬한 상태에서, 좌측의 돌극 폭을 W1, 우측의 돌극 폭을 W2로 하고, 이는 전체 돌극(21)에 적용된다. W1, W2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위한 설계 데이터를 모델링한다(S20).

[0066] 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법(CCD)을 이용하여 상기 설계변수(W1, W2)

의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다(S30). 본 실시예에서 실험횟수(N)는 25로 설정했다.

[0067] 다음에, 전동기의 고정자와 회전자 설계를 위하여 개발 제작된 유한요소해석(FEA)을 위한 프로그램을 이용하여 상기 설계변수(W1, W2)의 값을 변화시키면서 최대 토크 및 토크 리플을 계산한다(S40). 상기 유한요소는 작은 격자 형태로 주어지고, 생성된 하나의 격자를 메쉬(mesh)라고 하며, 메쉬의 꼭지점을 이루는 점을 노드(node)라고 하고, 노드로 연결된 메쉬의 영역을 요소(element)라고 한다.

[0068] 다음에, 상기 설계변수(W1, W2) 및 유한요소해석으로부터 계산된 데이터를 저장하는 단계이다(S50).

[0069] 다음에, 실험횟수 N을 25로 설정하였을 때 실험횟수 N이 25에 도달하였는가? 를 체크하는 단계이다(S60). N이 25일 때에는 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 W1, W2를 고찰하며, N이 25보다 작을 때에는 N 값에서 1을 더하여 계속 루틴을 진행하도록 구성되어 있다.

[0070] N값에서 1을 더하여 최대 토크 및 토크 리플을 연산하기 위해 설계변수(W1, W2)의 변화에 따르는 변화된 고정자(10) 및 회전자(20) 형상을 해석할 때, 유한요소해석을 위하여 전처리 작업을 다수 수행해야 하는 어려움이 따른다.

[0071] 이러한 이유로, CAD 파일은 자동적으로 설계변수(W1, W2)의 변화에 대하여 다시 그려지도록 프로그램되어 있다. 다음으로 자동으로 메쉬 작업이 다시 이루어진다(remesh)(S70). 여기, 설계변수(W1, W2)의 x, y 좌표만이 변하고, 노드 수, 요소 수, 경계 조건 등은 변하지 않는다.

[0072] 이러한 자동 형상변화 프로그램은 본 발명의 설계 프로그램에 포함하여 프로그램을 설계하여 수행하므로 설계시간을 단축한다. 이러한 실험절차는 N=25까지 실행된다.

[0073] 다음에, 설정된 설계변수의 범위 및 실험횟수에 따라 유한요소해석을 통해 얻어진 데이터에 의해 반응표면의 모델을 형성하고 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 상기 설계변수(W1, W2)의 값을 찾는다(S80).

[0074] 이하의 표 2는 중심합성계획법을 이용하기 위한 설계변수(W1, W2)의 범위를 설정한 예를 나타낸다.

표 2

설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
W1(mm)	8.009	7.759	6.509	5.259	5.009
W2(mm)	5.009	5.259	6.509	7.759	8.009

[0076] 표 3은 설계변수(W1, W2)의 값을 변화시키면서 유한요소해석에 의해 계산된 최대 토크 및 토크 리플 값을 나타낸다.

표 3

중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	W1(mm)	W2(mm)	토크(Nm)	토크 리플(토크피크/토크평균)
1	6.509	6.509	0.097	4.437
2	6.509	7.759	0.100	4.403
3	6.509	8.009	0.102	4.392
...	...	...	...	...
9	5.259	5.259	0.1417	3.148
10	5.259	5.009	0.139	3.146
...	...	...	...	...
23	8.009	8.009	0.037	12.130
24	8.009	5.259	0.050	8.599
25	8.009	5.009	0.049	8.581

[0078] 상기 실험결과를 보면, W1, W2를 변화시키므로써 토크(최대 토크)와 토크 리플이 달라지게 된다. 전체 25회의 실험 중에서, 9회 때의 토크가 0.1417로 가장 높았고, 이때의 토크 리플은 3.148로서 매우 낮은 수준이었다.

이때, W1이 5.259, W2가 5.259 였다.

- [0079] 이러한 결과로부터, W1, W2의 최적값은 5.259가 된다. 이러한 설계 방법에 의해 돌극(21)의 폭을 조절함으로써 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.
- [0080] 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 플럭스 스위칭 전동기의 회전자의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다. 본 설계 방법에서는 설계변수를 설정하는 방법이 도 3과 차이가 있고, 다른 단계는 대체로 유사하므로 상세한 설명은 생략하기로 한다.
- [0081] 도 1 및 도 4를 참조하면, 먼저, 회전자(20)를 갖는 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화한다(S10).
- [0082] 다음에, 토크 향상을 위한 유한요소해석을 위해 회전자(20)의 설계변수를 채택한다. 돌극(21)의 중심을 티스(11)의 중심과 정렬한 상태에서, 돌극(21)의 좌측 상단점을 P1, 우측 상단점을 P2로 하고, 이는 돌극(21) 모두에 적용된다. 여기서, 돌극(21)의 좌측 상단점은 회전자(20)가 회전하는 원주 상에서 가장 좌측에 있는 점을 말하고, 우측 상단점은 원주 상에서 가장 우측에 있는 점을 말한다. 이와 같이, P1, P2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위한 설계 데이터를 모델링한다(S20).
- [0083] P1, P2는 회전자(20)가 회전하는 원주 상을 움직인다. P1 또는 P2가 기본 모델의 위치에서 원주 상에서 이동하게 되면, 이동된 P1 또는 P2는 돌극(21)의 측부와 부드러운 원호를 그리면서 호형으로 연결된다.
- [0084] 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법(CCD)을 이용하여 상기 설계변수(P1, P2)의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다(S30). 본 실시예에서 실험횟수(N)는 25로 설정했다.
- [0085] 다음에, 유도전동기의 고정자와 회전자 설계를 위하여 개발 제작된 유한요소해석(FEA)을 위한 프로그램을 이용하여 상기 설계변수(P1, P2)의 값을 변화시키면서 최대 토크 및 토크 리플을 계산한다(S40).
- [0086] 다음에, 상기 설계변수(P1, P2) 및 유한요소해석으로부터 계산된 데이터를 저장하는 단계이다(S50).
- [0087] 다음에, 실험횟수 N을 25로 설정하였을 때 실험횟수 N이 25에 도달하였는가? 를 체크하는 단계이다(S60). N이 25일 때에는 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 P1, P2를 고찰하며, N이 25보다 작을 때에는 N 값에서 1을 더하여 계속 루틴을 진행하도록 구성되어 있다.
- [0088] N값에서 1을 더하여 최대 토크 및 토크 리플을 연산하기 위해 설계변수(W1, W2)의 변화에 따르는 변화된 고정자(10) 및 회전자(20) 형상을 해석할 때, CAD 파일은 자동으로 설계변수(P1, P2)의 변화에 대하여 다시 그려지도록 프로그램되어 있다. 다음으로 자동으로 메쉬 작업이 다시 이루어진다(S70). 여기, 설계변수(P1, P2)의 x, y 좌표만이 변하고, 노드 수, 요소 수, 경계 조건 등은 변하지 않는다. 이러한 실험절차는 N=25까지 실행된다.
- [0089] 다음에, 설정된 설계변수의 범위 및 실험횟수에 따라 유한요소해석을 통해 얻어진 데이터에 의해 반응표면의 모델을 형성하고 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 상기 설계변수(P1, P2)의 값을 찾는다(S80).
- [0090] 이하의 표 4는 중심합성계획법을 이용하기 위한 설계변수(P1, P2)의 범위를 설정한 예를 나타낸다.

표 4

- [0091] 설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 범위				
	-4.2426	-3	0	3	4.2426
P1(mm)	-9.502	-8.259	-5.259	-2.259	1.017
P2(mm)	1.017	2.259	5.259	8.259	9.502

- [0092] 표 5는 설계변수(P1, P2)의 값을 변화시키면서 유한요소해석에 의해 계산된 최대 토크 및 토크 리플 값을 나타낸다.

표 5

[0093]

중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	P1(mm)	P2(mm)	토크(Nm)	토크 리플(토크피크/토크평균)
1	3.0	3.0	0.135	3.531
2	4.2456	0	0.108	4.402
3	3.0	-3.0	0.129	3.817
...	...	...	...	...
10	0	-4.2456	0.140	2.944
11	-4.2456	0	0.025	17.05
...	...	...	...	...
23	0	4.2456	0.143	3.413
24	-3	-3	0.074	5.145
25	-3	3	0.067	6.921

[0094] 상기 실험에서, P1이 3.0이라는 의미는 P1이 기본 모델의 위치에서 우측으로 3.0만큼 원주 상에서 이동했다는 것을 의미하고, P1이 -3.0이라는 의미는 P1이 기본 모델의 위치에서 좌측으로 3.0만큼 원주 상에서 이동했다는 것을 의미한다.

[0095] 상기 실험결과를 보면, P1, P2를 변화시킴으로써 토크(최대 토크)와 토크 리플이 달라지게 된다. 전체 25회의 실험 중에서, 10회 때의 토크가 0.140로 가장 높은 수준이고, 이때의 토크 리플은 2.944로 가장 낮았다. 이때, P1이 0, P2가 -4.2456 이었다.

[0096] 이러한 결과로부터, 토크와 토크 리플을 기초로 최적인 P1, P2 값을 찾으면 P1은 0, P2는 -4.2456이 된다. 이러한 설계 방법에 의해 돌극(21)의 상단점의 위치를 조절함으로써 토크 특성이 개선된 플렉스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.

[0097] 도 5는 본 발명의 다른 실시예에 따른 플렉스 스위칭 전동기의 회전자의 설계변수를 기초로 토크 특성을 개선하기 위한 설계 방법의 흐름도를 나타낸 것이다. 본 설계 방법에서는 설계변수를 설정하는 방법이 도 3 및 도 4와 차이가 있고, 다른 단계는 대체로 유사하므로 상세한 설명은 생략하기로 한다. 본 설계 방법은 도 3의 방법에 의해 설계변수 W1, W2를 결정한 후, 결정된 W1, W2에 의해 기본 모델을 변경하고, 변경된 기본 모델에서 다시 설계 변수로 P1, P2를 선택하여 루틴을 반복하여 최적의 P1, P2 값을 찾는 방법이다.

[0098] 도 1 및 도 5를 참조하면, 먼저, 회전자(20)를 갖는 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화한다(S10).

[0099] 다음에, 토크 향상을 위한 유한요소해석을 위해 회전자(20)의 설계변수를 채택한다. 돌극(21)의 중심을 티스(11)의 중심과 정렬한 상태에서, 좌측의 돌극 폭을 W1, 우측의 돌극 폭을 W2로 하고, 이는 전체 돌극(21)에 적용된다. W1, W2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위한 설계 데이터를 모델링한다(S20).

[0100] 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법(CCD)을 이용하여 상기 설계변수(W1, W2)의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다(S30). 본 실시예에서 실험횟수(N)는 25로 설정했다.

[0101] 다음에, 유도전동기의 고정자와 회전자 설계를 위하여 개발 제작된 유한요소해석(FEA)을 위한 프로그램을 이용하여 상기 설계변수(W1, W2)의 값을 변화시키면서 최대 토크 및 토크 리플을 계산한다(S40).

[0102] 다음에, 상기 설계변수(W1, W2) 및 유한요소해석으로부터 계산된 데이터를 저장하는 단계이다(S50).

[0103] 다음에, 실험횟수 N을 25로 설정하였을 때 실험횟수 N이 25에 도달하였는가? 를 체크하는 단계이다(S60). N이 25일 때에는 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 W1, W2를 고찰하며(S80), N이 25보다 작을 때에는 N 값에서 1을 더하여 계속 루틴을 진행한다(S70).

[0104] 최적의 W1, W2 값이 결정되면, 결정된 W1, W2를 기초로 기본 모델을 설정하고 설계변수로서 P1, P2를 선택하여 다시 S10에서 S80까지를 단계를 반복한다.

[0105] 즉, 결정된 W1, W2를 기초로 전동기의 기본 모델을 설정하여 캐드 파일을 초기화한다(S10).

[0106] 다음에, 토크 향상을 위한 유한요소해석을 위해 회전자(20)의 설계변수를 채택한다. 돌극(21)의 중심을 티스(11)의 중심과 정렬한 상태에서, 돌극(21)의 좌측 상단점을 P1, 우측 상단점을 P2로 하고, 이는 돌극(21) 모두에 적용된다. 이와 같이, P1, P2를 설계변수로 채택하여 유한요소해석을 위한 설계 데이터를 모델링한다(S20).

- [0107] 다음에, 반응표면법의 많은 실험적인 설계방법 중에서 중심합성계획법(CCD)을 이용하여 상기 설계변수(P1, P2)의 범위와 실험횟수를 설정하는 단계이다(S30). 본 실시예에서 실험횟수(N)는 25로 설정했다.
- [0108] 다음에, 유한요소해석(FEA)을 위한 프로그램을 이용하여 상기 설계변수(P1, P2)의 값을 변화시키면서 최대 토크 및 토크 리플을 계산한다(S40).
- [0109] 다음에, 상기 설계변수(P1, P2) 및 유한요소해석으로부터 계산된 데이터를 저장하는 단계이다(S50).
- [0110] 다음에, 실험횟수 N을 25로 설정하였을 때 실험횟수 N이 25에 도달하였는가? 를 체크하는 단계이다(S60). N이 25일 때에는 최대 토크 및 토크 리플로부터 최적의 P1, P2를 고찰하며(S80), N이 25보다 작을 때에는 N 값에서 1을 더하여 계속 루틴을 진행한다(S70).
- [0111] 이러한 방법에 따르면, 먼저 설계변수로서 W1, W2를 채택하여 최적의 W1, W2 값을 찾는다. 다음에, 결정된 W1, W2를 기초로 기본 모델을 수정하고, 다시 설계변수로서 P1, P2를 채택하여 최적의 P1, P2 값을 찾는다. 이와 같이 함으로써, 전동기의 회전자의 형상을 최적화하여 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.
- [0112] 이하에서는, 본 발명의 전동기 설계 방법에 따라 설계된 전동기의 형상 및 토크 특성을 도면을 참조하여 설명하기로 한다. 도 6은 기본 모델의 플럭스 스위칭 전동기의 형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다. 도 7은 본 발명의 전동기 설계 방법에 의해 돌극 폭이 최적화된 플럭스 스위칭 전동기의 형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다. 도 8은 본 발명의 전동기 설계 방법에 의해 돌극 폭 및 돌극 에지의 형상이 최적화된 플럭스 스위칭 전동기의 형상 및 토크 특성을 도시하는 도면이다. 도 6 내지 도 8에서 대응되는 부분의 도면부호는 동일하게 표시하였다.
- [0113] 먼저, 도 6을 참조하면, 돌극(21)의 중심과 티스(11)의 중심을 정렬한 상태에서 돌극(21)의 폭은 중간 티스(11)를 지나 다음의 티스(11)까지 연장되고 있다. 토크 특성은 토크가 불규칙적이고 편차가 심한 형태를 나타내고 있다.
- [0114] 다음으로, 도 7을 참조하면, 돌극(21)의 폭은 최적화되어 기본 모델보다 약간 줄어든 상태를 나타내고 있다. 이때, 돌극(21)의 폭은 중간 티스(11)를 지나지만 다음의 티스(11)까지 연장되지는 않고 있다. 토크 특성은 상당히 안정되었고 편차도 많이 줄어든 상태를 나타낸다.
- [0115] 다음으로, 도 8을 참조하면, 돌극(21)의 폭 및 에지의 형상이 최적화되었다. 이때의 돌극(21) 폭은 도 7에 도시된 돌극(21)의 폭에 기초하고 있지만, 돌극(21)의 상단부의 형상이 변형되었다. 돌극(21)의 좌측 상단점 P1은 도 7과 같지만, 우측 상단점은 원주 상에서 좌측으로 이동되고, 이동된 P2는 돌극(21)의 측부와 부드럽게 호형으로 연결되고 있다. 이는 나머지 돌극(21)에서도 동일하다. 이러한 형상의 회전자에서, 최대 토크는 커졌고 토크의 편차도 상당히 줄어들었다.
- [0116] 이와 같이, 본 발명의 전동기 설계 방법에 의해서 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.
- [0117] 도 8에 도시된 바와 같이, 이러한 플럭스 하우스형 전동기는 고정자(10)와 회전자(20)를 갖는다. 고정자(10)는 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 티스(11)와, 인접하는 티스(11) 사이에 형성된 슬롯(12)을 갖고 중앙에 수용영역이 형성된다. 회전자(20)는 상기 수용영역에 수용되며 중앙에 회전축공(22)이 형성되고, 원주방향을 따라 방사상으로 돌출된 복수의 돌극(21)을 갖는다. 고정자(10)의 티스(11) 수는 12개, 회전자(20)의 돌극(21) 수는 6개일 수 있다.
- [0118] 각각의 돌극(21)의 일측 상단부, 즉 도 8에서 좌측 상단부는 P1 점에서 70 내지 110°의 모서리각을 형성한다. 바람직하게는, 돌극(21)의 좌측 상단부는 P1 점에서 80 내지 100°의 모서리각을 형성한다. 도면에서는, 돌극(21)의 좌측 상단부가 대략 90°의 모서리각을 형성하고 있다.
- [0119] 한편, 돌극(21)의 타측 상단부는 라운드진 곡면을 형성한다. 이는 회전자(20)의 원주 상을 움직이는 돌극(21)의 우측 상단점 P2가 P1에 비해 돌극(21)의 중심에 가까워지는 방향으로 이동하고, P2는 돌극(21)의 측부와 호형으로 연결됨으로써 가능해진다. 상기 라운드진 곡면은 곡률반경이 5mm 이상인 것이 바람직하다. 예를 들어, 상기 라운드진 곡면은 전동기의 크기에 따라 곡률반경이 5 내지 20mm 일 수 있다.
- [0120] 플럭스 스위칭 전동기가 이러한 회전자 형상을 가짐으로써, 상기 표5의 결과에 나타난 것처럼 최대 토크가

크고, 토크 리플이 낮은 우수한 토크 특성을 가질 수 있다.

[0121] 상술한 바와 같이, 본 발명은 플럭스 스위칭 전동기의 토크 특성과 관련하여 기본 모델을 설정하고, 회전자의 설계변수($W1$, $W2$, $P1$, $P2$)를 채택하여 설계 데이터를 모델링하는 단계를 거쳐서, 반응표면법 중에서 중심합성계획법을 이용하여 설계변수의 범위와 실험횟수를 설정하였다. 다음에, 유한요소해석(FEA)을 이용하여 토크 및 토크 리플을 계산하는 단계를 거쳐서 토크특성이 가장 우수한 회전자의 설계변수($W1$, $W2$, $P1$, $P2$) 값을 제공함으로써, 플럭스 스위칭 전동기의 최적 설계에 따라 전동기의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 이러한 회전자 형상을 가짐으로써 토크 특성이 개선된 플럭스 스위칭 전동기를 제공할 수 있다.

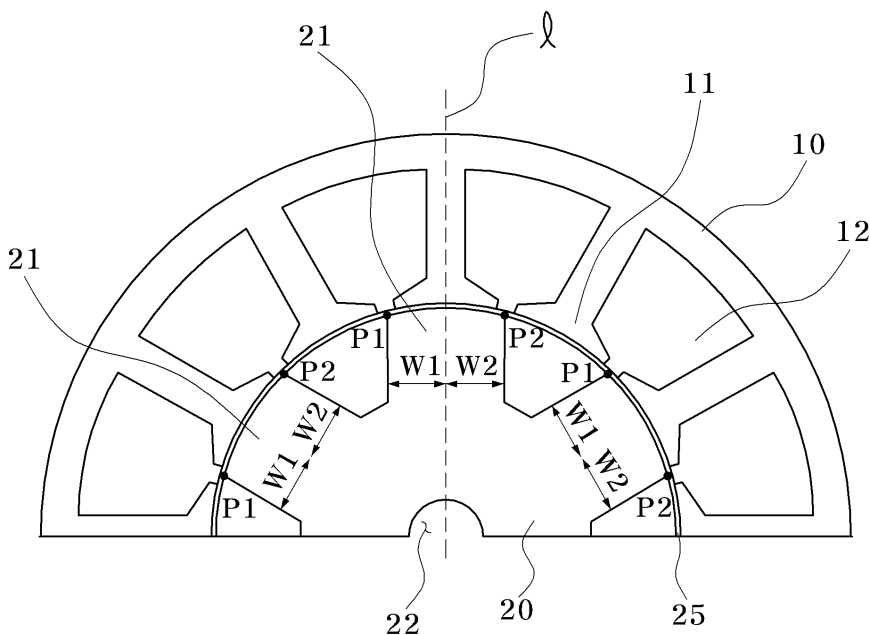
[0122] 본 발명은 상기 실시예에 한정되지 않고 본 발명의 기술적 요지를 벗어나지 아니하는 범위 내에서 다양하게 수정 또는 변형되어 실시될 수 있음은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 있어서 자명한 것이다.

부호의 설명

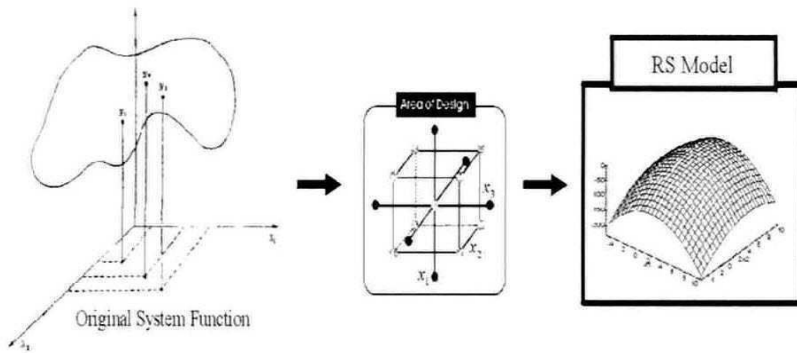
- [0123] 10 : 고정자
11 : 티스
12 : 슬롯
20 : 회전자
21 : 돌극
22 : 회전축공
25 : 공극
 ℓ : 중심선

도면

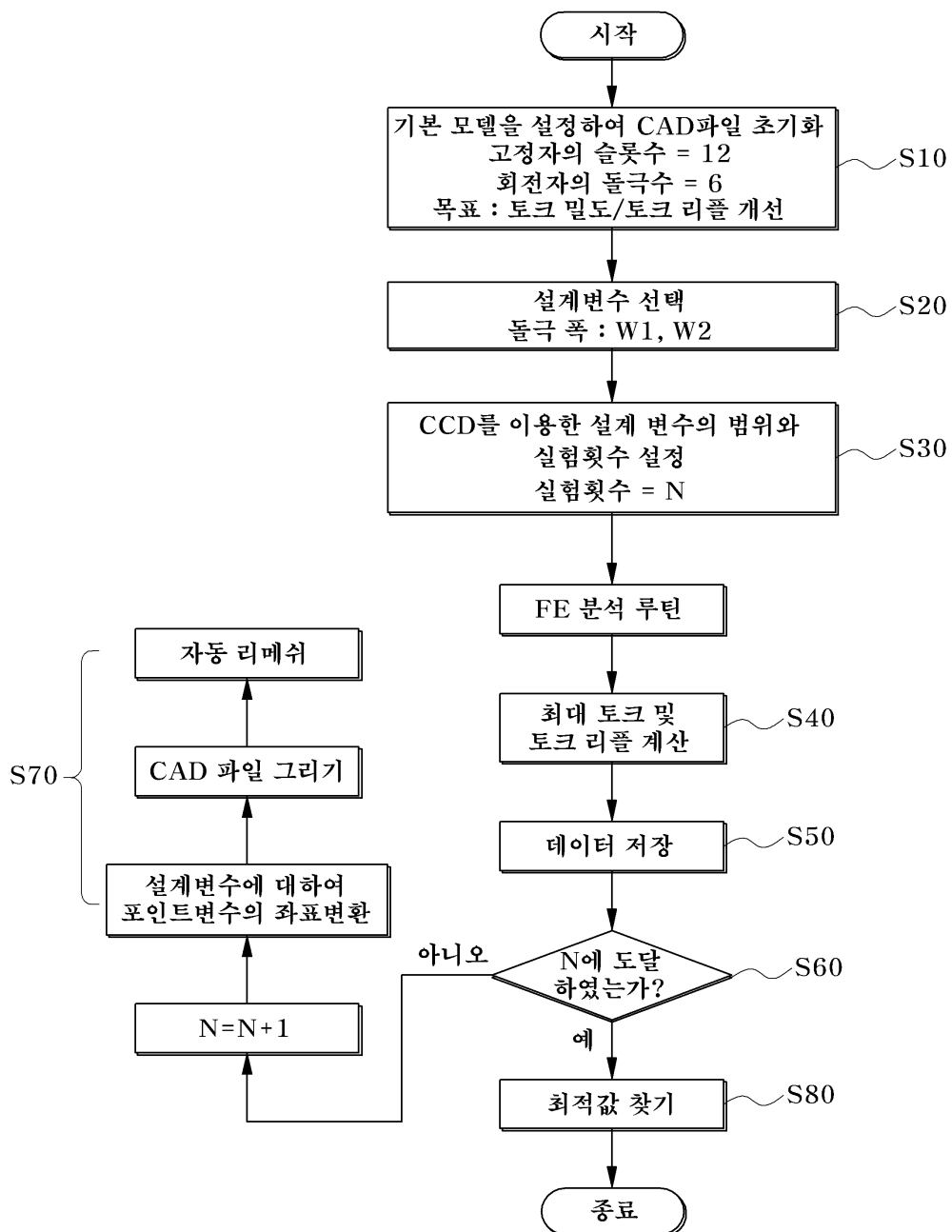
도면1



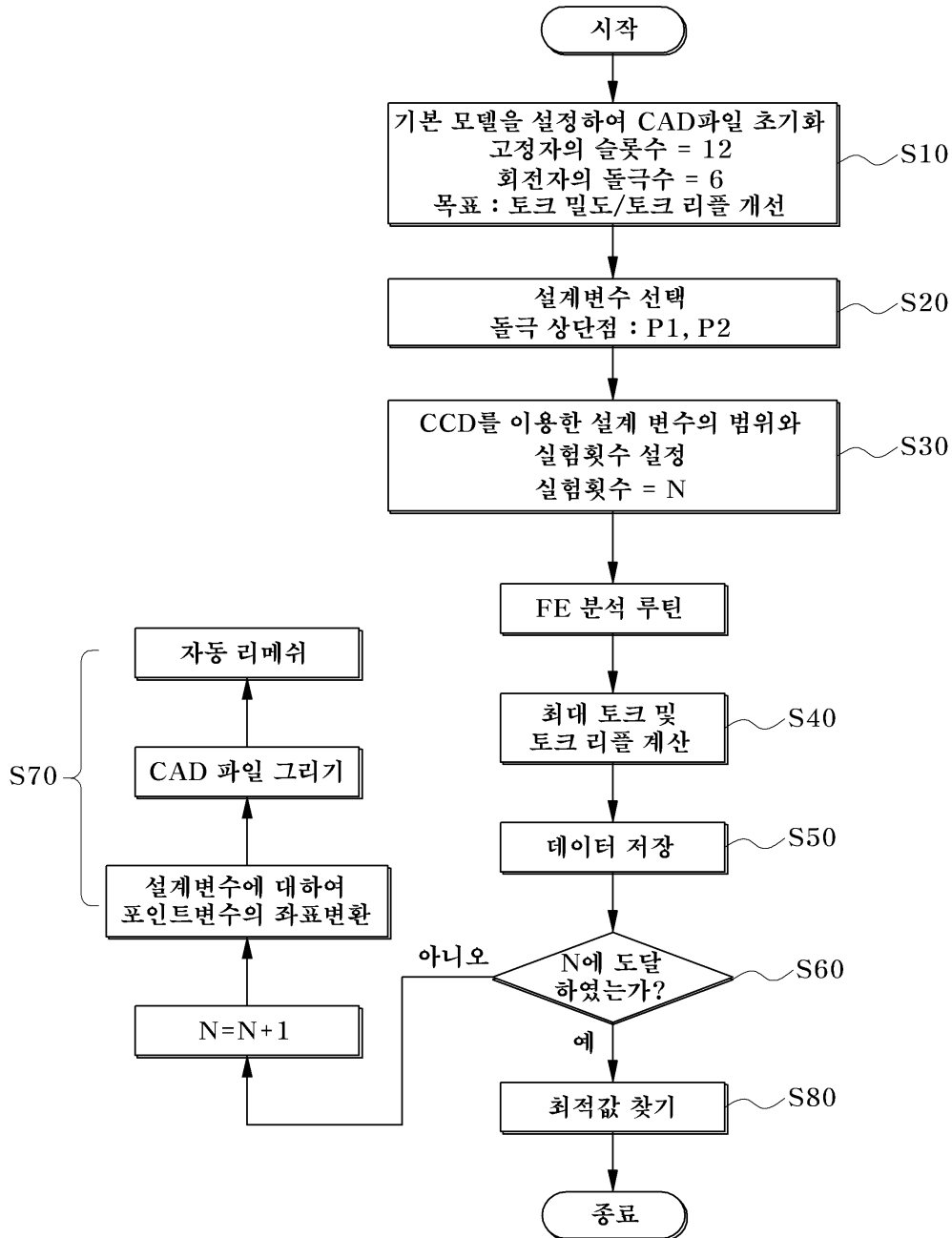
도면2



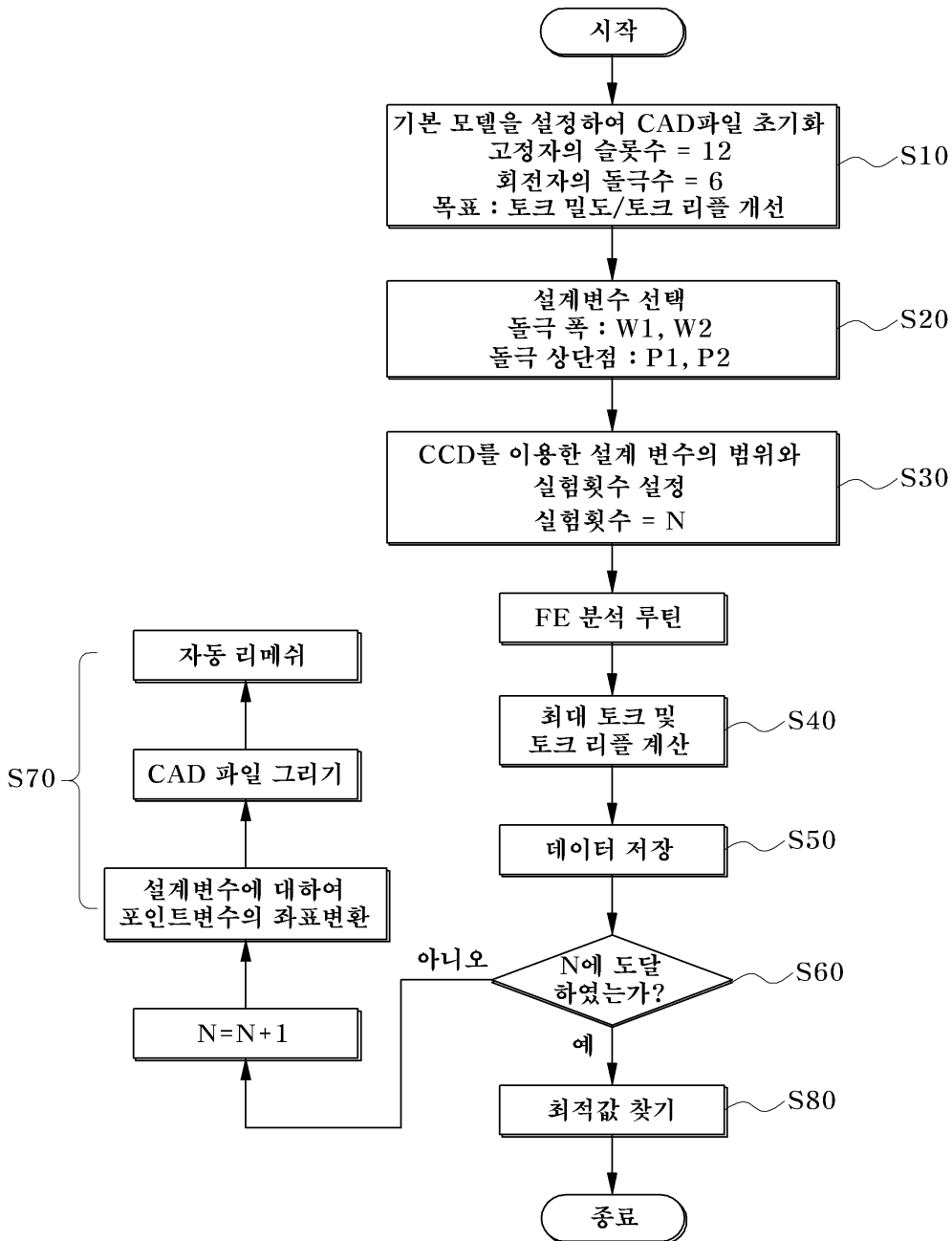
도면3



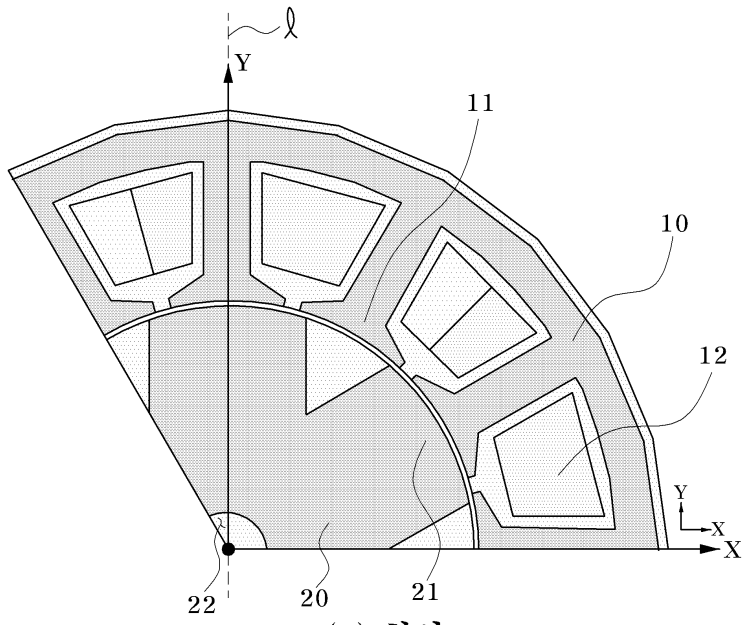
도면4



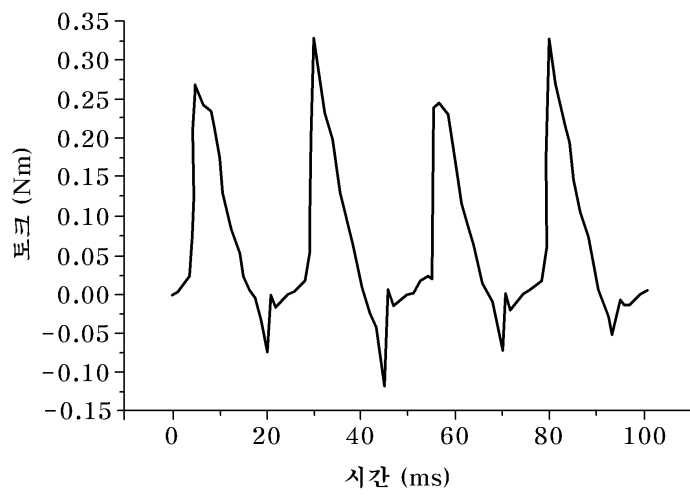
도면5



도면6

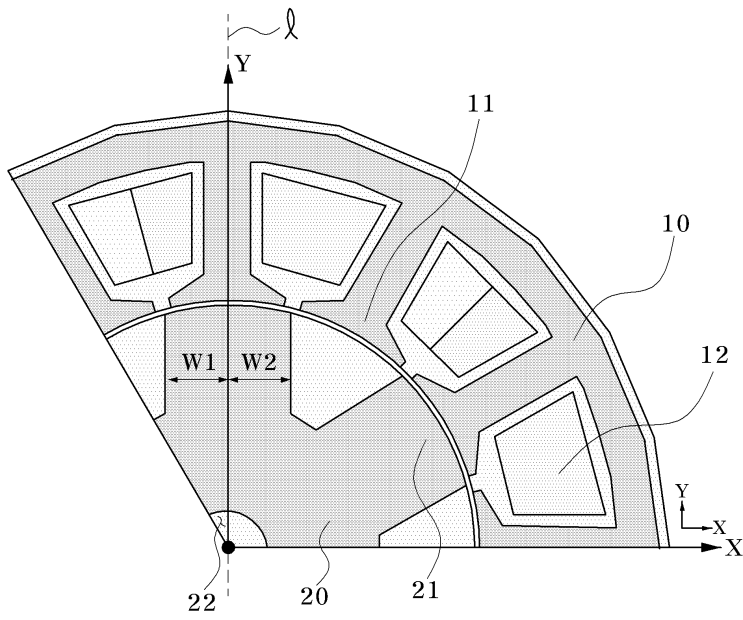


(a) 형상

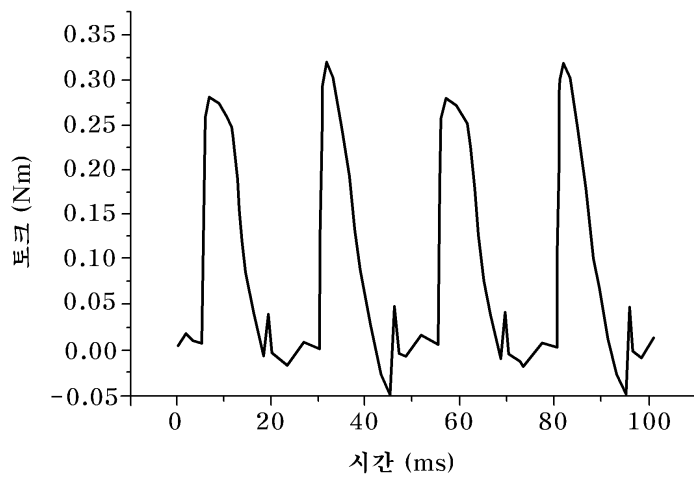


(b) 토크 특성

도면7

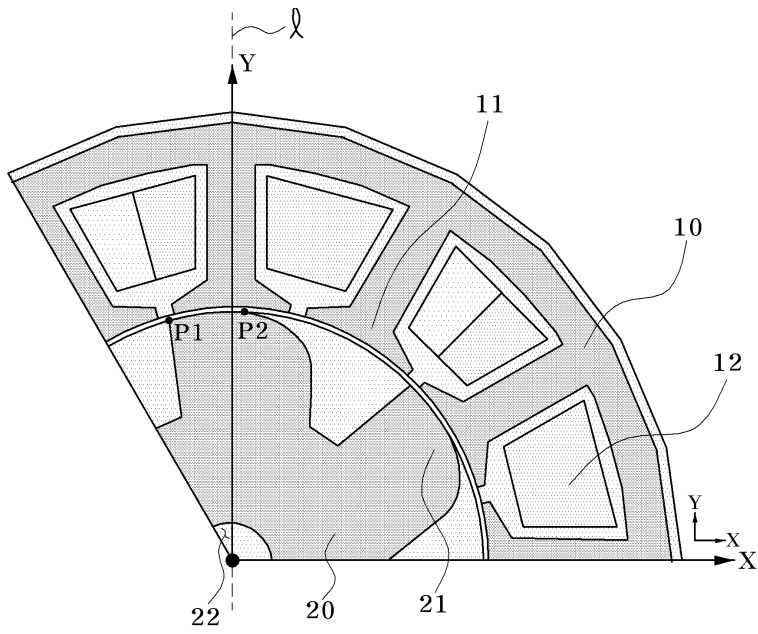


(a) 형상

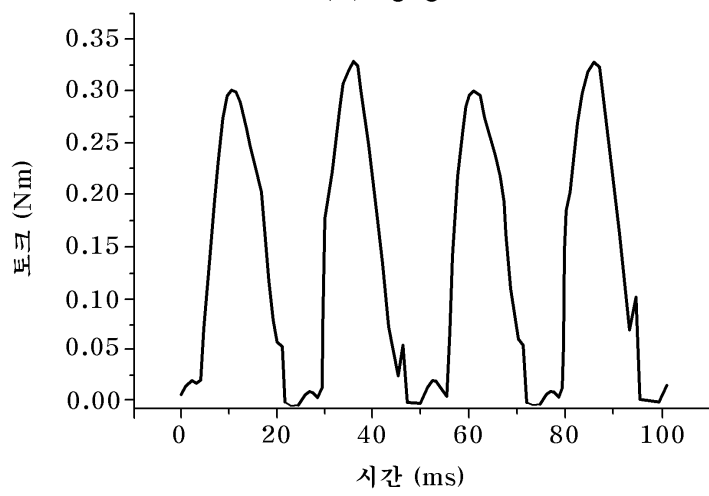


(b) 토크 특성

도면8



(a) 형상



(b) 토크 특성