



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년05월14일
(11) 등록번호 10-1394551
(24) 등록일자 2014년05월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/34 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0021429
(22) 출원일자 2013년02월27일
심사청구일자 2013년02월27일
(56) 선행기술조사문헌
JP11235099 A*
JP2012196020 A*
KR1020130118422 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌
기술이전 희망 : 기술양도

(73) 특허권자
창원대학교 산학협력단
경상남도 창원시 의창구 창원대학교 20 (퇴촌동)
(72) 발명자
김규탁
경상남도 창원시 성산구 삼정자로 79, 105동 302호 (성주동, 유니온빌리지아파트)
조규원
경상남도 창원시 의창구 외동반림로254번길 28 (용호동)
(74) 대리인
이형석, 김종선

전체 청구항 수 : 총 7 항

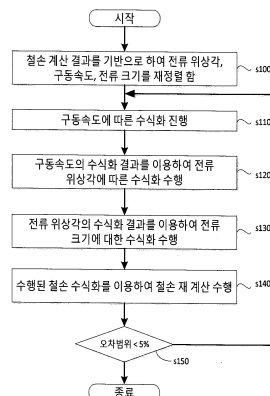
심사관 : 박근용

(54) 발명의 명칭 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법

(57) 요약

본 발명은 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법에 관한 것이다. 이를 위해 본 발명은 전류크기, 전류 위상각 별 구동속도에 따른 철손 계산 결과를 전류 위상각, 구동속도 및 전류 크기의 변수 값으로 재정렬하는 단계, 상기 재정렬된 변수 값 중 구동 속도에 따른 철손 수식화를 진행하는 구동속도 수식화 단계, 상기 구동속도 수식화 단계에 따라 2차 함수로 정의된 철손을 전류 위상각에 따른 수식화를 진행하는 전류 위상각 수식화 단계, 상기 전류 위상각 수식화 단계에 대한 계수를 전류 크기에 따른 함수로 표현하여 수식화를 진행하는 전류 크기 수식화 단계, 상기 수식화된 구동속도 수식화, 전류 위상각 수식화 및 전류 크기 수식화를 이용하여 철손을 재계산하는 단계를 포함한다. 이와 같은 본 발명에 따르면, 전류 크기, 전류 위상각, 구동속도가 변화와 상관없이 변수의 입력만으로 철손 값을 계산할 수 있어 종래보다 계산 시간을 단축할 수 있는 이점이 있다.

대표도 - 도5



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2012-0262-0000

부처명 교육과학기술부

연구사업명 산업단지캠퍼스조성사업

연구과제명 신재생 에너지원 전장시스템 최적설계 프로세서 개발

기 여 율 1/1

주관기관 창원대학교 산학협력단

연구기간 2012.07.01 ~ 2013.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

전류크기, 전류 위상각 별 구동속도에 따른 철손 계산 결과를 전류 위상각, 구동속도 및 전류 크기의 변수 값으로 재정렬하는 단계;

상기 재정렬된 변수 값 중 구동 속도에 따른 철손 수식화를 진행하는 구동속도 수식화 단계;

상기 구동속도 수식화 단계에 따라 2차 함수로 정의된 철손을 전류 위상각에 따른 수식화를 진행하는 전류 위상각 수식화 단계;

상기 전류 위상각 수식화 단계에 대한 계수를 전류 크기에 따른 함수로 표현하여 수식화를 진행하는 전류 크기 수식화 단계 ; 및

상기 수식화된 구동속도 수식화, 전류 위상각 수식화 및 전류 크기 수식화를 이용하여 철손을 재 계산하는 철손 재계산 단계를 포함하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 철손 재계산 단계 후, 그 결과값이 기 설정된 오차 범위를 벗어난 경우에는 상기 구동속도 수식화 단계 내지 상기 철손 재계산 단계를 반복 수행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 반복 수행하는 단계는, 상기 철손 재계산 단계에 따른 결과 값이 기 설정된 오차 범위 이내가 될 때까지 계속 수행하는 것을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 구동속도 수식화 단계에 따른 철손 수식화는 다음 식으로 표현되는 것임을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

$$W_i = z_0 + (A_1 \cdot N_s) + (A_2 \cdot N_s^2)$$

여기서, N_s 는 동기 속도, z_0 , A_1 , A_2 는 계수임

청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 전류 위상각 수식화 단계에 따른 2차 함수 내의 계수를 전류 위상각의 2차 함수로 함수화 한 철손 수식화는 다음 식으로 표현되는 것임을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

$$W_i = \{z_1 + (A_3 \cdot \beta) + (A_4 \cdot \beta^2)\} + \{(z_2 + (A_5 \cdot \beta) + (A_6 \cdot \beta^2))N_s\} + \{(z_3 + (A_7 \cdot \beta) + (A_8 \cdot \beta^2))N_s^2\}$$

여기서, N_s 는 동기 속도, z_1 , z_2 , z_3 , $A_3 \sim A_8$ 는 계수, β 는 전류 위상각임

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 계수 z_1 , z_2 , z_3 , $A_3 \sim A_8$ 는 다음 식으로 표현되는 것임을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

$$\begin{aligned} z_1 &= -0.2993 + (-0.0116 \cdot I) \\ z_2 &= 0.00409 + (2.11E^{-4} \cdot I) + (-2.5E^{-6} \cdot I^2) \\ z_3 &= 1.0805E^{-6} + (5.826E^{-8} \cdot I) + (-6.3784E^{-10} \cdot I^2) \\ A_3 &= -0.00621 + (9.7075E^{-4} \cdot I) + (-2.0347E^{-5} \cdot I^2) \\ A_4 &= -8.8708E^{-5} + (-1.9585E^{-5} \cdot I) + (1.2698E^{-6} \cdot I^2) + (-2.61746E^{-8} \cdot I^3) \\ A_5 &= 3.94602E^{-5} + (-8.0096E^{-6} \cdot I) + (1.50267E^{-7} \cdot I^2) \\ A_6 &= -3.1144E^{-7} + (5.2838E^{-8} \cdot I) + (-1.3847E^{-9} \cdot I^2) \\ A_7 &= 1.4393 + (-2.6053E^{-9} \cdot I) + (5.2346E^{-11} \cdot I^2) \\ A_8 &= -1.0338E^{-10} + (1.67036E^{-11} \cdot I) + (-4.44284E^{-13} \cdot I^2) \end{aligned}$$

여기서, I는 전류 크기임

청구항 7

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 철손 계산 결과는 2차 함수 형상으로 발생하는 것을 특징으로 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 전기기기의 철손 계산에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 철손의 수식화 과정을 수행하여 전류 크기와 전류 위상각, 그리고 구동속도가 변화하여도 별도의 계산시간을 추가하지 않고서도 변수의 입력만으로 철손 값을 계산할 수 있도록 한 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 전기기기의 열원은 전기적인 손실과 기계적인 손실로 구분할 수 있다.

[0003] 그 중 전기적인 손실로서는 동손과 철손으로 대별된다. 그 중 동손은 저항손으로써 전류의 자승에 비례하며 전류의 측정과 저항의 측정을 통해 이론적인 계산 및 실험치의 산정이 비교적 용이하다. 반면 철손은 전기기기에 서 동손 계산시의 권선 저항과 달리 측정과 계산이 매우 까다로우며 유한요소해석(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 복잡한 자계 해석을 수행하더라도 그 정밀도는 현재까지도 연구 중에 있다. 이와 같은 철손은 자기회로 구성을 위하여 철심을 주로 사용하기 때문에 전기기기에서 큰 비중을 차지하는바 철손에 의한 저손실 소재 및 손실저감 방안에 대한 연구가 요구되고 있다.

[0004] 철손은 시변하는 자계에 의해 철심내 자구의 변화에 따른 에너지 손실에 기인하는 히스테리시스 손실과 철심의 도전율에 의해 발생하는 와전류 손실, 재료 내부의 자구폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류 손실성분으로 다음의 수학적 식 1과 같이 표현된다.

수학식 1

$$W_i = W_h + W_e + W_a$$

여기서, W_i 는 철손, W_h 는 히스테리시스 손실, W_e 는 와전류 손실, W_a 는 이상 와전류 손실을 나타낸다.

이처럼 철손은 각 손실성분의 합의 형태로 나타낼 수 있다.

그리고 각 손실 성분을 철손 계수로 표현하면 수학식 2와 같다.

수학식 2

$$W_i = (k_h \cdot B_m^2 \cdot f) + (k_e \cdot B_m^2 \cdot f^2) + (k_a \cdot B_m^{1.5} \cdot f^{1.5})$$

여기서, k_h 는 히스테리시스 손실 계수, k_e 는 와전류 손실계수, k_a 는 이상와전류 손실계수, B_m 은 철심 자속 밀도의 최대치, f 는 회전속도에 따른 자계의 주파수를 나타낸다.

상기 수학식 2를 이용하면 철심의 자속 밀도(B_m)는 유한요소해석을 통해 계산할 수 있고, 또한 주파수(f)는 구동 주파수를 기본파로 고조파 차수의 증가에 따라 배수로 증가하는 특성을 가지므로 계산할 수 있다.

이처럼, 철손 수식은 철심 자속 밀도(B_m)와 주파수(f)를 고려하고 있기 때문에, 철손 계수를 산정하면 철손을 계산할 수 있게 된다.

하지만, 철손 계수는 각 철심의 재질마다 상이하며 주파수 및 자계의 크기에 따라서 변화하는 등 비선형적인 특성이 있어 그 계산이 매우 까다롭다. 물론 철심 제작사가 특정 주파수 별 철손 실험결과를 제공하고 있어 철심 계수들을 역으로 산정할 수 있지만, 상기 철손 실험 결과는 특정 주파수 및 자속 밀도에서 실험한 결과만을 나타내기 때문에 사용자가 필요한 입력 및 출력 영역에서의 철손 예측은 반드시 필요하다.

상기 철손 실험 결과를 이용하여 철손을 계산하는 방법을 예를 들어 설명하기로 한다.

도 1은 철손 예측을 위해 '50PN1300' 철심 재질에 대하여 철심 제작사가 제공한 철손 실험 결과를 보인 그래프이다.

이를 보면 실험 결과는 최대 1.5(T) 근방에서 측정된 철손 실험 결과만을 나타내고 있다. 따라서 약 2.0(T)까지의 포화 영역을 가지는 전동기 철심에 적용하기 위해서는 제공 영역 이상의 자속 밀도에 대한 철손까지의 결과를 예측할 필요가 있다. 또한 전동기의 구동속도가 3,000rpm인 경우 8극기로서 200Hz의 구동주파수를 가지나, 고조파는 배수로 증가하기 때문에 고조파 및 정격속도 이하의 철손 양상 예측을 위해서는 4,000Hz까지의 철손으로 재정렬할 필요가 있다.

그렇기 때문에 사용자는 철심 제작사가 제공한 철손 실험 결과를 이용하여 2.0(T) 영역까지 철손을 예측할 수 있게 된다. 이는 도 2에 도시하고 있다. 도 2는 도 1에서 제공된 철손 실험 결과를 이용하여 2.0(T) 영역까지 철손을 예측한 그래프이다.

한편, 사용자는 도 2의 철손 예측 그래프를 이용하여 해당 주파수에 대한 철손 계수들을 다음의 표 1과 산정할 수 있게 된다.

표 1

Hz	K_h	K_e	K_a
50	0.04021	0.0003248	0.00203
60	0.03901	0.0003152	0.00224
100	0.0368	0.0002973	0.0009431

200	0.0343	0.0002771	0.0006437
-----	--------	-----------	-----------

- [0020] 또한 상기 표 1을 이용하면 도 3과 같이 4,000Hz까지의 주파수에 대해 재정렬된 손실 계수 그래프를 예측할 수 있게 된다.
- [0021] 그리고 마지막으로 산정된 주파수에 따라 재정렬된 철손 계수와 철심의 자속 밀도, 주파수를 이용하여 철손을 계산하게 된다.
- [0022] 하지만, 상기와 같은 철손 계산 방법은 다음과 같은 문제점이 있다.
- [0023] 먼저, 상기 방법으로 계산된 철손은 특정 속도, 특정 전류, 특정 전류 위상각에서만 계산되는 수동적인 결과이다.
- [0024] 즉 속도는 주파수(f) 이므로 속도가 변화하면 그에 따른 철손 재계산이 수행되어야 하며 전류의 크기와 전류 위상각은 철심 자계를 변화시키므로 유한요소해석을 이용하여 자속 밀도(B_m)를 재산정하여야 한다. 다시 말해 전류의 크기에 따라 토크가 변화하며 속도가 변화함에 따라 전류 위상각도 변화하기 때문에, 전동기의 구동 특성을 파악하기 위해서는 모든 전류의 크기와 전류 위상각, 그리고 구동 속도를 입력으로 가지는 철손이 계산되어야 한다.
- [0025] 그러나, 모든 입력에 대해 미리 철손을 계산하여 저장의 형태로 계산하는 방법을 유한요소해석이 가지는 큰 단점인 많은 해석 시간이 소모되는 문제점을 갖는다.
- [0026] 또한, 전류가 예상치 못한 단위로 증가 또는 감소하거나 속도가 예상치 못한 범위에서 구동할 경우 철손을 다시 계산하여야 한다. 이 역시 많은 시간이 소모된다.
- [0027] 물론, 이의 개선 방향으로 룩-업 테이블(Look-up table)를 이용하는 방법이 있다. 이는 변수에 대한 모든 값을 테이블화하여 저장한 후 메모리에 대한 주소값을 포인터 등으로 지정하여 사용하는 방법으로써, 동작시간이나 구현이 간단하다. 반면 정확한 테이블을 만들기 위한 시간 및 저장된 값을 수정하기 위해서는 더욱 많은 시간이 소요되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0028] 따라서 본 발명의 목적은, 전기기기의 주요한 열원인 철손을 입력 파라미터에 대한 수식화를 진행하여 계산함으로써, 종래보다 계산 과정을 간소화하면서도 계산 시간을 단축할 수 있도록 하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0029] 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 따르면, 전류크기, 전류 위상각 별 구동속도에 따른 철손 계산 결과를 전류 위상각, 구동속도 및 전류 크기의 변수 값으로 재정렬하는 단계; 상기 재정렬된 변수 값 중 구동속도에 따른 철손 수식화를 진행하는 구동속도 수식화 단계; 상기 구동속도 수식화 단계에 따라 2차 함수로 정의된 철손을 전류 위상각에 따른 수식화를 진행하는 전류 위상각 수식화 단계; 상기 전류 위상각 수식화 단계에 대한 계수를 전류 크기에 따른 함수로 표현하여 수식화를 진행하는 전류 크기 수식화 단계 ; 및 상기 수식화된 구동속도 수식화, 전류 위상각 수식화 및 전류 크기 수식화를 이용하여 철손을 재계산하는 단계를 포함하는 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법이 제공된다.
- [0030] 그리고 상기 철손 재계산 단계 이후에 그 결과값이 기 설정된 오차 범위를 벗어난 경우에는 상기 구동속도 수식화 단계 내지 상기 철손 재계산 단계를 반복 수행하며, 이는 상기 결과값이 기 설정된 오차 범위 이내가 될 때까지 계속 수행하는 것을 특징으로 한다.
- [0031] 그리고 상기 구동속도 수식화 단계에 따른 철손 수식화는 다음 식으로 표현된다.

$$W_i = z_0 + (A_1 \cdot N_s) + (A_2 \cdot N_s^2)$$

[0032]

[0033] 여기서, N_s 는 동기 속도, z_0 , A_1 , A_2 는 계수를 나타냄.

[0034] 또한 상기 전류 위상각 수식화 단계에 따른 2차 함수 내의 계수를 전류 위상각의 2차 함수로 함수화 한 철손 수식화는 다음 식으로 표현된다.

$$W_i = \{z_1 + (A_3 \cdot \beta) + (A_4 \cdot \beta^2)\} \\ + \{(z_2 + (A_5 \cdot \beta) + (A_6 \cdot \beta^2))N_s\} \\ + \{(z_3 + (A_7 \cdot \beta) + (A_8 \cdot \beta^2))N_s^2\}$$

[0035]
[0036] 그리고 상기 전류 크기에 따른 철손 수식화는 다음 식으로 표현된다.

$$z_1 = -0.2993 + (-0.0116 \cdot I) \\ z_2 = 0.00409 + (2.11E^{-4} \cdot I) + (-2.5E^{-6} \cdot I^2) \\ z_3 = 1.0805E^{-6} + (5.826E^{-8} \cdot I) + (-6.3784E^{-10} \cdot I^2) \\ A_3 = -0.00621 + (9.7075E^{-4} \cdot I) + (-2.0347E^{-5} \cdot I^2) \\ A_4 = -8.8708E^{-5} + (-1.9585E^{-5} \cdot I) + (1.2698E^{-6} \cdot I^2) + (-2.61746E^{-8} \cdot I^3) \\ A_5 = 3.94602E^{-5} + (-8.0096E^{-6} \cdot I) + (1.50267E^{-7} \cdot I^2) \\ A_6 = -3.1144E^{-7} + (5.2838E^{-8} \cdot I) + (-1.3847E^{-9} \cdot I^2) \\ A_7 = 1.4393 + (-2.6053E^{-9} \cdot I) + (5.2346E^{-11} \cdot I^2) \\ A_8 = -1.0338E^{-10} + (1.67036E^{-11} \cdot I) + (-4.44284E^{-13} \cdot I^2)$$

[0037]
[0038] 상기 철손 계산 결과는 2차 함수 형상으로 발생하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0039] 이와 같은 본 발명에 따르면, 전기기기의 주요한 열원인 철손을 입력 파라미터에 대한 수식화를 진행하여 계산하고 있어, 전류 크기와 전류 위상각, 그리고 구동속도가 변화하여도 별도의 계산시간을 추가하지 않고서도 변수의 입력만으로 철손 값을 계산할 수 있기 때문에, 종래보다 계산 과정을 간소화하면서도 계산 시간을 단축할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0040] 도 1은 철손 예측을 위해 50PN1300 철심재질에 대하여 철심 제작사가 제공한 철손 실험 결과를 보인 그래프
도 2는 도 1에서 제공된 철손 실험 결과를 이용하여 2.0(T) 영역까지 철손을 예측한 그래프
도 3 및 도 4는 본 발명을 설명하기 위해 제시된 구동 속도 및 전류별 전류 위상각에 따른 철손 분포를 보인 그래프와 전류 크기 및 전류 위상각 별 구동 속도에 따른 철손 분포를 보인 그래프
도 5는 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 전기기기의 철손 계산방법을 보인 흐름도
도 6은 본 발명의 철손 계산방법과 룩-업 테이블에 의하여 전류 크기 및 전류 위상각 별 속도에 따른 철손을 비교한 그래프
도 7은 본 발명의 철손 계산방법에 의한 구동속도 별 전류 크기에 따른 철손 분포를 보인 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0041] 이하 본 발명에 의한 전류 위상각 제어에 따른 IPMSM의 철손 계산방법의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

- [0042] 본 발명의 실시 예는 철손을 계산하기 위해 철손 수식화 방안을 제공하는 것이다. 이를 위해 본 실시 예는 다음의 조건을 기반으로 진행되는 것에 유의하여야 한다.
- [0043] 즉, 본 실시 예에서 철손 저항은 철손의 전체 크기에 의존하기 때문에 철손 성분 분리는 수행하지 않았고, 철손 계산 방법 및 철손의 신뢰성은 이미 확보되었음을 전제로 한다. 또한 유한요소해석을 이용한 자속밀도 산정의 신뢰성은 이미 입증되었음을 전제로 한다.
- [0044] 이와 같은 조건에 기반으로 전기기기의 철손 수식화에 따라 철손을 계산하는 방법을 설명하기로 한다.
- [0045] 한편 철손 수식화를 진행하기 전에 철손이 변수에 따라 어떠한 형태로 존재하는지를 도 3과 도 4를 참조하여 살펴보기로 한다. 이를 통해 철손 수식화를 하기 위한 적정 값이 무엇인지를 결정하여야 한다.
- [0046] 도 3a 내지 도 3d는 구동 속도 및 전류별 전류 위상각에 따른 철손 분포를 보인 그래프이고, 도 4a 내지 도 4d는 전류 크기 및 전류 위상각 별 구동 속도에 따른 철손 분포를 보인 그래프이다.
- [0047] 도 3a 내지 도 3d를 보면 구동속도, 전류크기, 전류 위상각이 각각 특정 값으로 정해진 상태이고, 그 상태에서 철손의 변환 상태를 보여주고 있다. 예컨대, 구동속도는 도3a 내지 도 3d가 1,000rpm, 2,000rpm, 3,000rpm 및 4,000rpm를 각각 나타내고, 전류크기는 12A, 18A, 24A 및 30A를 나타낸다. 또한 전류 위상각은 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° 와 같다.
- [0048] 따라서, 만약 1,800rpm 구동속도, 17A 전류크기, 21°의 전류 위상각과 같이 입력 값이 변화하면 철손 계산을 위해서는 다시 많은 시간이 소요되게 된다. 뿐만 아니라 도 3a 내지 도 3d를 보면 특정 전류 위상각에 따라 철손 분포가 상당히 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그 결과 도 3에 도시된 구동 속도 및 전류별 전류 위상각에 따른 결과 값을 수식화하기에는 어려움이 있다.
- [0049] 반면, 도 4a 내지 도 4d를 보면 철손 계산 결과값은 대략 2차 함수의 형상으로 변화하고 있음을 알 수 있고, 이는 도 3의 결과값에 비해 상대적으로 수식화하기가 용이함을 확인할 수 있다.
- [0050] 따라서 본 실시 예는 도 4a 내지 도 4d의 전류 크기 및 전류 위상각 별 구동속도에 따른 철손 값을 이용하여 철손 수식화를 진행하기로 한다. 참고로, 전류 크기는 도 4a는 12A, 도 4b는 18A, 도 4c는 24A, 도 4d는 30A 일 때의 그래프를 각각 도시하고 있다.
- [0051] 도 5는 본 발명의 바람직한 실시 예에 따른 전기기기의 철손 계산방법을 보인 흐름도이다.
- [0052] 전기기기의 철손 계산을 위한 철손 수식화는 상술한 도 4의 철손 계산결과값을 기반으로 하여 전류 위상각, 구동 속도 및 전류 크기에 대해 재정렬하는 과정을 수행한다(s100).
- [0053] 그런 다음 구동속도, 전류 위상각 및 전류 크기에 따른 수식화를 진행하는데, 먼저 구동속도에 따른 철손 수식화를 진행한다(s110). 즉, 철손 수식화는 동기속도에 따른 수식화를 먼저 진행하고 다음에 전류 위상각 β 로 수식화를 진행한 다음 마지막으로 전류 크기에 따라 남은 모든 계수들을 수식화하는 과정으로 진행된다.
- [0054] 먼저, 동기속도에 따른 철손 수식화는 다음 수학적 식 3과 같다.

수학적 식 3

$$W_i = z_0 + (A_1 \cdot N_s) + (A_2 \cdot N_s^2)$$

[0055]

[0056] 여기서, N_s 는 동기 속도를 나타낸다. 그리고 z_0 , A_1 , A_2 는 계수를 나타낸다.

[0057] 상기 계수는 다음 표 2에 나타내고 있다. 표 2에서, β 는 전류 위상각이다.

표 2

[0058]

	β	z_0	A_1	A_2
--	---------	-------	-------	-------

12(A)	0	-0.44838	0.00629	1.70388E-6
	10	-0.40505	0.00591	1.58895E-6
	30	-0.35971	0.00532	1.43006E-6
	45	-0.34406	0.00497	1.34492E-6
	60	-0.32199	0.00463	1.25516E-6
	90	-0.27611	0.00414	0.11783E-6
18(A)	0	-0.50262	0.00707	1.90855E-6
	10	-0.45922	0.00646	1.74748E-6
	30	-0.39816	0.00561	1.5221E-6
	45	-0.33257	0.00491	1.32203E-6
	60	-0.29238	0.00438	1.17739E-6
	90	-0.24399	0.00365	9.89485E-7
24(A)	0	-0.5328	0.00754	2.0563E-6
	10	-0.53078	0.00708	1.94001E-6
	30	-0.46169	0.00624	1.7073E-6
	45	-0.35741	0.00494	1.34984E-6
	60	-0.28289	0.00420	1.13437E-6
	90	-0.22475	0.00324	8.8937E-7
30(A)	0	-0.61707	0.00803	2.20031E-6
	10	-0.62433	0.00739	2.0797E-6
	30	-0.50128	0.00650	1.79113E-6
	45	-0.45587	0.00528	1.5058E-6
	60	-0.31111	0.00432	1.18419E-6
	90	-0.22159	0.00311	8.59745E-7

[0059] 이와 같이 구동 속도에 따른 철손 수식화를 위한 계수가 정리되면, 상기 구동 속도에 따라 2차 함수로 정의된 철손을 전류 위상각에 따른 함수로 재구성한다(s120). 즉 상기 계수 z_0 , A_1 , A_2 를 전류 위상각의 2차 함수로 함수화하여 나타낸다. 이는 다음의 수학적 4와 같다.

수학적 4

$$W_i = \{z_1 + (A_3 \cdot \beta) + (A_4 \cdot \beta^2)\} + \{(z_2 + (A_5 \cdot \beta) + (A_6 \cdot \beta^2))N_s\} + \{(z_3 + (A_7 \cdot \beta) + (A_8 \cdot \beta^2))N_s^2\}$$

[0060]

[0061] 그리고 전류 위상각에 따른 철손 수식화를 위한 계수는 표 3에 나타내고 있다.

표 3

[0062]

I(A)	Z_1	Z_2	Z_3	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
12	-0.43539	-0.00627	1.689E-6	0.00523	-8.69E-6	-3.48E-5	1.203E-7	-9.34E-9	3.251E-11
18	-0.5112	-0.000707	1.917E-6	0.00459	-1.65E-6	-5.64E-6	1.994E-7	-1.55E-9	75.504E-11
24	-0.58676	0.00773	2.117E-6	0.00544	-1.17E-5	-6.574E-5	1.505E-7	-1.80E-8	3.988E-11
30	-0.64333	0.00817	2.252E-6	0.00457	8.123E-6	-6.27E-5	3.026E-8	-1.66E-8	-1.56E-12

[0063] 표 3을 보면 구동 속도와 전류 위상각은 구속되지 않는 입력을 가지면 전류 크기에 대한 함수로 수식이 전개되었음을 알 수 있다.

[0064] 그런 다음에는 전류 크기에 대한 수식화를 수행한다(s130).

[0065] 전류 크기에 따른 철손 수식화는 상기 표 3의 계수들을 전류에 따른 함수로 표현하여 수행한다. 그 결과 전류 크기로 수식화된 결과는 다음 수학적 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

수학적 식 5

$$\begin{aligned} z_1 &= -0.2993 + (-0.0116 \cdot I) \\ z_2 &= 0.00409 + (2.11E^{-4} \cdot I) + (-2.5E^{-6} \cdot I^2) \\ z_3 &= 1.0805E^{-6} + (5.826E^{-8} \cdot I) + (-6.3784E^{-10} \cdot I^2) \\ A_3 &= -0.00621 + (9.7075E^{-4} \cdot I) + (-2.0347E^{-5} \cdot I^2) \\ A_4 &= -8.8708E^{-5} + (-1.9585E^{-5} \cdot I) + (1.2698E^{-6} \cdot I^2) + (-2.61746E^{-8} \cdot I^3) \\ A_5 &= 3.94602E^{-5} + (-8.0096E^{-6} \cdot I) + (1.50267E^{-7} \cdot I^2) \\ A_6 &= -3.1144E^{-7} + (5.2838E^{-8} \cdot I) + (-1.3847E^{-9} \cdot I^2) \\ A_7 &= 1.4393 + (-2.6053E^{-9} \cdot I) + (5.2346E^{-11} \cdot I^2) \\ A_8 &= -1.0338E^{-10} + (1.67036E^{-11} \cdot I) + (-4.44284E^{-13} \cdot I^2) \end{aligned}$$

[0066]

[0067] 이후, 수식화된 철손을 이용하여 철손을 재계산하는 과정을 수행한다(s140).

[0068] 상기의 과정을 통해 오차 범위가 기 설정된 범위 이내에 포함되는지를 판단한다(s150).

[0069] 그 판단 결과, 오차 범위가 기 설정된 범위 이내인 경우 철손 계산은 타당한 값으로 판단하고 계산 절차를 종료한다. 반면, 상기 오차 범위가 기 설정된 범위를 벗어난 경우 상기 제110 단계인 구동속도에 따른 수식화 과정부터 이후 과정을 반복하여 수행한다. 여기서, 오차 범위는 예컨대 5%로 정한다. 상기 5%의 오차 범위는 실험 결과를 통해 획득된 값이다. 즉 실험을 통해 오차 범위가 5% 미만인 경우 철손 계산은 충분한 타당성을 확보하는 것으로 간주할 수 있기 때문이다.

[0070] 이와 같은 과정에 의하여 철손 수식화가 진행되면 입력에 따라 매우 빠른 속도로 대응 가능한 유동적인 철손 계산이 수행될 수 있다.

[0071] 이어서는 본 실시 예에 의하여 계산된 철손과 기존의 룩 업 테이블에 의한 철손 결과의 비교를 통해 철손 수식화의 오차가 어느 정도인지를 확인하였다. 이는 도 6에 도시하였다. 이때 철손 수식화를 이용한 계산 결과와 기존의 룩-업 테이블로 계산한 결과가 5% 미만으로 수렴할 경우 철손 계산은 충분한 타당성을 확보하고 있는 것으로 본다.

[0072] 도 6a 내지 도 6d는 본 발명의 철손 계산방법과 룩-업 테이블에 의하여 전류 크기 및 전류 위상각 별 속도에 따른 철손을 비교한 그래프이다. 도 6a 내지 도 6d는 전류 크기가 각각 12A, 18A, 24A, 30A 일 때의 그래프이다.

[0073] 이를 보면 도 6a 내지 도 6d와 같이 전류 크기, 전류 위상각 별 구동속도를 나타내고 있는데, 오차는 거의 발생하지 않는 것으로 확인되었고 평균 오차는 1% 미만으로 발생하였다.

[0074] 즉, 전류 크기, 전류 위상각 및 구동 속도가 변화하여도 별도의 계산 시간 추가 없이 변수만 입력하면 철손이 즉시 계산되고 있다.

[0075] 그리고, 도 7a 및 도 7b는 구동속도 및 전류 위상각 별 전류 크기에 따른 철손 분포를 나타내고 있다. 7a는 구동속도 3000rpm, 7b는 구동속도 5,000rpm 인 경우의 그래프이다. 이 역시 1% 이내의 오차가 발생하고 있음이 확인되었다.

[0076] 이상에서 설명한 바와 같이 본 실시 예는 구동속도, 전류위상각, 전류 크기에 따른 철손 수식화를 수행하고, 그

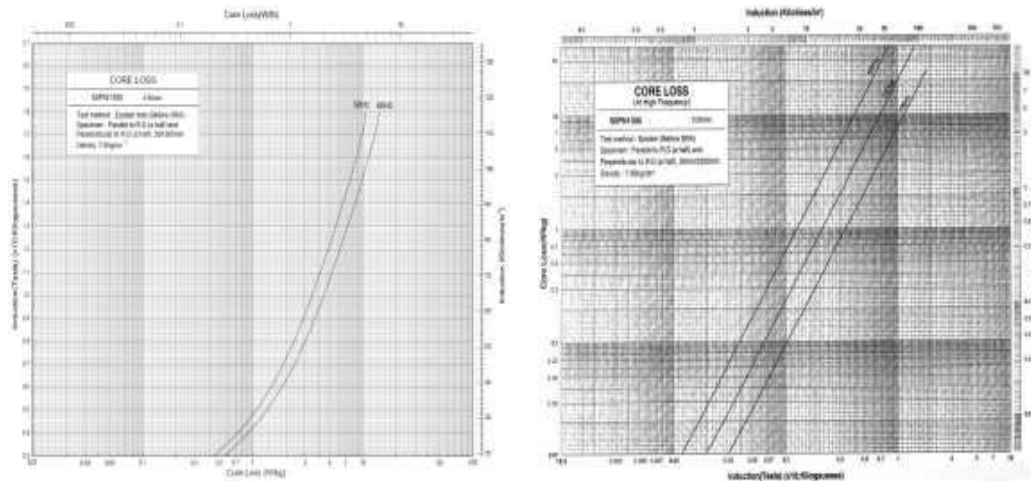
철손 수식화를 이용하여 철손을 계산하고 있음을 알 수 있다.

[0077]

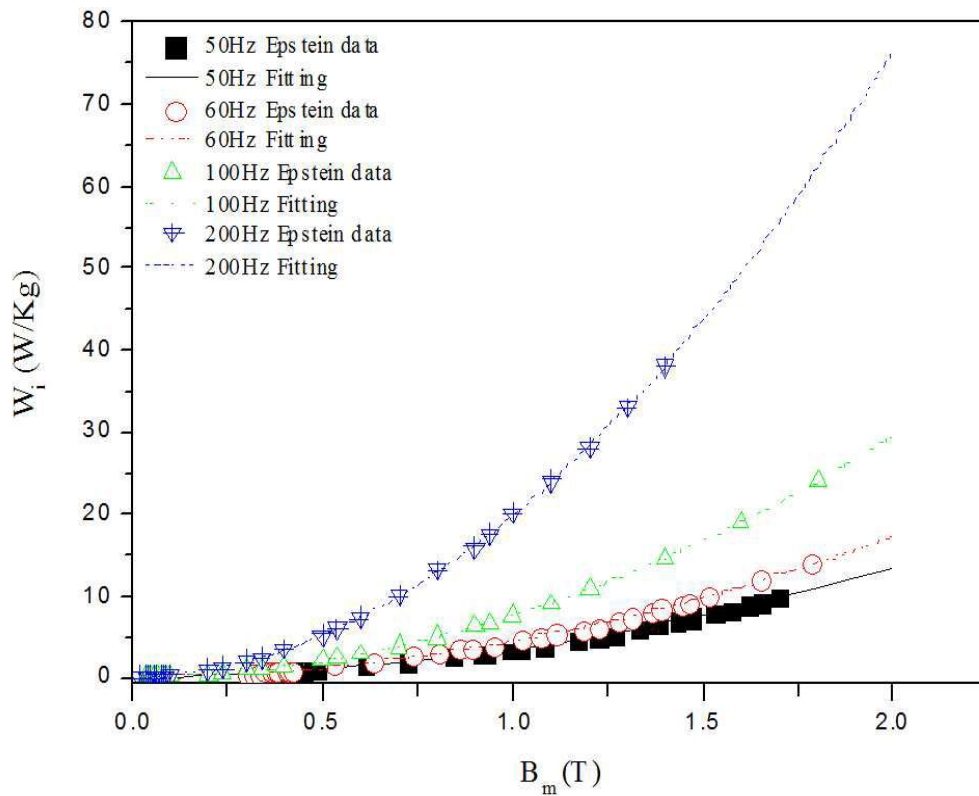
이상과 같이 본 발명의 도시된 실시 예를 참고하여 설명하고 있으나, 이는 예시적인 것들에 불과하며, 본 발명이 속하는 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 요지 및 범위에 벗어나지 않으면서도 다양한 변형, 변경 및 균등한 타 실시 예들이 가능하다는 것을 명백하게 알 수 있을 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위의 기술적인 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

도면

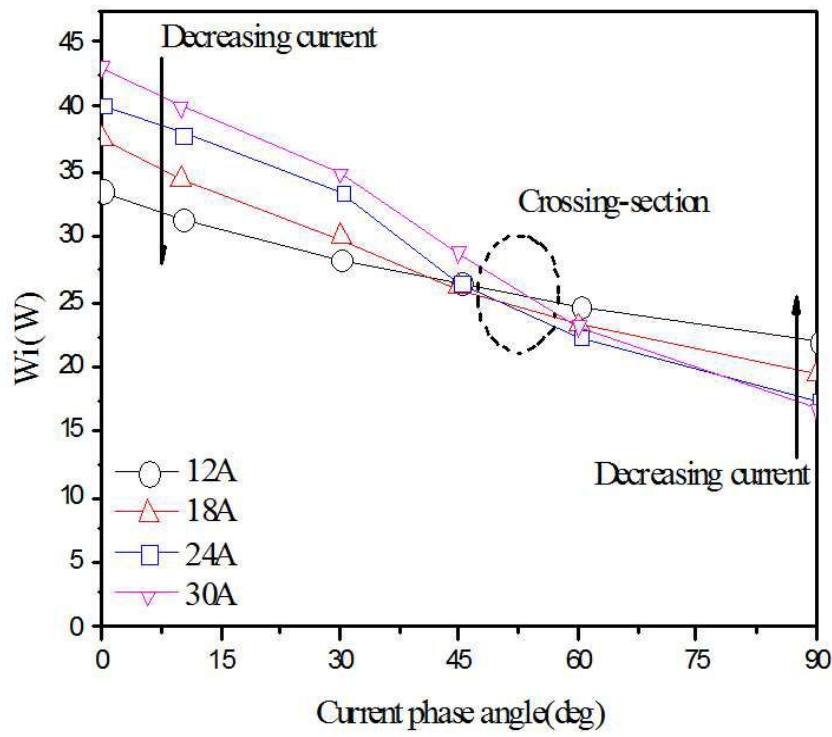
도면1



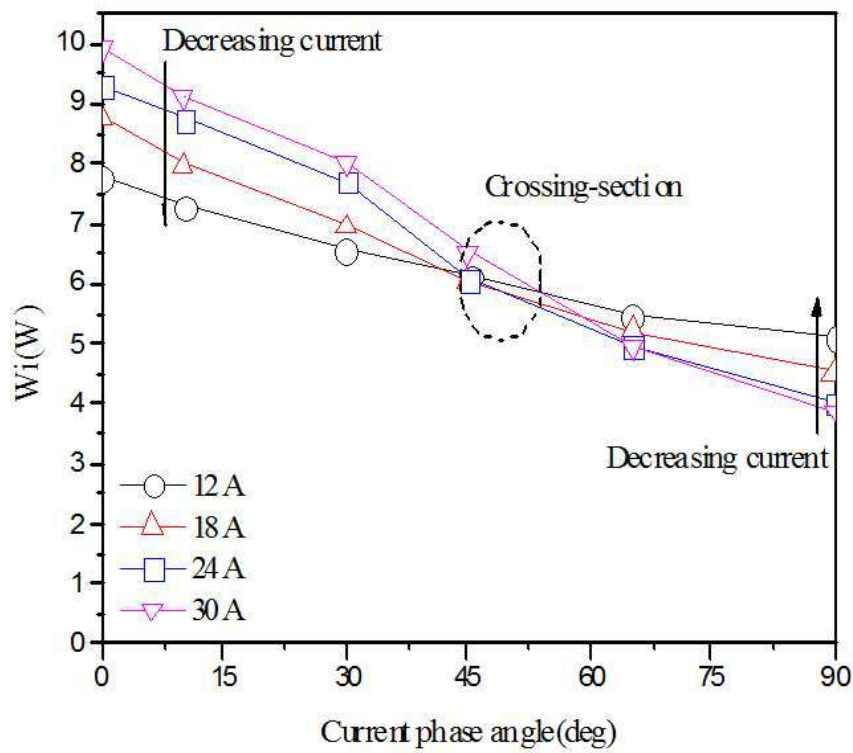
도면2



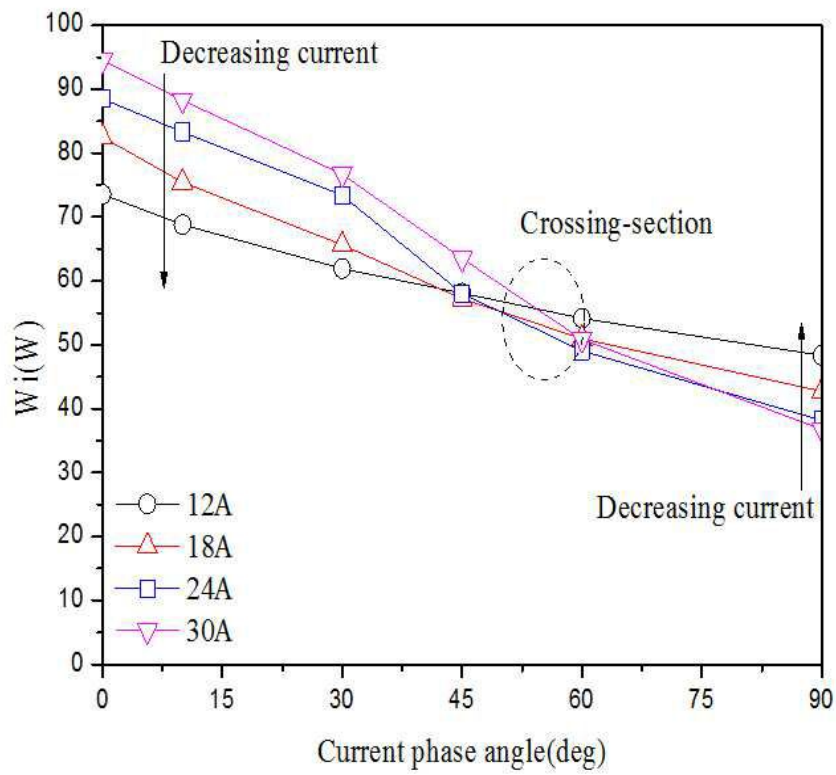
도면3a



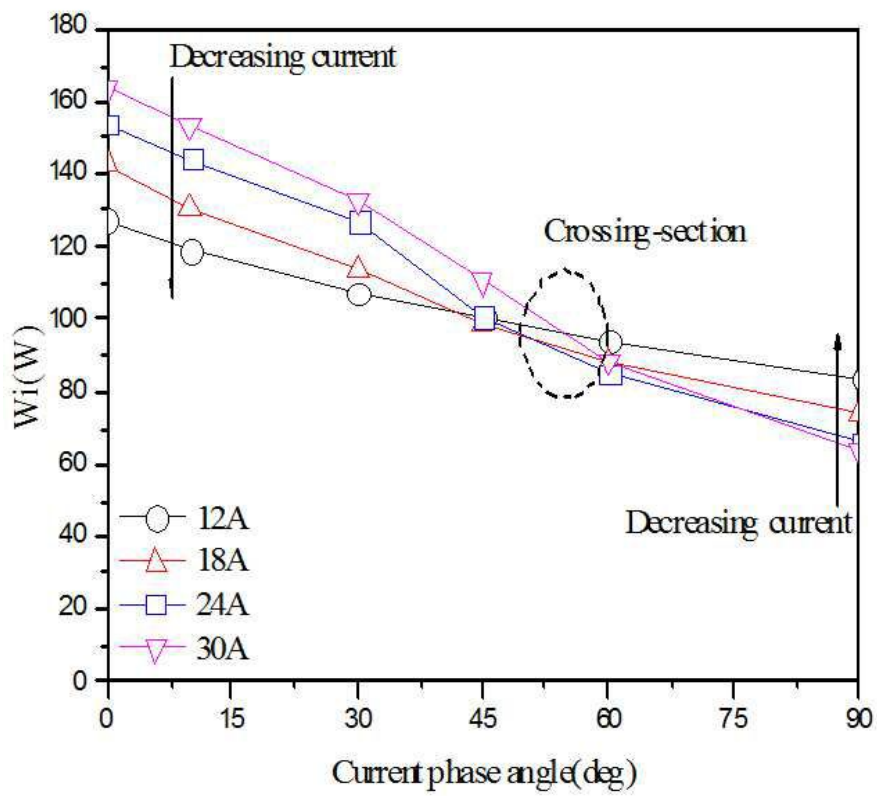
도면3b



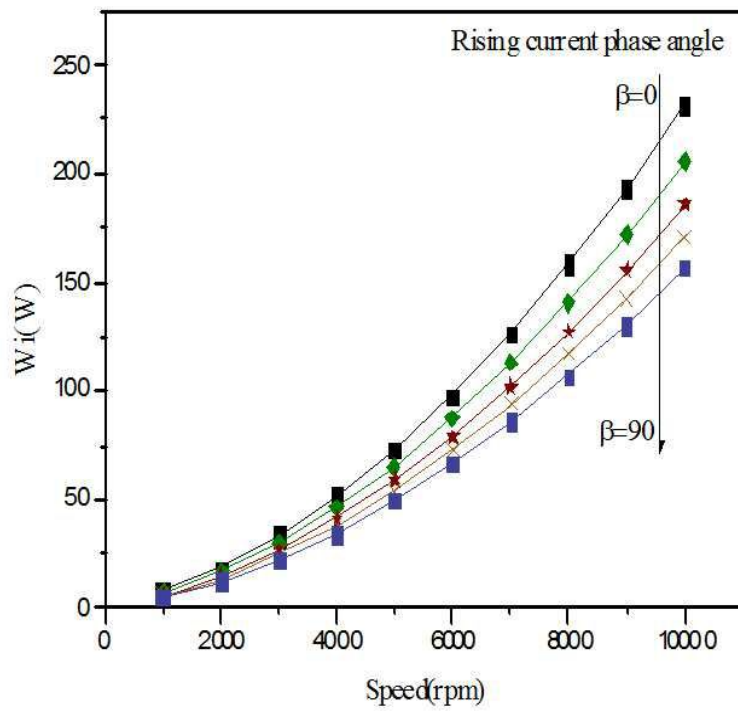
도면3c



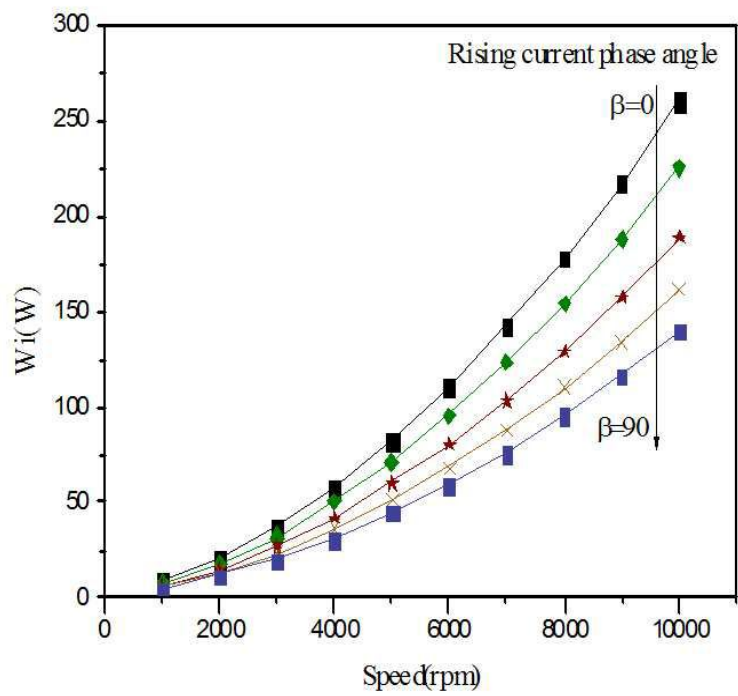
도면3d



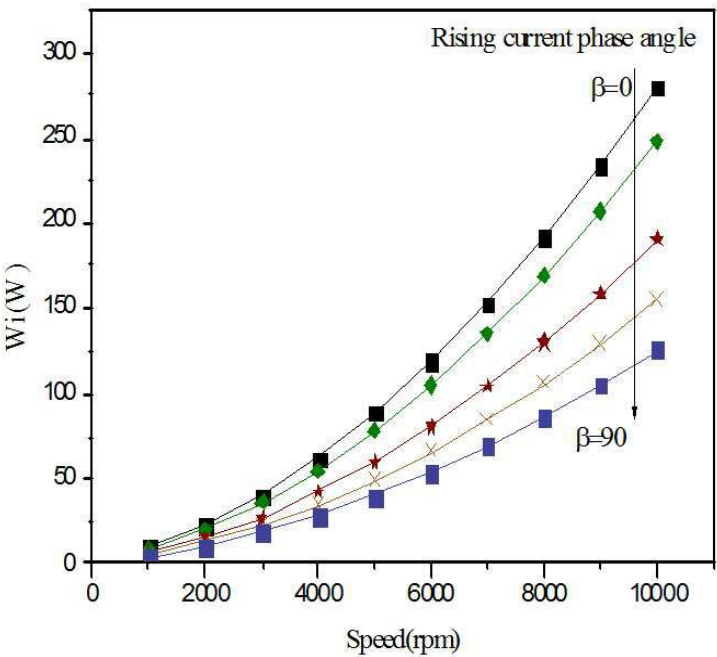
도면4a



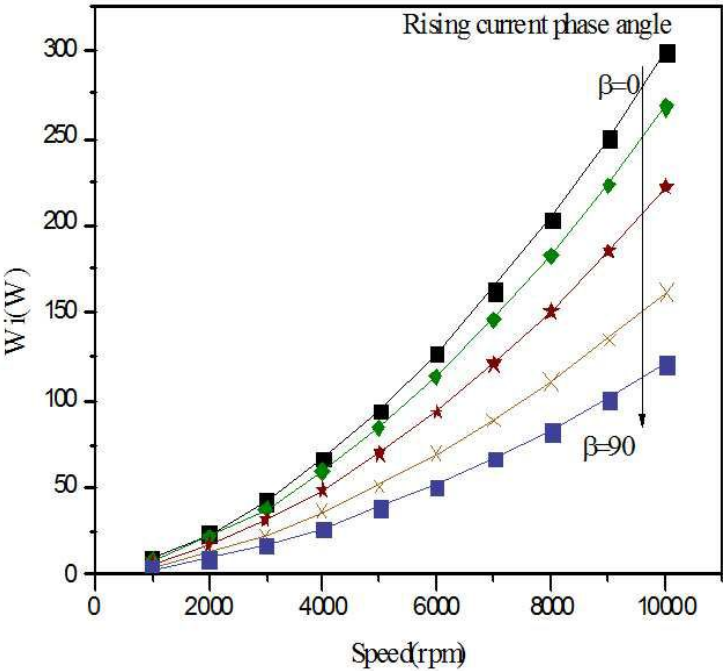
도면4b



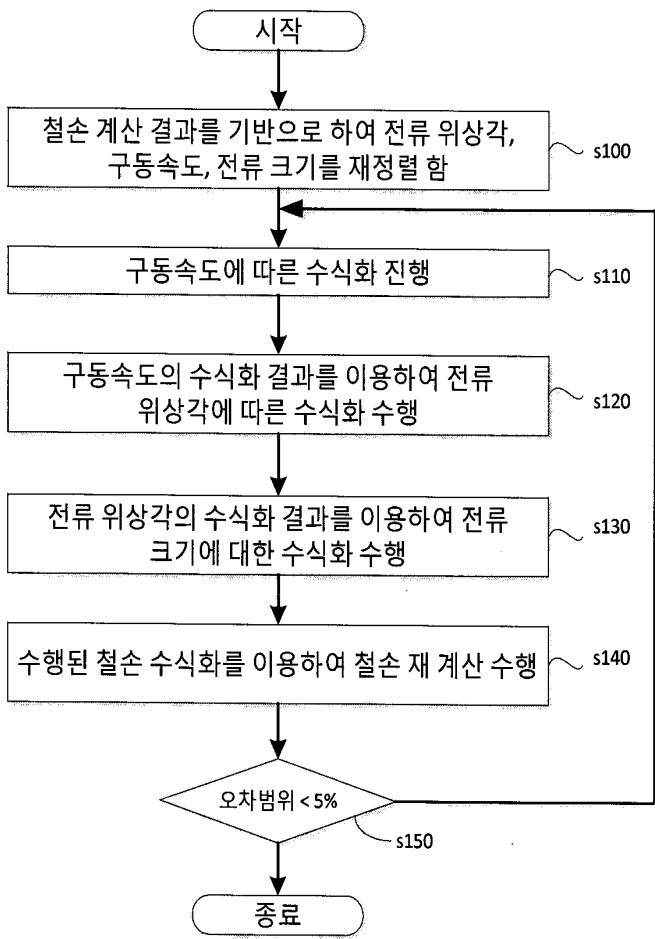
도면4c



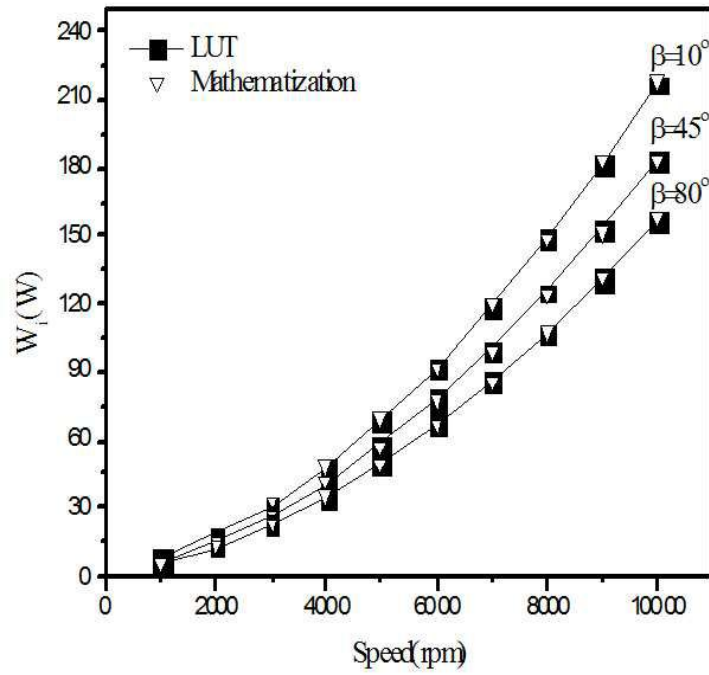
도면4d



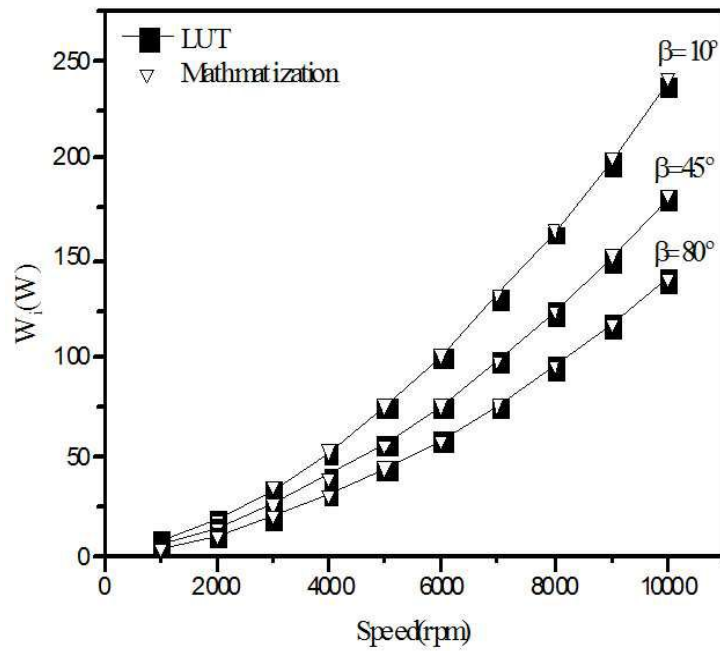
도면5



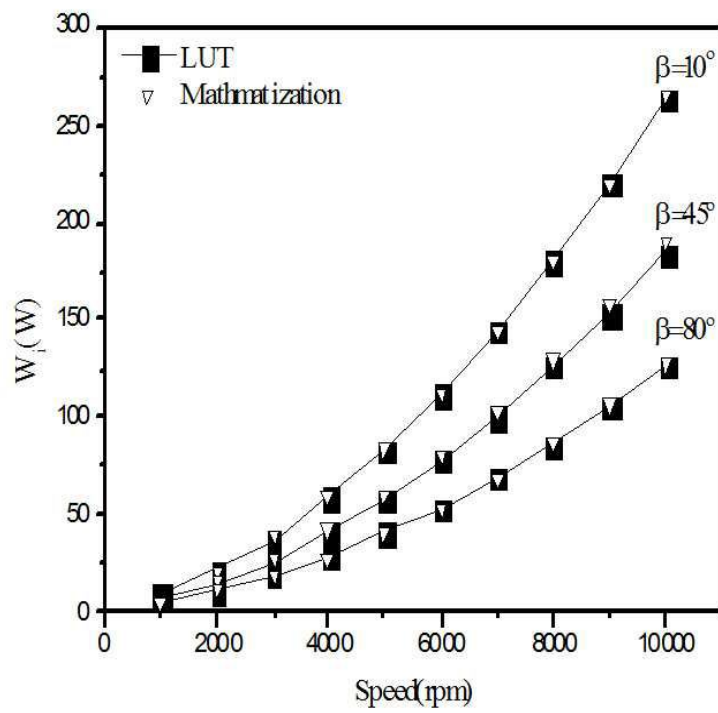
도면6a



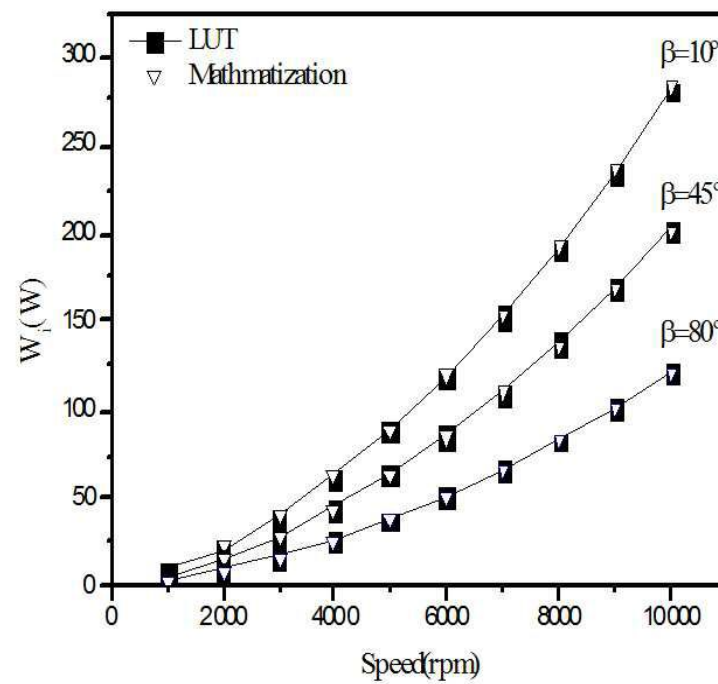
도면6b



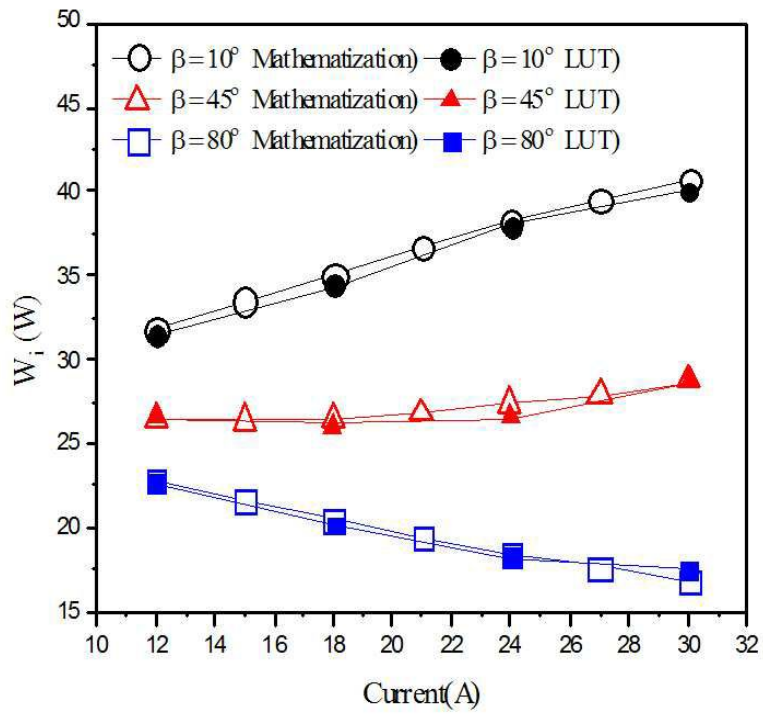
도면6c



도면6d



도면7a



도면7b

