자기포화 특성을 고려한 단상유도전동기의 등가회로 해석

Equivalent Circuit Analysis of Single Phase Induction Motor Considering Magnetic Saturation Characteristics

김 영 선*
(Young Sun Kim)

Abstract - Single phase induction motor(SPIM) is used widely because it is driven by single phase source. However, the efficiency of the motor is not good due to saturation of magnetic material. To analyze the motor accurately, the magnetic saturation characteristics should be considered in analysis of equivalent circuit. In this paper, lumped parameter of circuit are derived from multi phase induction motor using method of symmetrical coordinates. Also, we presents a method for the equivalent circuit analysis of SPIM using magnetic saturation rate. The magnetic nonlinearity is considered deriving magnetizing reactance from voltage-current saturation curve. As a results, current characteristic, torque, output and efficiency are shown through analysis of equivalent circuit. A simulation results of SPIM will be used to improve the characteristics and efficiency of motor.

Key Words : Single phase induction motor, Equivalent circuit, Circuit parameter, Saturation rate

1. 서 론

단상 유도전동기(Single Phase Induction Motor, SPIM)는 3상 유도전동기에 비하여 특성도 떨어지고, 같은 용량에 재료비도 많이 들어 1 [KW]이하의 소용량에 제한된다 [1]-[3]. 그러나 가정은 주로 3상 전력보다는 단상 전력의 공급이 많으므로 전원을 변환장치 없이 직접 사용할 수 있어 가전제품 전 분야의 동력원으로 사용되고 있다. 이러한 단상 유도전동기는 1차 단상 권선에 의한 교번 자계이기 때문에 기동 토크가 없고, 정지된 단상 유도전동기는 자기 자신이 회전하지 못하나 어떠한 방법으로써 외부에서 한쪽방향으로 회전시키면 그 방향으로 토크가 생기고 전동기는 회전을 계속한다 [4]-[7]. 단상 유도전동기와 삼상 유도전동기의 동작원리는 서로 같지만 단상 유도전동기는 기동 토크를 발생시키기 위하여 별도의 장치를 필요로 한다. 단상 유도전동기는 기동 토크를 발생하는 방식에 따라서 분류한다. 또한, 이러한 단상 유도전동기의 동작특성을 해석하는 데는 두 전동기 이론(회전자계설)과 교차자계이론(직교자계설)이 있다 [5],[8].

전동기의 특성 해석은 집중 회로정수를 이용한 등가회로 해석법과 자속을 직접 계산하는 전자장 수치해석 같은 구조 해석 방법이 있다. 구조해석 방법은 국부적인 전자계 특성을 파악할 수 있는 장점이 있으나 모델링과 해석 과정에서 시간이 많이 소요되고 전동기 조건이 바뀌면 모든 해석을 다시 수행해야 하는 번거로움이 있다. 반면에 등가회로 해

석법은 시간이 적게 걸리고 간편하게 전동기의 특성을 파악할 수 있다. 그러나 회로정수의 정확성 확보와 자성체의 자기포화특성을 고려하지 못하는 단점이 있다 [9]-[11].

본 논문에서는 단상 유도전동기의 등가회로에 사용되는 회로정수를 다상(2상) 유도전동기에 회전자계설 기반의 대칭좌표법을 적용하여 도출하였다. 또한, 단상 유도전동기의 정상분(forward sequence)과 역상분(backward sequence) 회로가 동시에 존재하는 등가회로를 해석하는데 포화계수(saturation rate)를 이용하여 포화특성을 고려한전동기 특성 해석을 하였다. 해석 결과로는 2차 저항의 변화에 따른 토크특성과 1차, 2차 전류, 전기적 출력, 기계적 출력 및 효율 등을 해석하였다. 단상 유도전동기의 설계 단계에서 특성도출 및 특성 개선 연구에 도움이 될 것으로 생각된다.

2. 단상 유도전동기의 등가회로

2.1 등가회로 정수 도출

본 절에서는 2상 유도전동기의 등가회로로부터 대칭좌표법을 적용하여 정상 및 역상 등가회로를 유도하고 2상 유도전동기의 결상운전 조건을 이용하여 단상 유도전동기의 등가회로를 구하여 특성 식들을 도출한다. 그림 1은 회전자계로 동작하는 2상 유도전동기의 구조로부터 대칭좌표법을 적용하여 결상 운전하는 회로를 나타낸 것이다. 단상유도전동기의 결상 운전조건인 단락($\dot{E}_b=0$)과 개방($\dot{E}_b \neq 0$)으로 가정하고, B상의 스위치를 OFF하여 2상 평형전압이 인가된 것으로 하여 전원이 접속된 A상을 기준으로 대칭좌표법을 적용하여 등가회로를 도출 한다 [12]-[14].

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea

E-mail : yskim@joongbu.ac.kr

Received : August 13, 2012; Accepted : January 9, 2013

그림 1 단상 운전을 위한 2상 유도전동기의 권선 배치

Fig. 1 Winding placement of two phase induction motor for single phase operation

단상 유도전동기의 각 상의 단자 전압 및 전류는 다음과 같다. $e_a = 0$ 과 $e_b \neq 0$ 이므로 전동기의 A상 및 B상 단자전압 V_a , V_b 및 전류 I_A , I_B 는 다음과 같다.

$$V_a = V_A \quad (1)$$

$$V_b' = V_B - e_b \quad (2)$$

$$I_A \neq 0, I_B = 0 \quad (3)$$

여기서, e_a : A상의 유기전압 e_b : B상의 유기전압

단자전압이 결정되면 A상의 정상분과 역상분의 전압 V_{a1} , V_{a2} 과 전류 I_{a1} , I_{a2} 그리고 전체 전압 및 전류 V_a , I_a 가 식 (4)~(9)와 같이 결정된다.

$$V_{a1} = \frac{1}{2}(V_a + jV_b) = \dot{V}_A - \frac{1}{2}je_b = Z_P I_{a1} \quad (4)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{2}(V_a - jV_b) = \frac{1}{2}je_b = Z_N I_{a2} \quad (5)$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} = \dot{V}_A \quad (6)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{2}(I_A + jI_B) = \frac{1}{2}I_A \quad (7)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{2}(I_A - jI_B) = \frac{1}{2}I_A = I_{a1} \quad (8)$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = \frac{1}{2}I_A + \frac{1}{2}I_A = I_A \quad (9)$$

여기서,

Z_P : 정상분 임피던스 Z_N : 역상분 임피던스

개방이 되어있는 B상에 대하여도 같은 대칭좌표법을 도입하여 정상분, 역상분 및 전체 전압전류 관계식을 정리하면 식 (10)~(15)과 같다 [14].

$$V_{b1} = -jV_{a1} = V_B - \frac{1}{2}e_b \quad (10)$$

$$V_{b2}' = jV_{a2} = -\frac{1}{2}e_b \quad (11)$$

$$V_b' = V_{b1} + V_{b2}' = V_B - e_b \quad (12)$$

$$I_{b1} = -jI_{a1} = -\frac{1}{2}jI_A \quad (13)$$

$$I_{b2}' = jI_{a2} = \frac{1}{2}jI_A \quad (14)$$

$$I_b' = I_{b1} + I_{b2}' = 0 \quad (15)$$

단상 유도전동기의 정상분과 역상분을 등가화 하여 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 3은 이에 대하여 정상 및 역상 등가회로를 나타낸 것으로서 정상 및 역상의 두 회로를 전원전압에 직렬로 연결함으로써 대칭분 변수에 대한 조건을 만족 시킬 수 있다.

그림 2 단상 유도전동기의 정상분과 역상분의 등가

Fig. 2 Equivalence of forward and backward component for single phase induction motor

그림 3 간략화된 단상 유도전동기의 등가회로

Fig. 3 Simply expressed equivalent circuit for single phase induction motor

이러한 단상 유도전동기의 정상분 임피던스와 역상분 임피던스를 각각 $\dot{Z}_P$, $\dot{Z}_N$ 로 하여 정상분 전압강하 V_{a1} 와 역상분 전압강하 V_{a2} 임피던스 식으로 나타내면 식 (16) 및 (17)과 같다. 단상 유도전동기의 전체 전류는 같은 경우의 2상 유도전동기의 전류와 비교하여 1/2임을 알 수 있다. 2상 유도전동기의 정상 및 역상 등가회로를 합성하면 그림 3과 같은 단상 등가회로가 된다.

$$V_{a1} = Z_P I_{a1} = \frac{1}{2} Z_P \dot{I}_A \quad (16)$$

$$V_{a2} = Z_N I_{a2} = \frac{1}{2} Z_N \dot{I}_A \quad (17)$$

2.2 포화계수를 이용한 등가회로 해석

대칭좌표법을 이용한 등가회로에 1차 임피던스와 철손을 고려하여 단상 유도전동기의 등가회로를 나타내면 그림 4와 같다. 인가전압이 각 부분의 임피던스 전압강화와 같다는 조건을 부여하여 반복적으로 계산하면 등가회로의 해석이 이루어진다.

인가전압과 전동기의 임피던스가 결정되면, 슬립과 여자전압을 결정하고, 여자전류와 1,2차 전류를 계산한다. 임피던스에서의 전압강화와 인가전압을 비교하여 반복적으로 모든 회전속도(슬립)에 대하여 전동기의 역률, 입력, 전기적 출력, 기계적 출력, 토크 및 효율 등을 구할 수 있다. 포화 계수는 그림 5에서 선형일 경우의 자화전류와 비선형일 경우의 자화전류의 비로 나타낸다.

$\dot{V}_1$: 고정자 인가전압	$\dot{I}_1$: 1차 전류
R_1 : 1차 저항	X_1 : 1차 리액턴스
$\dot{V}_f$: 정상 여자전압	$\dot{V}_b$: 역상 여자전압
$\dot{I}_{0f}$: 정상 자화전류	$\dot{I}_{0b}$: 역상 자화전류
$\dot{I}_{2f}'$: 정상 2차 전류	$\dot{I}_{2b}'$: 역상 2차 전류
X_0 : 자화 리액턴스	X_2' : 2차 리액턴스
R_2' : 2차 저항	s : 슬립

그림 4 단상유도전동기의 페이서 등가회로

Fig. 4 Equivalent circuit of Single phase induction motor using phasor

인가전압이 주어지면 정상분 자화전류와 환산된 2차 전류를 식 (18)과 (19)와 같이 계산할 수 있다. 이 전류를 이용하여 1차 전류와 1차 임피던스의 전압강하를 식 (20), (21)처럼 계산할 수 있다.

$$\dot{I}_{0f} = \frac{\dot{V}_f}{\frac{X_0}{2}} = \frac{2\dot{V}_f}{jX_0} \quad (18)$$

$$\dot{I}_{2f}' = \frac{\dot{V}_f}{\frac{R_2'}{2s} + j\frac{X_0}{2}} \quad (19)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{0f} + \dot{I}_{2f}' \quad (20)$$

$$\dot{V}_{z1} = (R_1 + jX_1) \dot{I}_1 = \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \quad (21)$$

전압분배법칙과 키르히호프의 전류법칙을 이용하여 역상분 자화전류를 나타내면 식 (22)와 같다. 역상분 2차 전류와 전압강하는 식 (23) 및 (24)와 같다. 마지막으로 전체 전압강하의 크기가 인가전압의 크기와 같게 되도록 상기의 식들을 정상분 여자전압을 반복하여 계산한다.

$$\dot{I}_{0b} = \frac{\frac{R_2'}{2(2-s)} + j\frac{X_2'}{2}}{j\frac{X_0}{2} + \left(\frac{R_2'}{2(2-s)} + j\frac{X_2'}{2}\right)} \dot{I}_1 \quad (22)$$

$$\dot{I}_{2b}' = \dot{I}_1 - \dot{I}_{0b} \quad (23)$$

$$\dot{V}_b = \left(j\frac{X_0}{2}\right) (\dot{I}_{0b}) \quad (24)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_{z1} + \dot{V}_f + \dot{V}_b \quad (25)$$

$$V_1 = |\dot{V}_1| \quad (26)$$

여기서, V_1 : 페이서 인가 전압의 크기

그림 5 전압-전류 포화 상관 곡선

Fig. 5 Saturation curve between voltage and current

전동기의 자성체 포화특성을 고려하기 위하여 식 (27)과 같은 포화계수 k_s 를 사용하였다 [15]. 선형 계산에서 정상분 전압이 주어지고 자화전류 산출시 포화계수를 이용하여 자화 리액턴스를 반복적으로 계산하여 비선형 특성을 반영한다.

$$k_s = \frac{OA}{OB} \quad (27)$$

$$\dot{I}_{0f} = k_s \dot{I}_{0f} \quad (28)$$

2.3 특성 방정식

전동기의 특성해석을 위하여 다음과 같은 특성식을 사용하였다. 전압, 전류 및 임피던스를 페이저로 표현하여 전체 임피던스와 역률을 식 (29)~(33)과 같이 계산하였다.

$$\dot{Z} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_f + \dot{Z}_b = |\dot{Z}| \angle \theta_z \quad (29)$$

$$\dot{V}_1 = |\dot{V}_1| \angle \theta_v \quad (30)$$

$$\dot{I}_1 = |\dot{I}_1| \angle \theta_i \quad (31)$$

$$\phi = \theta_v - \theta_i \quad (32)$$

$$\cos \phi \quad (33)$$

여기서,

$\theta_z, \theta_v, \theta_i$: 전체 임피던스, 전압 및 전류의 위상각

ϕ : 전압과 전류의 위상차

$\cos \phi$: 역률

전동기의 입력 P_i 과 공극에서의 정상분 출력 P_{gf} 과 역상분 출력 P_{gb} 은 다상 유도전동기와 같이 식 (34)~(36)와 같다.

$$P_i = \dot{V}_1 \dot{I}_1 \cos \phi \quad [W] \quad (34)$$

$$P_{gf} = I_{2f}'^2 \frac{R_2'}{2s} \quad [W] \quad (35)$$

$$P_{gb} = I_{2b}'^2 \frac{R_2'}{2(2-s)} \quad [W] \quad (36)$$

전기적인 출력 P_e 은 정상분 출력과 역상분 출력의 차이로 식 (37)과 같고 기계적 출력 P_m , 토크 T 및 효율 η 은 식 (38), (41) 및 (42)과 같다 [14].

$$P_e = P_{gf} - P_{gb} \quad [W] \quad (37)$$

$$P_m = (1-s) P_e \quad [W] \quad (38)$$

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_e} = \frac{1}{\omega_e} I_{2f}'^2 \frac{R_2'}{2s} \quad [N \cdot m] \quad (39)$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_e} = \frac{1}{\omega_e} I_{2b}'^2 \frac{R_2'}{2(2-s)} \quad [N \cdot m] \quad (40)$$

$$T = T_f - T_b \quad [N \cdot m] \quad (41)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \times 100 (\%) \quad (42)$$

전동기의 구속 운전시에는 슬립이 1이므로 정상 회전자계와 역상 회전자계가 같으므로 결과적으로 전동기의 합성 토크가 0이 된다. 이 때 정상분, 역상분 그리고 합성 등가회로는 그림 6과 같다.

(a) 정상분과 역상분으로 표현된 등가회로

(a) Equivalent circuit separated by forward and backward sequence

(b) 정상분과 역상분의 합성 등가회로

(b) Composite equivalent circuit of forward and backward sequence

그림 6 구속일 경우 단상유도전동기의 등가회로($s=1$)

Fig. 6 Equivalent circuit of SPIM when the rotor is rocked ($s=1$)

단상 유도전동기의 토크 특성은 서로 반대방향으로 회전하는 두 개의 전동기의 고정자 권선을 등가회로에 표시한 것과 같이, 직렬로 전원에 접속한 경우에 해당하고, 슬립이 변화하면 2개의 전동기의 고정자권선에 가해지는 전압은 변화하고 회전자계의 세기가 변화한다. 따라서 토크 특성을 $s=2$, $s=0$ 에서의 등가회로를 검토하면 확실히 알 수 있다.

전동기의 슬립이 $s=2$ 에서 $R_2'/2(2-s) = \infty$ 이므로 정상

분 전동기의 토크는 거의 0에 가깝고, 역상분 전동기의 토크는 0이다. 또한 슬립이 $s=0$ 에서 $R_2'/2s = \infty$ 이므로 정상분 토크는 0이 되고, 역상분의 토크는 거의 0에 가까운 음(-)이 되고 발전기 작용을 일으킨다. 정상분, 역상분 및 합성 토크를 식 (43)~(45)에 나타내었다. 그림 7과 8은 각 각 슬립이 2인 경우와 슬립이 0인 경우의 등가회로를 나타내며, 등가회로를 해석하는 전체적인 흐름도를 그림 9에 나타내었다.

$$T_f = 0 \quad [N \cdot m] \quad (43)$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_e} = \frac{1}{\omega_e} \cdot I_{2b}'^2 \cdot \frac{R_2'}{4} \quad [N \cdot m] \quad (44)$$

$$T = 0 - T_b = \frac{1}{\omega_e} (0 - P_{gb}) = -\frac{1}{\omega_e} \left(I_{2b}'^2 \cdot \frac{R_2'}{4} \right) [N \cdot m] \quad (45)$$

그림 7 $s=2$ 일 때 단상유도전동기의 등가회로
Fig. 7 Equivalent circuit of SPIM at $s=2$

그림 8 $s=0$ 일 때 단상유도전동기의 등가회로
Fig. 8 Equivalent circuit of SPIM at $s=0$

그림 9 등가회로 해석을 위한 흐름도
Fig. 9 Flowchart for analysis of equivalent circuit

3. 특성 해석

단상 유도전동기의 회로정수를 이용하여 등가회로를 구성하고 포화계수를 이용하여 포화특성을 고려한 단상유도전동기 해석을 수행하였다. 해석 대상 전동기는 John H. Kuhlmann 에 의하여 설계된 전동기를 일부 수정하여 등가회로 해석을 수행하였다 [15]. 그림 9의 수순에 의해 여자전압과 슬립에 대하여 조건을 만족할 때까지 반복적으로 해석을 진행하였으며 대상 전동기의 상세구조 및 치수는 그림 10과 표 1에 나타내었다. 또한, 전동기의 회로정수는 표 2와 같다.

(a) 전동기의 형상
(a) Shape of the motor

(b) 고정자 및 회전자 슬롯의 세부 치수
(b) Dimensions of stator and rotor slot

그림 10 해석 대상 단상 유도전동기(1/2 HP)

Fig. 10 Single phase induction motor for analysis(1/2 HP)

표 1 해석 전동기의 설계치수

Table 1 Design sheet of the single phase induction motor

설계 치수	값	설계치수	값										
고정자 슬롯수	36	w_s	9.73 mm										
회전자 슬롯수	26	h_s	17.27 mm										
고정자 치피치	9.70 mm	n_s	0.76 mm										
회전자 치피치	13.34 mm	t_s	0.89 mm										
고정자 외경 D_s	184.15 mm	i_s	2.39 mm										
고정자 내경 D_{si}	111.13 mm	w_r	6.44 mm										
회전자 외경 D_r	110.46 mm	i_r	2.39 mm										
축방향 길이 l	65.02 mm	n_r	2.17 mm										
공극 길이 g	0.67 mm	h_r	12.71 mm										
권선매치 및 권회수	슬롯번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
	주권선	16 30 40 46 46 40 30 16 ...											
	보조권선	30 28 23 14 ... 14 23 28 30 28 ...											

표 2 해석 전동기의 회로 정수

Table 2 Circuit parameter of single phase induction motor for analysis

회로정수	값	단위
극수 P	4	-
주파수 f	50	Hz
인가전압 V_1	230	V
1차 저항 R_1	2.3	Ω
1차 리액턴스 X_1	3.2	Ω
2차 저항 R_2'	4.2 / 5.46	Ω
2차 리액턴스 X_2'	3.2	Ω
자화리액턴스 X_0	74	Ω
슬립 범위 s	0~2	-

그림 11은 제안한 방법을 이용한 단상 유도전동기의 전류특성 해석 결과로 1차측 권선전류(I_1), 2차측 출력전류 정상분(I_{2f})과 역상분(I_{2b}), 및 자화전류의 정상분(I_{0f})과 역상분(I_{0b})을 나타낸 것이다. 단상 유도전동기의 토크는 정상분과 역상분의 합으로 나타내어지므로 기동시($s=1$)에는 토크가 0이고, 동기속도($s=0$)에서는 음(-)의 토크를 나타내는 것을 그림 12에서 볼 수 있다.

그림 11 전류 특성(1차측 전류, 자화전류 및 환산된 2차측 전류)

Fig. 11 Currents characteristics(1st winding, magnetization and converted 2nd current)

그림 12 슬립에 따른 토크 특성

Fig. 12 Torque characteristics for slip changes

전동기의 전기적인 출력은 슬립의 변화에 따라 정상분과 역상분의 공극출력의 차이로 표현되고, 그 결과를 출력 특성에 많은 영향을 미치는 2차 저항의 변화에 따라 그림 13에 각각 나타내었다.

(a) 정상분 출력
(a) Forward sequence

(b) 역상분 출력
(b) Backward sequence

그림 13 슬립 변화에 따른 전기적 출력

Fig. 13 Electrical output power for slip changes

그림 14와 15는 2차 저항 변화에 따른 전동기의 기계적 출력과 효율을 슬립영역에 대하여 나타내었다. 전동기의 출력이 최대인 속도 영역에서 효율 또한 최대를 나타내었고 동기속도에 가까울수록 효율이 증가되는 특성을 볼 수 있다.

그림 14 슬립 변화에 따른 기계적 출력

Fig. 14 Mechanical output for slip changes

그림 15 슬립 변화에 따른 효율

Fig. 15 Efficiency for slip changes

이상의 결과에서 보듯이 속도-토크 특성은 출력에 의하여 결정되고, 출력은 정상분과 역상분의 전류 및 회로정수들에 의하여 결정된다. 단상 유도전동기는 다상 유도전동기와 달리 기동시에 기동토크가 발생하지 않고, 동기속도에서는 두 전동기설에 의해 음의 토크를 나타낸다. 그러므로 본 방법에서 계산된 속도-토크 특성이 정성적으로 타당성이 있으며, 이는 제한한 방법의 유용성을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다상 유도전동기로부터 대칭좌표법을 이용하여 단상 유도전동기의 회로정수를 유도했으며, 전압과 전류의 포화특성을 등가회로 해석에 반영하였다. 이러한 해석 방법은 단상 유도전동기의 설계나 특성 해석시 복잡하고 시간이 오래 걸리는 구조해석과 달리 쉽고 빠르게 반복적인 계산을 통하여 특성을 알아 볼 수 있다. 특성 해석 결과는 단상 유도전동기를 설계할 때에 2상 또는 3상과 비교하여 특성을 비교할 수 있으며, 포화도 비율을 설계에 반영하여 특성도출 및 개선을 할 수 있으리라 생각된다. 향후 제안한 방법의 정량적 검증은 위하여 수치해석이나 실험을 통한 비교 검증이 필요하다고 사료된다.

References

- [1] Y. Kim, I. Park, and K. Lee, "Equivalent Circuit Analysis for Single Phase Induction Motor using Voltage-Current Saturation", An autumn Conference of KIEE, Changwon, Nov. 2007.
- [2] Y. Kim, B. Lee, and K. Lee, "Dynamic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motors using Finite Element Method", The Transactions of the KIEE, Vol. 47, No. 8, pp. 1154-1161, 1998.
- [3] Y. Kim, and K. Lee, "Current and Torque Calculation for Single Phase Induction Motor", A Summer Conference of the KIEE, Seogwipo, Jul. 2002.
- [4] Shoji Isobe, Electrical Machine Design, Development Inc., 1988.
- [5] Taro Hisashi Takeuchi, Electric Design for University, Dongil Press, 1994
- [6] Kailchro Hlrayama, "Practical Detailed Model for

- Generators", IEEE Power Engineering Review, Vol. 15, No. 3, Mar. 1995.
- [7] Orlando Silvio Lobosco, "Modeling and Simulation of DC Motors in Dynamic Conditions Allowing for the Armature Reaction", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, Dec. 1999.
- [8] Roderick N. Ebben, "Performance Curves of a Series DC Motor Predicted Using Parameter Finite Element Analysis", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, May 1999
- [9] M. G. Say, E. Openshaw Taylor, Direct Current Machine, Pitman, 1980.
- [10] M. Marinescu and N. Marinescu, "Calculation of Steady State Performance for Small Commutator Permanent Magnet DC Motor : Classical and Finite Element Approaches," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, pp. 2067-2071, Sep. 1992.
- [11] M. Marinescu and N. Marinescu, "Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors by Maxwell Stresses and Energy Method," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 24, No. 1, pp. 463-466, 1988.
- [12] P. S. BIMBHRA, Generalised circuit theory of electrical machines, Khanna, 1975.
- [13] Paul C. Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [14] S. Hwang, Unified Analysis of Electrical Machines, Dongil Press, Seoul, 2003.
- [15] John H. Kuhlmann, Design of Electrical Machines, Moonundang, Seoul, 1962.

저 자 소 개

김 영 선 (金 榮 善)

1970년 10월 15일생. 1997년 단국대학교 전기공학과 석사. 2006년 동 대학원 전기공학과 박사. 2002년-2005년 한국교육과정평가원 연구원. 2006년-2010년 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수. 2010년-2011년 MIT Post-Doc. 2012-현재 중부대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야 : 에너지 변환 공학, 전기기기, 다중물리융합 해석.

Tel : 041-750-6279

Fax : 041-750-6402

E-mail : yskim@joongbu.ac.kr