

등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 회로정수 산정 및 특성해석

論 文
49B-11-2

Circuit Parameters and Characteristic Analysis of Condenser Run Single Phase Induction Motor by Combine Equivalent Circuit with Numerical Method

姜圭洪* · 河京鎬** · 洪正杓*** · 金奎卓[§] · 鄭承奎^{§§}
(Gyu-Hong Kang · Kyung-Ho Ha · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim · Seung-kyu Jeong)

Abstract - This paper describes the calculation of the equivalent circuit parameters and the characteristic analysis of a capacitor-run type single-phase induction motor by means of the finite element method in coupled with the conventional equivalent circuit model. The circuit parameters of the stator are calculated from the lumped parameter and the slot leakage reactance of the rotor with the closed slot can be obtained by the use of slot pitch boundary condition. From the analysis result using this combined equivalent circuit and finite element method which is used slot pitch boundary condition is compared with the experimental results, the validity of the method is proved.

Key Words : FE analysis, unbalanced magnetic field, slot pitch boundary condition

1. 서 론

단상 유도전동기는 상용화된 전원을 변환장치 없이 직접 사용할 수 있어 가전제품의 전 분야의 동력원으로 사용되고 있다. 특히 콘덴서 구동 단상유도전동기는 다른 단상유도기에 비해 효율이 높고 기동특성이 우수하여 경제적이면서도 고 효율화를 위한 제품의 구현에 적합하다[1-2]. 콘덴서 구동형 단상 유도전동기는 보조권선에 콘덴서를 결합한 구조로써 주권선과 보조권선의 기자력 차에 의해 평형 다상기와는 달리 불평형의 타원 자계가 형성된다. 따라서 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 등가회로 구성은 회전자계설의 이론을 바탕으로 불평형 상태를 해석하기 위해 불평형 상태를 각각의 대칭성분으로 분해해서 해석하는 대칭좌표계법 (symmetrical-coordinate method)을 이용한다[2-4].

등가회로를 구성하기 위한 회로정수 산정시 고정자측 저항 및 누설리액턴스는 기존의 회로정수식을 이용하였으며 슬롯 누설리액턴스는 슬롯의 형상에 따라 슬롯 상수를 구하여 산정하는 방법을 적용하였다. 또한 등가회로 해석의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 여자리액턴스 산정은 기존의 포화계수 값을 슬롯에 상관없이 일정하게 부여하여 계산하는 기존의 방

법과는 달리 전 슬롯에 대하여 포화계수에 초기 값을 설정하여 임의의 여자리액턴스를 결정한 후, 단상유도기 회로방정식으로부터 이를 반복 계산하여 수렴시키는 방법으로 계산하였다[5]. 그러나 폐슬롯 구조의 회전자에 대해서는 각 슬롯에 따른 브릿지 부분의 포화정도를 정확하게 산정할 수 없어 회전자측 누설리액턴스를 정밀하게 산정하기는 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전자계 수치해석적인 방법으로 유한요소해석을 통하여 회로정수를 산정할 수 있다. 기존의 단상유도기의 유한요소 해석방법은 한 극분의 고정자와 회전자를 모델링해야 하고 타원자계를 고려하기 위해서는 시간 차분근사식을 적용해야하므로 계산기의 용량 증가 및 계산 시간 증가 등의 문제점이 있다[6].

따라서 본 논문에서는 회전자측의 회로정수를 산정하기 위해서 회전자의 슬롯 하나만의 모델링으로 자계 해석을 수행하는 Slot pitch boundary condition을 등가회로 해석과 결합하여 반복 적용하는 방법으로 산정하였다[7-8]. 등가회로법과 Slot pitch boundary condition의 결합에 의한 회로정수를 이용하여 특성 해석한 결과를 실험에 의한 결과와 비교, 분석하여 타당성을 입증하였다.

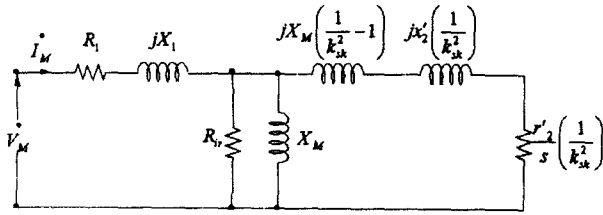
2. 등가회로법에 의한 특성해석

2.1 단상유도기의 등가 회로

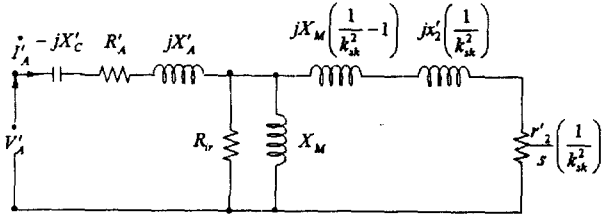
콘덴서 구동형 단상유도기의 각 권선에는 공통전원이 인가되고있고, 주권선, 보조권선의 도체수는 각각 Z_m, Z_a 이며, 보조권선에는 기동 토크의 증대와 역률 개선을 위하여 감열 저항 소자를 이용한 저항기(PTC)와 콘덴서가 삽입되어 있다.

콘덴서구동형 단상유도기의 주권선 및 보조권선의 등가회

* 正會員 : 昌原大 電氣學科 博士課程
 ** 正會員 : 昌原大 電氣學科 博士課程
 *** 正會員 : 昌原大 電氣學科 助教授 · 工博
 § 正會員 : 昌原大 電氣學科 副教授 · 工博
 §§ 正會員 : LG電子 디지털 어플라이언스 事業本部研究所 · 責任研究員
 接受日字 : 2000年 10月 31日
 最終完了 : 2000年 3月 29日



(a) 주권선의 등가회로



(b) 주권선에 대해 치환된 보조권선의 등가회로

그림 1 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of capacitor-run single phase induction motor

로를 구성하여 공통으로 인가되는 전원을 분리한 뒤, 보조권선을 주권선에 대해 치환하면, 그림 1과 같은 등가회로를 구성할 수 있다[1-2].

여기서 $a = k_{wa} Z_a / r k_{um} Z_m$, $I'_a = a I_a$, $V'_a = V_a / a$ 를 나타내고, $k_{um} Z_m$, $k_{wa} Z_a$ 는 주권선, 보조권선의 유효도체수, k_{um} , k_{wa} 는 권선계수를 나타낸다. 그리고, 주권선에 대해 치환된 보조권선의 고정자 저항 및 리액턴스 R'_A , X'_A 와 PTC 저항 및 콘덴서 리액턴스 R_{PTC}' , $-jX'_C$ 은 다음과 같은 값을 가진다.

$$R'_A = \frac{R_A}{a^2}, \quad X'_A = \frac{X_A}{a^2} \tag{1}$$

$$R_{PTC}' = \frac{R_{PTC}}{a^2}, \quad -jX'_C = -j \frac{X_C}{a^2}$$

보조권선을 주권선에 대해 치환함으로써 보조권선과 주권선의 2차측 회로정수는 같고, 1차측 회로정수는 다르게 된다. 또한, 공통적으로 인가되는 입력전원을 독립된 전원으로 분리하였으므로 콘덴서 구동형 단상유도기를 주권선과 보조권선으로 이루어진 불평형 임피던스에 불평형 전원이 인가된 상태인 2상전동기로 생각할 수 있다. 이와 같은 불평형 상태를 고려하기 위하여 본 논문에서는 대칭좌표계법을 도입하여 해석하였다[2-4].

2.2 집중정수에 의한 회로정수의 산출

등가회로 해석에 의한 단상유도기의 특성해석을 위해서는 정확한 회로정수의 산출이 요구된다. 따라서 1차측과 2차측 저항 및 누설리액턴스를 세분화하여 산정하였고 여자회로는 철심의 포화율 고려하여 철손 저항과 여자리액턴스를 산정하였다. 각각의 회로정수 산정 과정은 다음과 같다[2][10].

2.2.1 고정자 권선 및 회전자 도체 저항

고정자 주권선의 저항 R_1 은 온도를 고려하여 운전상태에서의 온도 T_D °C에서 식 (2)와 같이 주어진다. 이때 상온의 온도는 T_R °C이다[4].

$$R_1 = K_r \frac{2L_m P \sum Z_i}{\sigma_{cu} S_m} \times \frac{234.5 + T_D}{234.5 + T_R} [\Omega] \tag{2}$$

여기서, L_m 은 도체 한 개에 대한 평균길이로서 고정자의 적층 길이와 가중평균 코일피치로부터 계산한 코일단(coil end)부분의 평균 길이로부터 계산하였다.

고정자 보조권선의 저항도 주권선 저항과 동일한 방법을 적용하였다. 회전자와 엔드링의 구조를 그림 2에 나타내었다. 회전자 도체 바의 저항은 온도 T_D °C일때를 기준으로 도체 바와 엔드링의 저항을 각각 구하고 1차측에 대해서 환산하면 다음과 같다[3].

$$r'_2 = m \frac{Z_{eff}^2}{N_R} (R_B + R_E) \times \frac{234.5 + T_D}{234.5 + T_R} [\Omega] \tag{3}$$

$$R_B = \frac{L_b}{\sigma_{Al} N_R S_b} \times K_{skr}$$

$$R_E = \frac{R_E'}{2 \sin^2 \left(\frac{\pi P}{2N_R} \right)}, \quad R_E' = \frac{L_e}{\sigma_{Al} S_e}$$

여기서, K_{skr} 는 저항의 표피효과 보정계수를 나타내고 엔드링 둘레의 평균길이 L_e 는 엔드링 중심의 평균직경 D_e 와 회전자 슬롯수 N_R 을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_e = \pi D_e / N_R \tag{4}$$

$$D_e = D_{OR} - H_R$$

여기서 D_{OR} 은 회전자의 외경, H_R 은 회전자 슬롯의 깊이를 나타낸다

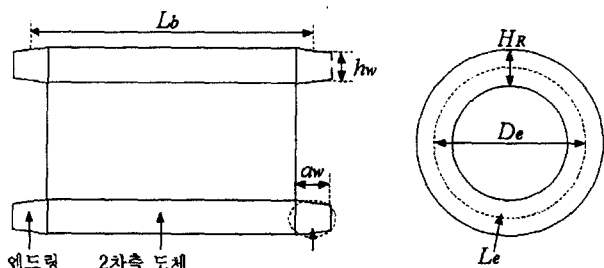


그림 2 회전자의 구조
Fig. 2 Structure of rotor

2.2.2 누설리액턴스

누설리액턴스는 슬롯, 엔드링, 지그재그, 스퀘리액턴스로 세분화하여 각각에 대해서 산정하였다.

(a) 슬롯 누설리액턴스

슬롯 누설리액턴스는 한 슬롯의 깊이에 대한 폭의 비로서 정의되는 슬롯상수(λ_{ss})로 부터 계산하였다. 1차측 주권선의 슬롯누설 리액턴스 X_{ss} 는 식 (5)와 같이 주어진다[2][4].

$$X_{ss} = 2\pi f\mu_0 L_s Z_{SP} \lambda_{ss} \quad [\Omega] \quad (5)$$

1차측의 주권선에 대해 환산된 2차측 슬롯누설 리액턴스 X_{rs} 는 다음과 같다[2][4].

$$X_{rs} = m \frac{Z_{eff}^2}{N_R} \cdot 2\pi f\mu_0 L_r \lambda_{rs} \times K_{skx} \quad (6)$$

(b) 엔드링 누설리액턴스

고정자측 엔드링 누설리액턴스 X_{se} 는 식 (7)과 같다[4].

$$X_{se} = 2Pf \left(\frac{Z_{ST}}{2P} \right)^2 \cdot \lambda_{se} \times 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$\lambda_{se} = 15.8 \left\{ 0.47L_c - \frac{0.3\pi(D_{IS} + H_s)}{P} \right\}$$

1차측에 대해 환산된 2차측 엔드링 누설리액턴스 X_{re} 는 식 (8)로 주어진다[4].

$$X_{re} = \frac{f Z_{eff}^2 L_r \lambda_{e2}}{N_R} \times 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (8)$$

$$\lambda_{e2} = \frac{1.83D_e}{P^2} \log_{10} \left[\frac{2.4D_e}{(a_r + h_r)} \right]$$

(c) 지그재그 누설리액턴스

공극을 통하여 고정자와 회전자의 치부분을 지그재그로 통과하는 자속에 의한 누설 리액턴스 X_z 로서 식 (9)와 같이 쓸 수 있다[2].

$$X_z = 2\pi f\mu_0 L_s Z_{SP} \lambda_z \quad [\Omega] \quad (9)$$

$$\lambda_z = \frac{2}{3} \frac{k_z^2}{\delta \cdot Q} \quad , \quad Q = \frac{t_s + t_r}{2}$$

$$t_s = \pi(D_{IS} - \delta)/N_s \quad , \quad t_r = \pi(D_{IS} - \delta)/N_R$$

$$k_z = Q \left[\frac{(u_1 + u_2)}{2Q} - \frac{1}{2} \right]$$

$$u_1 = t_s - c_s + 2k_{\delta 1} \delta \quad , \quad u_2 = t_r - c_r + 2k_{\delta 2} \delta$$

$$k_{\delta 1} = 0.6 + \log_{10} \left(\frac{c_s}{2\delta} \right) \quad , \quad k_{\delta 2} = 0.6 + \log_{10} \left(\frac{c_r}{2\delta} \right)$$

(d) 스퀘 누설리액턴스

회전자에 사구슬롯(skewed slot)을 사용하면 고정자의 코일면에 대하여 회전자의 코일면이 서로 틀어지게 되어 이 부분을 누설자속이 통과하게 되는데 이 자속량이 스퀘누설 X_{sk} 로서 식 (10)과 같이 쓸 수 있다[3].

$$X_{sk} = X_M \left\{ 1 - \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{N_{sk} \pi P}{N_R}$$

여기서 N_{sk} 는 회전자 슬롯 피치로 나타낸 스퀘량이다.

위의 결과로부터 고정자측의 주권선 누설리액턴스 X_1 및 회전자측의 누설리액턴스 x_2' 은 식 (11) 및 식 (12)와 같이 계산하였다[4].

$$X_1 = X_{ss} + X_{se} + \frac{X_z + X_{sk}}{2} \quad (11)$$

$$x_2' = X_{rs} + X_{re} + \frac{X_z + X_{sk}}{2} \quad (12)$$

보조권선의 누설리액턴스도 주권선의 누설리액턴스와 동일한 방법으로 산정하였다.

2.2.4 여자리액턴스

단상유도전동기의 여자리액턴스는 식 (13)으로 부터 산정하였다[5].

$$X_M = 0.6 \frac{f L_s \tau_P (Z_{eff}/2)^2}{P K_C K_{sat} \delta} \times 10^{-5} \quad [\Omega] \quad (13)$$

$$\tau_P = \frac{\pi(D_{OR} + \delta)}{P}$$

여기서, τ_P 는 극간격을 나타낸다.

식 (13)의 K_C 는 전동기의 슬롯 구조로 인한 공극내 자기적인 영향을 보정하기 위하여 보정계수인 카터계수로서 직교사상(conformal mapping)에 의해 유도된 식은 다음과 같다[2][5].

$$K_C = \frac{t_s}{t_s - \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{c}{2} \tan^{-1} \left(\frac{c}{2\delta} \right) - \delta \ln \left[1 + \left(\frac{c}{2\delta} \right)^2 \right] \right\}} \quad (14)$$

여기서 c 는 개구폭을 나타낸다.

그리고, 포화계수 K_{sat} 는 전동기 철심 내에서의 기자력 손

실에 해당하는 양을 공극 길이가 증가된 것으로 보정한 계수로서 식 (15)와 같이 정의하였다.

$$K_{sl} = \frac{[AT]_g + [AT]_c}{[AT]_g} \quad (15)$$

여기서 $[AT]_g$ 는 공극에서의 기자력 손실이고, $[AT]_c$ 는 철심에서의 기자력 손실을 나타낸다.

회로방정식에서 산정한 역기전력으로부터 자속 및 철손 저항을 구하고 포화계수를 재 선정하는 과정으로부터 포화계수를 산정하여 특성해석을 수행하였다[5].

2.3 특성계산식

전동기의 전체 토크는 정상분 토크와 역상분 토크의 차로써 계산되고 이를 동기와트로 표현하면 식 (16)과 같다[4][5].

$$T = \frac{100}{9.8} \frac{60}{2\pi N_0} (P_{2P} - P_{2N}) \text{ [kgf} \cdot \text{cm]} \quad (16)$$

여기서, N_0 는 동기속도 [rpm]이고, P_{2P} , P_{2N} 은 각각 정상분 및 역상분의 2차측 출력으로 식 (17), (18)과 같다[1][5].

$$P_{2P} = \frac{r_2'}{s} \cdot |I_{2P}'|^2 \quad (17)$$

$$P_{2N} = \frac{r_2'}{2-s} \cdot |I_{2N}'|^2 \quad (18)$$

$|I_{2M}'|$, $|I_{2P}'|$ 은 각각 정상분 및 역상분의 2차측 입력전류를 나타낸다.

전동기의 기계적 출력(P_0) 및 효율은 다음과 같다[1][5].

$$\eta = \frac{P_0}{VI_L \cos \theta} \quad (19)$$

$$P_0 = 2\pi \frac{N}{60} T = 0.10474NT \text{ [W]} \quad (20)$$

3. 수치해석적인 방법에 의한 2차측 회로정수 산정

위의 회로정수 산출과정에 있어서 페슬롯 구조의 회전자에 브리지 부분의 포화정도를 회로정수 산정에 반영할 수 없으므로 슬롯 누설리액턴스를 정밀하게 산정하는 데에는 상당히 어렵다. 따라서 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 회전자의 저항 및 누설리액턴스 산정하기 위하여 수치해석적인 방법으로 Slot pitch boundary condition을 적용하여 2차측 회로정수를 산정하였다[6-8].

3.1 유한요소 해석방법

그림 4는 유한요소해석과 등가회로를 결합한 것을 나타내

는 것으로서 2차측 회로정수 즉, 2차측 도체의 저항 및 누설 리액턴스는 유한요소해석을 통하여 계산하였다. 유한요소해석과 등가회로를 결합한 계산과정을 그림 5에 나타내었다.

3.2 유한요소 해석에 의한 2차측 회로정수 산정

초기 등가회로로부터 계산된 2차측 전류 \vec{I}_b 와 2차측 임피던스 \vec{Z}_b 로부터 공극의 자속밀도는 식 (21)과 같다[9].

$$\vec{B} = \frac{2p}{wdw} \vec{I}_b \vec{Z}_b \quad (21)$$

암페어의 법칙(Ampere's law)를 이용하여 회전자 도체의 전류 및 고정자 전류와 공극 자속밀도의 관계를 보면 식 (22)와 같다[9].

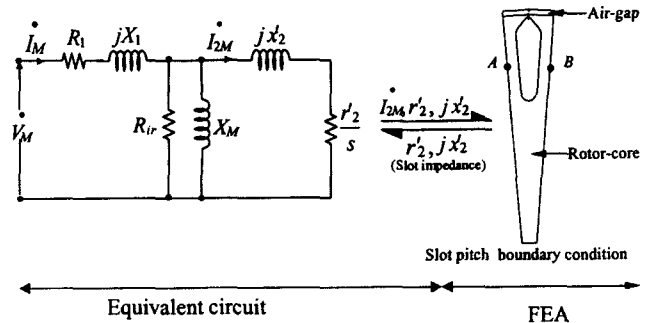


그림 4 유한요소해석과 등가회로의 결합
Fig. 4 Equivalent circuit coupled with finite element analysis of slot pitch boundary condition

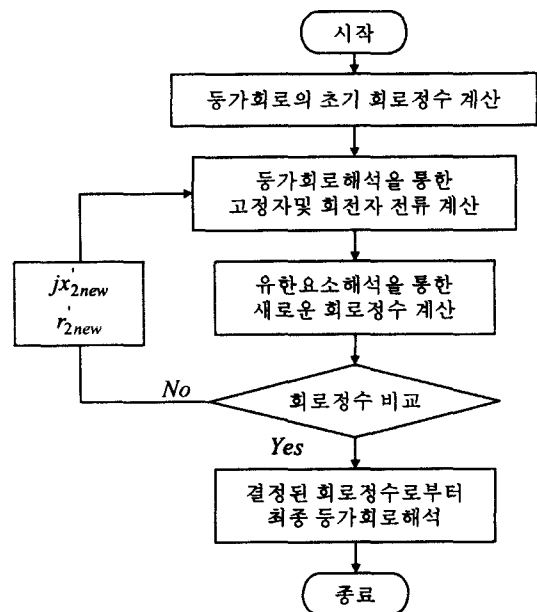


그림 5 계산 과정
Fig. 5 Analysis procedure of coupled problem

$$\vec{J}_s + \frac{N_b \vec{I}_b}{\pi d} = -j \frac{2 p g_e}{d \mu_0} \vec{B}$$

$$\vec{J}_s = -\frac{\vec{I}_b}{\pi d} \left\{ N_b + j \frac{4 \pi p^2 g_e}{\mu_0 d \omega w} \vec{Z}_b \right\} \quad (22)$$

여기서, 초기의 도체의 임피던스 \vec{Z}_b 와 도체의 전류 \vec{I}_b 는 집중 정수 회로를 이용한 등가회로로부터 계산된 값을 입력하여 고정자 표면전류 밀도 \vec{J}_s 를 계산하였다. 등가회로로부터 구한 2차측의 상당 전류 \vec{I}_{2M} 과 상당 임피던스 \vec{Z}_2 를 이용하여 도체 1개에 흐르는 전류 \vec{I}_b 및 임피던스 \vec{Z}_b 를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\vec{I}_b = \frac{m Z_{eff}}{N_r} \cdot \vec{I}_{2M}, \quad \vec{Z}_b = \frac{N_r}{m Z_{eff}} \cdot \vec{Z}_2$$

따라서, 한 슬롯피치 유한요소 해석 모델에 고정자 표면전류를 인가하고 고정자 표면 전류를 고정자 내경의 표면에 분포시켜 유한요소 해석을 수행하였다. 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다[5-7].

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_s - j \sigma \omega \vec{A} \quad (23)$$

회전자의 회로정수를 산정하기 위해 한 슬롯만을 해석 영역으로 선정된 후 양 변 A 와 B 에 다음과 같은 슬롯 피치 경계조건을 적용하였다[7-8].

$$A = B e^{-j \frac{2 \pi b}{N_r}} \quad (24)$$

비선형 해석의 전자계 해석으로부터 해석모델 영역내의 투자율과 도체 내부의 국소적인 전류밀도 \vec{J}_b 를 계산한다. 비선형 해석으로부터 결정된 도체 내부에 전류밀도를 인가하고 각 요소에서의 투자율을 이용하여 선형해석을 수행한 후 도체의 저항과 슬롯 누설리액턴스를 계산하였다. 도체 한 개에 대한 누설인덕턴스는 슬롯, 브리지 및 공극에서의 누설리액턴스를 합한 값으로 회전자의 총 누설 리액턴스 계산은 다음과 같다[9].

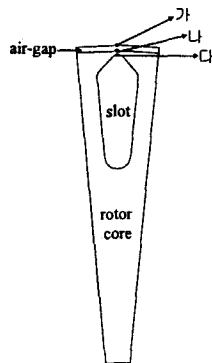


그림 6 회전자 슬롯 한 개에 대한 모델
Fig. 6 One slot model of rotor

- 슬롯 누설리액턴스 : $L_{slot} = \frac{w}{\mu_0 I_b^2} \int_{S_s} \vec{B}^2 dS$
- 브리지누설리액턴스 : $L_{bridge} = \frac{w}{I_b} \text{Re}(\vec{A}_u - \vec{A}_d)$
- 공극 누설리액턴스 : $L_{bridge} = \frac{w}{I_b} \text{Re}(\vec{A}_g - \vec{A}_u)$
- 전체 슬롯 누설 : $L_b = L_{slot} + L_{bridge} + L_{air} \quad (25)$

여기서 \vec{A}_g , \vec{A}_u 및 \vec{A}_d 는 고정자 내경, 회전자 외경 및 회전자 슬롯의 끝단부에서의 자기벡터포텐셜이다. 도체 한 개당 2차측 저항의 산정은 다음과 같다[9].

$$R = \frac{\int_v \frac{1}{\sigma} \vec{J}_b^2 \cdot dv}{I_b^2} \quad (26)$$

4. 해석결과 및 분석

유한요소 해석에 적용한 단상유도기의 제원은 다음과 같다.

표 2 해석모델에 대한 제원
Table 2 Specification of the analysis model

세부항목	치수	세부항목	치수
인가전압	115[V]	출력	160[W]
주 파 수	60[Hz]	극수	2
고정자슬롯 개구폭	2.1[mm]	캐패시터 용량	12[μF]
고정자 외경	118[mm]	고정자 슬롯수	24
회전자 외경	60[mm]	고정자 적층길이	48[mm]

회전자의 슬롯은 폐슬롯 형태로 그림 7과 같으며 2차측 도체의 단면적은 $15.88[mm^2]$ 이다. 그림 8은 해석 대상 단상 유도전동기의 형상을 나타내고 코일은 동심권으로 감겨져 있다.

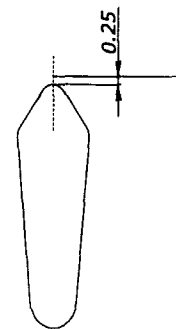


그림 7 회전자 슬롯 형상
Fig. 7 Shape of rotor slot

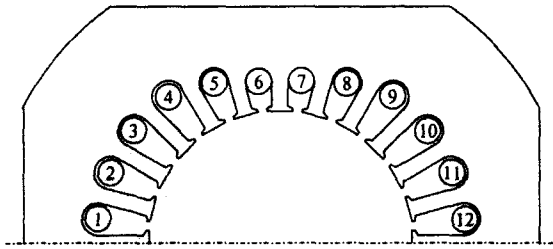


그림 8 고정자의 구조
Fig. 8 Stator structure

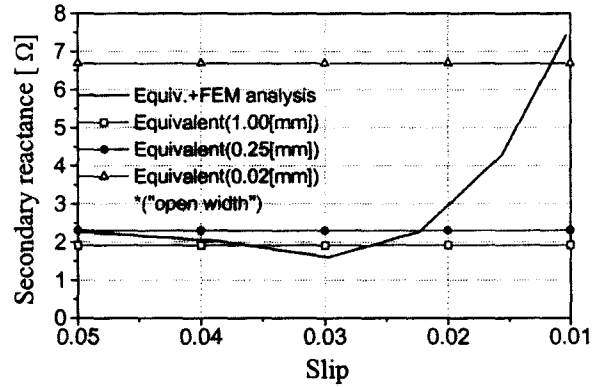
4.1 회로정수 산정 결과

표 3, 4는 각각 정격 부하 및 정격슬립에 대한 파라미터를 실험 결과와 비교한 것이다. 실험치는 구속시험과 무부하 시험을 통한 결과이고 등가회로에서 2차측 슬롯의 브리지부분은 완전히 포화되어 open된 것으로 가정하고 opening폭을 변경하면서 회로정수를 산정하였다.

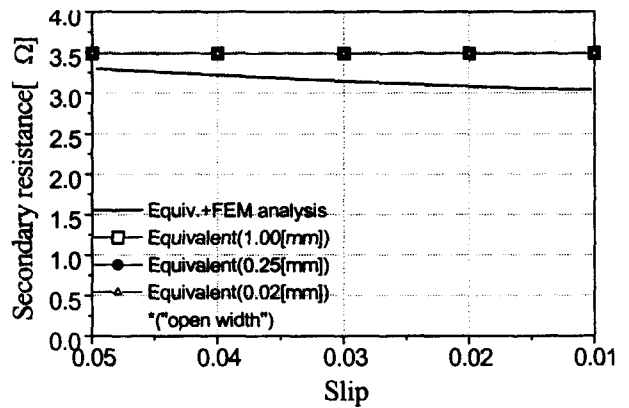
표 3 정격슬립에 대한 회로정수 비교
Table 3 Parameter comparison at the rated slip

회로정수	등가회로		등가회로 + FEM
2차슬롯의 브릿지 개구폭 [mm]	1	0.25 0.02	0.27
2차측저항 [Ω]	3.48	3.48 3.48	3.09
2차측누설 리액턴스 [Ω]	1.91	2.30 6.69	2.27
철손저항 [Ω]	2381.8	2380.8 2391.8	2381.8
여자리액턴스 [Ω]	129.96	132.63 132.66	132.73

집중정수로 고려한 등가회로 해석의 회로정수 산정 결과 2차측 회로정수는 슬롯 opening의 폭에 따라 큰 차이가 발생한다. 이는 포화의 정도에 따라 opening폭을 다르게 선택해야 하는 문제가 있고 또한 슬립의 변화에 따라 포화의 정도는 다르게 나타나므로 2차측 회로정수를 슬립 전영역에서 정밀하게 산정하기는 어렵다. 등가회로법과 유한요소 해석을 결합한 경우 슬립에 따라 2차회로정수의 변화를 그림 9에 나타내었다. 무부하에 가까운 슬립 영역에서 공극의 자속의 상당 부분은 2차측 도체에 채워지지 못하고 브리지 부분을 통과하므로 브리지 부분의 누설리액턴스는 커지고 심한 포화 현상을 일으킨다. 슬립이 커지면서 브리지 부분의 채워 자속량은 줄어들어 브리지 누설리액턴스는 감소하게 되고 도체바와 채워하는 자속량은 증가하여 2차측 도체바에 유기되는 유기 기전력은 증가한다. 이때 슬립이 증가하면서 2차측 도체바와의 채워 자속량의 증가로 도체바에는 표피효과가 커지게 되어 저항은 점점 커지게 된다.



(a) 2차측 누설리액턴스의 변화



(b) 2차측 저항의 변화

그림 9 슬립변화에 따른 2차측 회로정수의 변화
Fig. 9 Variation of secondary parameter according to slip

4.2 특성해석 결과

그림 10에서 그림 17은 본 논문에서 제시하고 있는 해석 기법을 이용하여 해석한 결과로서 슬립에 따른 제반 특성을 실험치와 비교하여 나타내었다. 해석대상의 실험에 의한 최대토크는 14.6[kgf·cm]이고 등가회로와 유한요소해석을 결합한 경우에는 14.1[kgf·cm]로 약 0.5[kgf·cm]의 오차를 지니고 있다.

그림 18, 19는 정격 슬립 0.023 부근에서의 토크 및 출력 특성을 비교하였다. 2차 회로정수의 변화는 정격 부근에서도 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 소형 기기에서 효율 향상을 위해서는 정격부근에서의 특성해석 정도가 아주 정밀해야 한다. 따라서 기기의 해석 정도를 향상시키기 위해서는 2차측 회로 정수의 정밀한 산정이 요구됨을 알 수 있고 등가회로법과 유한요소해석을 결합한 경우 특성 해석의 정도가 향상됨을 알 수 있다. 집중정수로 고려한 등가회로의 슬립에 대한 특성 해석 결과 2차측 누설리액턴스는 그 변화량이 미소하여 거의 일정한 값을 가진다. 그러나 유한요소해석과 결합시 2차측 누설리액턴스는 슬립이 작은 영역에서 정격 슬립까지는 급격히 감소하나 정격슬립이후 영역에 대해서는 서서히 증가하는 양상을 띄게 그 변화량이 심하게 나타났다.

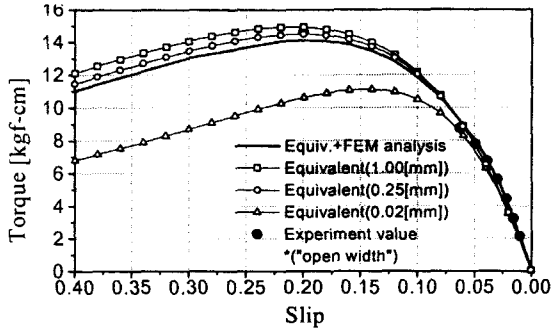


그림 10 슬립-토크 특성
Fig. 10 Slip-torque characteristic

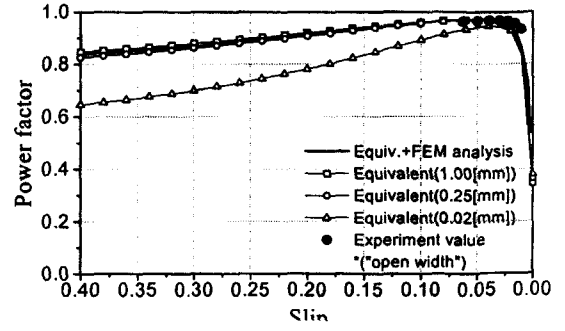


그림 14 슬립-역률 특성
Fig. 14 Slip-power factor characteristic

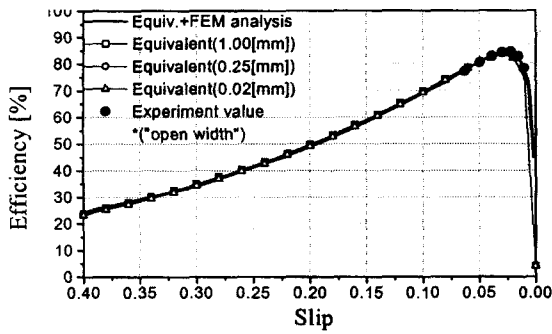


그림 11 슬립-효율 특성
Fig. 11 Slip-efficiency characteristic

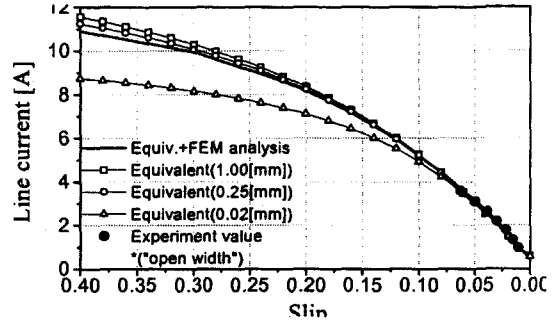


그림 15 슬립-선전류 특성
Fig. 15 Slip-line current characteristic

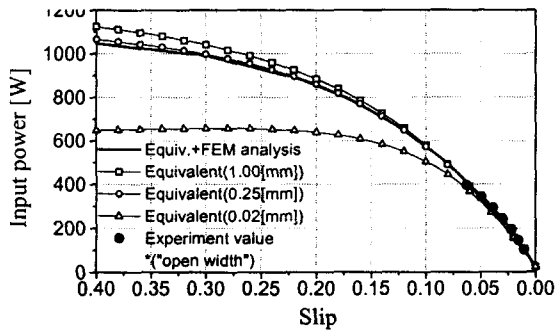


그림 12 슬립-입력 특성
Fig. 12 Slip-input power characteristic

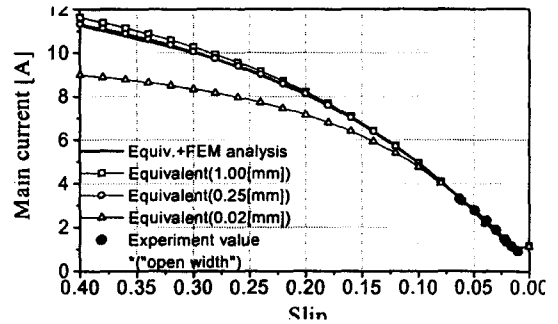


그림 16 슬립-주권선 전류 특성
Fig. 16 Slip-main winding current characteristic

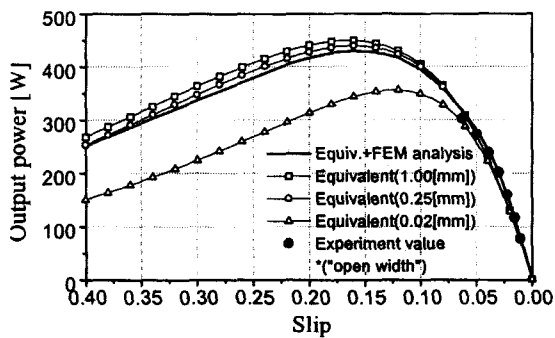


그림 13 슬립-출력 특성
Fig. 13 Slip-output power characteristic

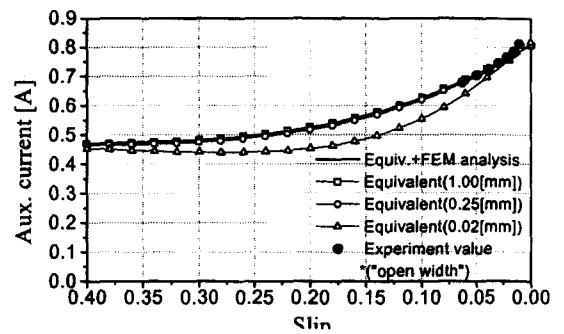


그림 17 슬립-보조권선 전류 특성
Fig. 17 Slip-auxiliary winding current characteristic

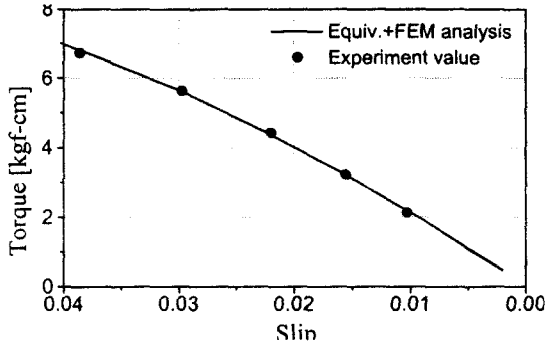


그림 18 슬립-토크 특성

Fig. 18 Slip-torque characteristic

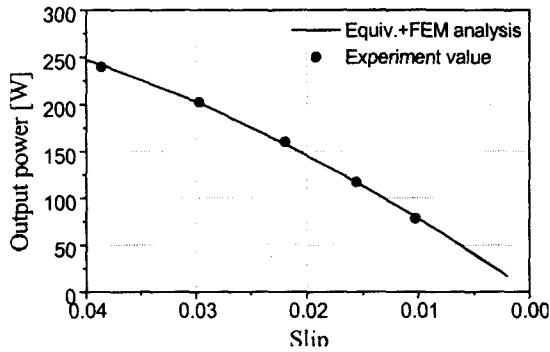


그림 19 슬립-출력 특성

Fig. 19 Slip-output power characteristic

이 결과 정격 슬립보다 큰 슬립에서는 2차측 누설리액턴스의 영향을 많이 받게 되는데 등가회로에 의한 특성해석의 2차측 누설리액턴스가 훨씬 적게 평가되어 위의 그림에서 보는 바와 같이 유한요소해석의 결과보다 훨씬 크게 평가되어 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 등가회로법과 유한요소 해석을 결합하여 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 회로정수 산정 및 특성해석을 수행하였다. 단상 유도전동기의 2차측 회로정수는 회전자 슬롯의 형태에 따라 다르게 나타난다.

특히 폐슬롯 형태의 회전자는 슬롯 브리지부의 포화정도에 따라 누설자속이 다르므로 2차측 회로정수는 슬립의 함수가 된다. 본 논문에서는 폐슬롯 형태의 회전자 회로정수를 정밀하게 산정하기 위해 브리지부의 포화정도에 따른 2차측 누설리액턴스 및 저항을 산정하기 위해 수치해석적인 방법으로 Slot pitch boundary condition을 적용하였다.

이러한 방법으로 산정된 회로정수를 이용하여 특성 해석 결과를 집중정수로부터 산정한 회로정수를 이용하는 등가회로 해석 결과와 실험치를 함께 비교한 결과 토크 및 출력등의 특성이 실험치와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 회로정수 산정방법의 타당성을 입증하였다.

부록 : 기호 설명

- V_M : 주권선의 인가전압
- V_A' : 주권선에 대해 치환된 보조권선의 인가전압
- R_1 : 주권선의 1차측 저항
- X_1 : 주권선의 1차측 누설 리액턴스
- R_A' : 주권선에 대해 치환된 보조권선의 1차측 저항
- X_A' : 주권선에 대해 치환된 보조권선의 1차측 누설 리액턴스
- R_{ir} : 주권선의 철손저항
- X_M : 여자리액턴스
- r_2'/s : 1차측에 대해 환산된 주권선의 2차측 저항
- x_2' : 1차측에 대해 환산된 주권선의 2차측 누설리액턴스
- R_{PTC}' : 주권선에 대해 환산된 PTC 저항
- X_C' : 주권선에 대해 환산된 콘덴서의 리액턴스
- k_{sk} : 스쿠 계수
- K_r : 직류저항을 교류저항으로 환산하기 위한 보정계수
- ΣZ_i : 한국의 i 번째 슬롯내의 도체수의 합
- σ_{cu} : 주권선 도체의 도전율 [σ/m]
- S_m : 주권선 도체의 단면적 [m^2]
- P : 극수
- m : 상수
- Z_{eff} : 상당 유효도체수
- N_R : 회전자의 슬롯수
- L_b : 회전자 도체바의 길이 [m]
- L_e : 엔드링 둘레의 평균 길이 [m]
- S_b : 회전자 도체바의 단면적 [m^2]
- S_e : 엔드링의 단면적 [m^2]
- σ_{Al} : 회전자의 알루미늄 도체바의 도전율 [σ/m]
- f : 전원 주파수
- μ_0 : 공기의 투자율
- L_s : 고정자의 적층 길이 [m]
- Z_{SP} : 상당 코일 권수의 제곱의 합
- L_r : 회전자의 적층길이 [m]
- K_{skr} : 리액턴스의 표피효과 보정계수
- λ_{rs} : 도체바의 슬롯 상수
- Z_{ST} : 상당 직렬 도체수
- L_c : 코일단(coil end)부분의 평균 길이 [m]
- D_{IS} : 고정자 내경 [m]
- H_S : 고정자의 슬롯의 깊이 [m]
- a_r : 엔드링 두께 [m]
- h_r : 엔드링 폭 [m]
- t_s, t_r : 고정자 및 회전자의 평균 슬롯피치 [m]
- δ : 공극의 길이 [m]
- c_s, c_r : 고정자 및 회전자의 슬롯 개구폭 [m]

참 고 문 헌

[1] 三宅 博, 小形ACモータの設計と制御~BASICからCADまで~, 総合電子出版社, 1981

[2] Cyril G. Veinott, *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1959

[3] T. A. Lipo, *Introduction to AC Machine Design Vol. 1*, Wisconsin Power Electronics Research Center University of Wisconsin, 1996

[4] 糸見 和信, 實用モータ設計 マニュアル, 総合電子リサーチ, 1992

[5] 윤상백, 홍정표 "콘덴서 구동형 단상유도전동기의 등가회로 구성 및 특성해석", *전기학회 논문지 제45권 9호*, pp. 1247-1254, 1996. 9.

[6] S. J. SALON, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1995

[7] S. Williamson and M. J. Robinson, "Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements," *IEE Proc.-B*, Vol. 138, No. 5, pp. 264-276, , Sep. 1991.

[8] S. Williamson, M. J. Robinson and L. H. Lim, "Finite element models for cage induction motor analysis," *IEEE Trans. on Indus. Appl.*, Vol. 26, No. 6, pp. 1007-1017, Nov. 1990.

[9] S. Williamson, M. J. Robinson and M. C. Begg, "Calculation of the bar resistance and leakage reactance of cage rotors with closed slots," *IEEE Proc.-B*, Vol. 132, No. 3, pp. 125-132, , May 1985.

[10] 하경호, 홍정표, 김규탁, 임태민, "엔드링을 고려한 농형 유도전동기의 2차원 유한요소해석", *전기학회 논문지 제48권 B-2호*, pp. 49-56, 1999. 2.

저 자 소 개



강 규 홍 (姜圭洪)
 1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-279-7519
 E-mail : kghsjw@hanmail.net



김 규 탁 (金奎卓)
 1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 早稲

田大 客員研究員
 Tel : 055-279-7515
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr

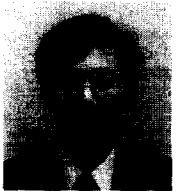


하 경 호 (河京鎬)
 1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel: 055-279-8281
 E-mail: haroom@netian.com



정 승 규 (鄭承奎)
 1964년 4월 27일생. 1999년 부산대 기계공학과 졸업(석사). 현재 LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 책임연구원



홍 정 표 (洪正杓)
 1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 055-279-7517
 E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr