

손실을 고려한 영구자석형 다극 기기의 발전특성 해석

장 석명¹, 최 장영¹, 고 경진¹, 이 성호²
충남대학교¹, 한국생산기술연구원²

The Generating Characteristic Analysis of Permanent Magnet Machines with Multi-Pole Rotor Considering Losses

Seok-Myeong Jang¹, Jang-Young Choi¹, Kyoung-Jin Ko¹, Sung-Ho Lee^{2*}
Chungnam Nat'l Univ.¹, Korea Institute Industrial Technology Gwangju Research Center²

Abstract - This paper deals with the generating characteristic analysis of permanent magnet (PM) machines with multi-pole rotor and 3-phase stator windings considering losses such as copper loss, iron loss and mechanical loss. First, using d-q transformation, dynamic equations of PM machines are established. And then, characteristic equations for losses, power and efficiency are also derived. On the basis of d-q dynamic equations and characteristic equations, dynamic simulation algorithm is achieved by the MATLAB/SIMULINK. The simulation results are validated extensively by finite element (FE) analyses.

1. 서 론

Nd-Fe-B 재질의 영구자석을 사용한 기기들은 토크와 고정자 전류사이의 선형적 관계 및 고 토크화로 인하여 고성능 및 가변속 응용에 매우 적합하다[1-2]. 특히 영구자석 발전기의 경우 터보컴프레서용 발전기와 같은 초고속 응용에서부터 풍력발전기와 같은 극저속 응용에 이르기까지 다양하며, 그 응용 처는 계속 확대되어 가고 있어서 영구자석 발전기의 설계/해석기법에 대한 연구가 계속되고 있다. 영구자석 발전기의 해석기법은 크게 1상 동가회로법, 유한요소법 및 d-q 동특성 모델링을 이용하는 기법 등이 있는데, 특히 d-q 동특성 모델링을 이용하는 기법은 발전기 자체의 특성해석 뿐만 아니라 기계적 입력 혹은 발전기 뒷단의 전력변환 장치의 동특성 모델링이 된 경우 하나의 시스템 해석을 가능하게 하는 장점을 제공한다.

따라서 본 논문은 d-q 동특성 모델링을 이용하여 손실을 고려한 영구자석 기기의 발전특성해석을 다루고자 한다. 먼저 3상고정자를 갖는 영구자석 발전기의 d-q 방정식을 유도하고, 발전기 출력, 손실, 효율 등의 발전 특성에 대한 방정식 역시 유도 한다. 유도된 d-q 방정식과 발전특성 방정식을 바탕으로 MATLAB/ SIMULINK를 이용하여 영구자석 발전기의 동특성 알고리즘을 작성한다. 다양한 조건에서 얻어진 시뮬레이션결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인함으로써 본 논문에서 제시한 발전특성해석법 및 특성 방정식이 타당함을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 3상 영구자석형 발전기의 d-q 모델링

그림 1에 제시된 3상 영구자석 동기발전기의 전압방정식과 3상의 전류의 합이 0이라는 조건을 이용하면 식 (1)로 주어지는 전압방정식을 얻을 수 있다.

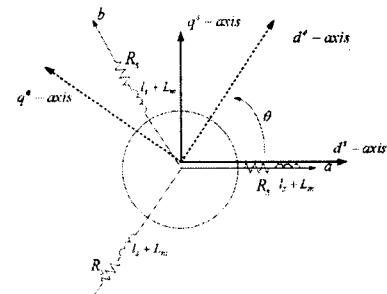


그림 1. 3상 영구자석 동기기의 동가회로 및 축 변환 관계.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + PL_s) & 0 & 0 \\ 0 & -(R_s + PL_s) & 0 \\ 0 & 0 & -(R_s + PL_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

V_a, V_b, V_c : 고정자 a, b 및 c상전압

R_s : 고정자 권선의 상전압

L_s : 상당 인덕턴스로 $I_s + 3L_m / 2$ 로 계산된다. I_s 는 전기자 권선의 누설 인덕턴스이고 L_m 은 권선의 end-turn인덕턴스와 자기인덕턴스의 합 즉 자화 인덕턴스이다.

P : 미분 연산자 즉 d/dt

i_a, i_b, i_c : 고정자 권선의 각 상 전류

e_a, e_b, e_c : 고정자 각 상에 유기되는 속도 기전력이다. 동기 좌표계에서의 영구자석형 발전기의 d-q 전압방정식을 얻기 위해 식 (1)의 양변에 식 (2)로 주어지는 변환 행렬을 곱하여 정지좌표계로 변환한 후 다시 식 (3)의 합수를 곱하여 식 (4)와 같은 d-q 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$T(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (2) \quad R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + PL_s) & \omega_r L_s \\ -\omega_r L_s & -(R_s + PL_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 ω_r 및 ϕ_f 는 각각 회전속도 및 주자속도를 나타낸다. 식 (4)로부터 영구자석에 의해 고정자 권선에 유기되는 자속쇄교수는 동기좌표계의 d축에만 집중되고 이로

인해 발생하는 속도 기전력은 q축에만 집중하는 것을 알 수 있다.

2.2 특성 방정식

영구자석 발전기의 출력방정식(P_o), 동손(P_{cu}), 무효전력 싱분(P_Q), 철손(P_{iron}), 기계손(P_m), 표유부하손(P_{stray}) 및 효율(η)은 식 (6)으로 표현된다 [3-4].

$$P_o = \frac{3}{2} (V_d^{e1} i_d^e + V_q^{e1} i_q^e) \quad (5.1)$$

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^e)^2 + (i_q^e)^2 \quad (5.2)$$

$$P_Q = \frac{3}{2} \frac{L_s}{2} \frac{d}{dt} (i_d^e)^2 + (i_q^e)^2 \quad (5.3)$$

$$P_{iron} = P_h + P_e + P_a \\ = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (5.4)$$

$$P_m = T_{basf} \frac{4\pi f}{p} \quad (5.5)$$

$$P_{stray} = 0.01 P_o \quad (5.6)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{cu} + P_Q + P_{iron} + P_m + P_{stray}} \times 100 \quad (5.7)$$

식 (5.5)에서 T_{basf} 는 베어링의 마찰토크로 단위는 Nm이며 보통 베어링의 마찰계수가 0.003이라는 점을 감안하면 매우 작은 값이 될 것임을 예측할 수 있다. 식 (5.6)에서 표유부하손은 출력의 1%미만이라 가정하였다. 보통 철손은 그림 2로 주어지는 특별한 재질에 대한 손실 데이터로 주어지는데, 그림 2에서 알 수 있듯이, 몇 개의 주파수에 대해서만 주어졌기 때문에, 회전속도에 따른 철손을 예측하기 위해서는 식 (5.4)로 주어지는 수정된 steinmetz 철손방정식을 사용해야 한다. 계수 k_h , k_e 및 k_a 는 각각 히스테리시스 손실계수, 와전류 손실계수 및 이상 와전류 손실계수를 나타내며 [3]에 제시된 방법을 사용하여 표1과 같이 도출되었다. 그림 3은 주파수에 따른 식 (5.4)로부터 얻어진 계산결과와 측정결과와의 비교를 보여준다. 그림 3의 결과로부터 표 1에 도출된 계수 값들이 타당함을 알 수 있다.

2.3 특성해석 알고리즘

그림 4는 식 (1)~(5)를 이용하여 도출된 영구자석 발전기의 동특성 해석 블록도를 보여준다. 일반적으로 발전기의 경우 발전원인 기계적 입력을 받은 후 운동방정식을 통해 회전속도를 받는 방식으로 동특성 알고리즘을 구성하나, 본 논문에서의 주안점은 다양한 회전속도 및 가변부하에 따른 손실을 고려한 발전특성해석을 목적으로 함으로 기계적 입력은 생략하였다.

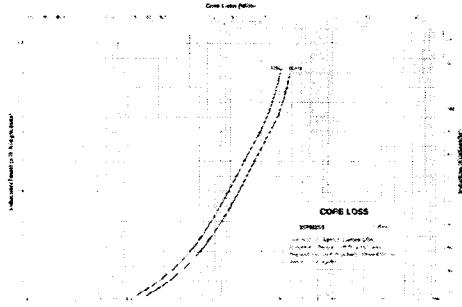


그림 2. 철손 데이터

표 1. 수정된 Steinmetz식을 만족하는 철손계수들.

function : $Y = A * f^B$				
계수 (Y)	A	B		
k_h	0.000935836129	0.4120423293		
k_e	0.002190376126	0.6824204238		
k_a	0.001611726885	-0.1115449632		
function : $Y = C * f^p + E * f + F$				
계수 (Y)	C	D	E	F
n	1.114170845 7	0.155567392 76	-0.0095928906 76	0.9292123 784

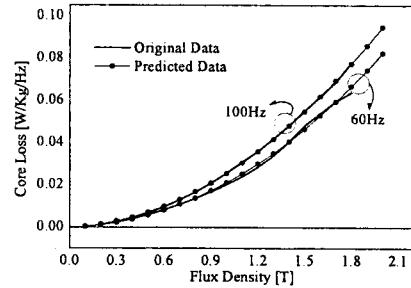


그림 3. 주파수에 따른 철손 계산결과와 측정결과 비교.

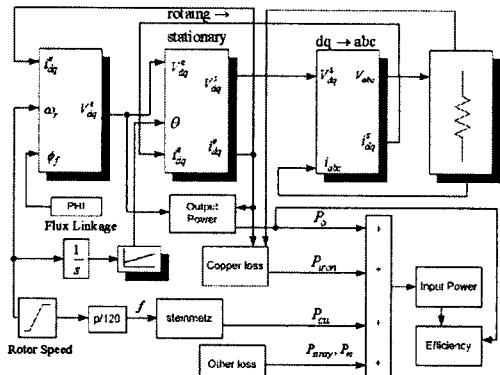


그림 4. 발전특성 해석을 위한 동특성 블록도.

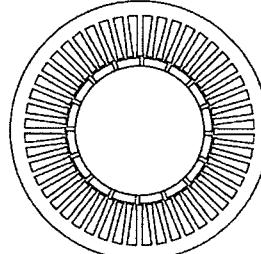


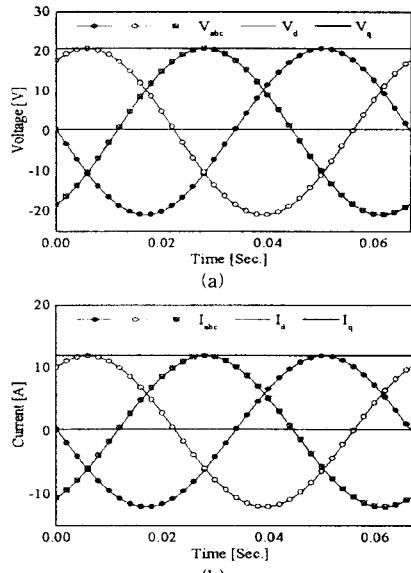
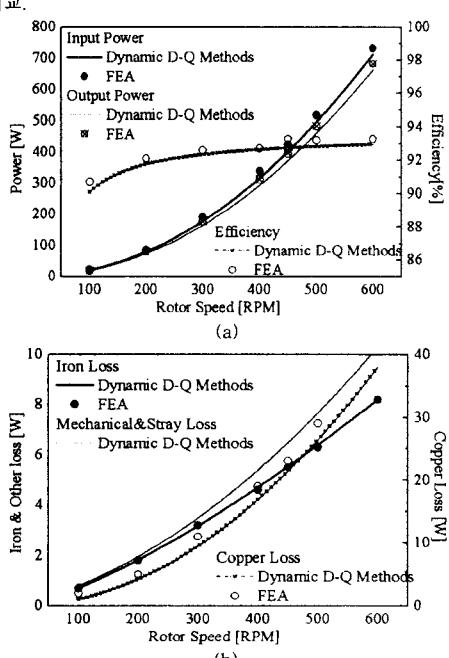
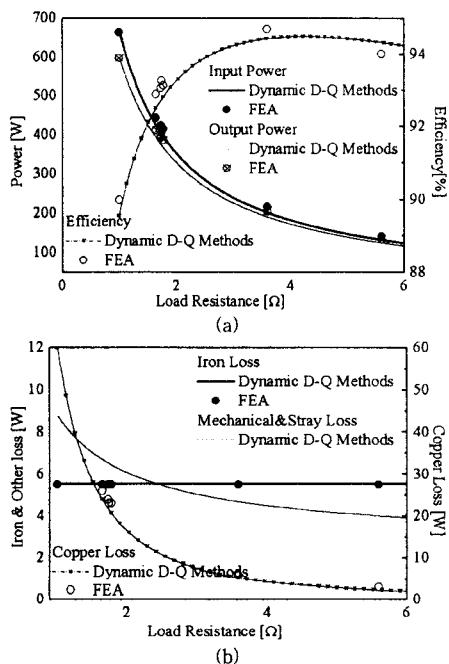
그림 5. 해석에 사용된 다극 영구자석형 발전기의 개념도.

2.4 발전특성 해석 결과

그림 5는 해석에 사용된 다극 영구자석형 발전기의 개념도를 보여주며 표 2는 그림 5의 모델에 대한 회로정수를 보여준다. 그림 6 및 7에서 알 수 있듯이, 동특성 모델링으로부터 얻어진 정속도 및 정부하 특성곡선이 유한요소로부터 얻어진 것과 잘 일치함을 확인할 수 있으므로, 본 논문에서 제시한 방법이 타당함을 알 수 있다. 그림 8은 정격부하 하에서 정격속도 시 동특성 모델로부터 얻어진 3상전압/전류 및 d/q 전압/전류를 보여준다.

표 2. 해석에 사용된 영구자석형 발전기의 회로정수

항목	값
주자속	0.467
동기인덕턴스 [mH]	0.001
저항 [Ω]	0.1



3. 결론

본 논문은 d-q 동특성 모델링을 이용하여 손실을 고려한 영구자석 기기의 발전특성해석을 다루었다. 먼저 3상고정자를 갖는 영구자석 발전기의 d-q 방정식을 유도하고, 발전기 출력, 손실, 효율 등의 발전 특성에 대한 방정식 역시 유도하였다. 유도된 d-q 방정식과 발전특성 방정식을 바탕으로 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 영구자석 발전기의 동특성을 알고리즘 역시 작성하였다. 다양한 조건에서 얻어진 시뮬레이션결과는 유한요소해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인함으로써 본 논문에서 제시한 발전특성해석법 및 특성 방정식이 타당함을 입증하였다. 향후 연구에서는 정속도 특성, 무부하 특성 및 정부하 특성 실험을 수행하여 실험적으로 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 다시 한번 입증할 것이며, 얻어진 손실 값들을 바탕으로 해석적으로 열해석 역시 수행하여 나갈 것이다.

Acknowledgement

This work has been supported by KESRI and MOCIE, Korea.

[참고문헌]

- Gordon R. Slemon, "On the Design of High-Performance Surface-Mounted PM Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no.1, Jan. 1994
- Tomy Sebastian and Gordon Slemon, "Transient Torque and Short Circuit Capabilities of Variable Speed Permanent Magnet Motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. Mag-23, no.5, Sept. 1987
- Arantxa Tapia, Gerardo Tapia, J. Xabier Ostolaza, and Jose Ramon Sanchez, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversions*, vol. 18, no.2, June. 2003.
- W.wu, V.S. Ramsden, T. Crawford and G. Hill, "A Low-Speed, High-Torque, Direct Drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines", *IEEE Industry Applications Conference*, Vol.1, pp. 147-154, Oct. 2000.