

내삽형 자석 동기 발전기 특성 해석에 관한 연구

이광호, 홍선기, 장중학, 권혁기
호서대학교 정보제어공학과

A study for analysis of internal permanent magnet synchronous generator

Kwang-Ho Lee, Sun-Ki Hong, Joong-Hak Jang, Hyk-Ki Kwon
Department of Information Control Engineering Hoseo University

Abstract - 이미, 동기 발전기는 크게는 발전소에서 작게는 소형 자가 발전에 이르기까지 널리 사용되고 있다. 그러나, 수요는 급격히 증가하고 있으나 이에 대응할 수 있는 기술은 적절히 대응하지 못하고 있는 듯하다. 즉, 수요가 증가함에 따라 발전 시스템의 고효율화, 소형화는 당연한 요구사항이나, 현재 동기 발전기는 기존의 별 다른 진전이 없이 고전적인 방법에 의해 생산되고 있다. 그래서 정밀한 해석 기술에 바탕을 두어 내삽형 자석 동기 발전기의 설계가 도출될 것으로 기대된다.

1. 서 론

동기 발전기는 최근 들어 중, 소규모의 열병합 발전기 등에 이르기까지 수요는 급격히 증가하고 있으며, 이에 대응하는 기술은 적절하지 못하고 있는 듯하다. 수요가 증가함에 따라 발전 시스템의 고효율화, 소형화는 당연한 요구사항이나, 현재 동기 발전기는 기존의 별 다른 진전이 없이 고전적인 방법에 의해 생산되고 있다. 그래서 정밀한 해석 기술에 바탕을 두어 내삽형 자석 동기 발전기의 설계가 도출될 것으로 기대된다.

2. 내삽형 자석 동기 발전기의 특성 해석

2.1 영구자석 발전기

영구자석 발전기는 영구자석에 의해 공급되는 자속을 사용하는 발전기이다. 이는 고정자와 회전자 모두에서 여자원을 가지는 여자기기에 들어간다. 영구자석 발전기와 일반적인 발전기의 차이가 있다. 기존의 동기기나 직류기는 역률이나 공급전압과 같이 기기의 여러 가지 특성을 제어할 수 있지만 영구자석 발전기에서는 한계가 있다. 그리고 영구자석을 이용하는 기기가 계자 권선에 의한 여자를 이용하는 기기보다 구조적으로 간단하지만 가격면에서는 고려해야 될 부분이 많다. 일반적으로는 페라이트 자석을 사용하는 기기가 상대적으로 전압제어 부분이 작아지므로 저렴하다. 영구자석 발전기의 가장 중요한 정점중의 계자 권선형으로 한다면 비용면에서 불리한 특수한 크기와 모양으로 제작할 수 있다는 점이다. 그러나 영구자석 발전기가 계자 권선형에 비해 약점 부분은 전기자 과전류, 과열 등에 의해 자석이 감자될 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 내삽형 자석 동기 발전기의 시뮬레이션을 통해 자속밀도 분포와 자속 포화 문제에 대한 검토 및 모터 설계에 필요한 기전력, 인덕턴스 등과 같은 파라미터 값들을 구할 수 있다. 파라미터 값들을 이용한 설계 기술은 정밀한 해석 기술에 바탕을 두게 되며, 동가회로에 의한 해석 뿐만 아니라, 유한요소법에 의한 정밀 해석 및 부분적 자기특성 해석과 파라미터 도출로부터 설계치를 도출했다.

2.1.1 실제 정현파 동기 발전기

기존의 교류기기의 경우 도체의 기본파와 공간 고조파 성분과 자속 분포에 의해 그 동작이 지배되는 것으로 가정된다. 만일 직렬 p극 쌍이 있는 경우, 실제 상당 직렬 턴수는

$$N_{ph} = \frac{2pN}{2} \quad (1)$$

상당 직렬 연결된 유효 정현 턴수는 극당 정현분포 턴수 N_s 의 2배이므로 $N_s = N_{ph}$ 이다. 권선을 코일의 집중권으로 보고 각 코일이 1개의 슬롯상을 점유하고 있다면 극당 상당 슬롯수가 q 인 분포 전절권에 대해 유효 정현분포 턴 수는 아래와 같이 주어진다.

$$N_s = \frac{4}{\pi} k_{d1} N_{ph} \quad (2)$$

여기서 k_{d1} 은 기본파에 대한 분포계수이다. 단일 코일에 대해 공극 기자력의 기본 성분은 $k_{p1} \times$ 턴수의 전절 코일에 의해 만들어지는 것과 같다. 여기서 k_{p1} 은 기본 단절계수이다. k_{s1} 을 스케일러 할 때, 기본파 권선 계수는 다음과 같다.

$$k_{w1} = k_{d1} k_{p1} k_{s1} \quad (3)$$

따라서, 개방회로 상기전력은

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} (k_{w1} N_{ph}) \Phi_M f \quad (4)$$

이다.

여기서 Φ_M 의 첨자 '1'은 이것이 기본 공간 포화 성분임을 표시하기 위한 것이다.

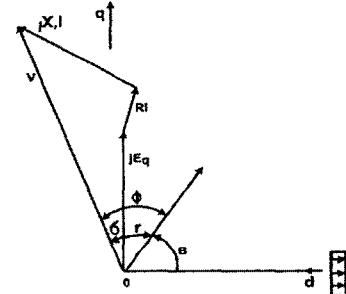
전기자 반작용에 의한 리액턴스는 유효 정현분포 상당 턴수를 대입하면

$$X_{sg} = \frac{6\mu_0 Df}{P^2 g''} (k_{w1} N_{ph})^2 \quad (5)$$

을 얻는다. 위의 값은 상당 누설 리액턴스에 더해져서 아래와 같은 총 동기 리액턴스를 구할 수 있다.

$$X_s = X_{sg} + X_o \quad (6)$$

2.1.2 페이서도

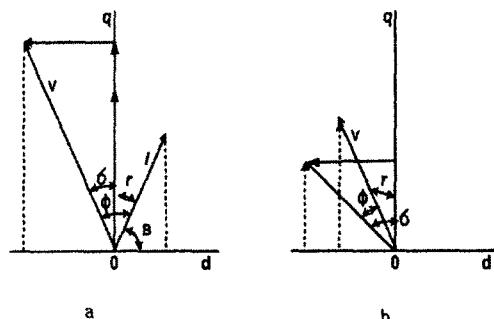


〈그림 1〉 비돌극기에서의 페이서도

정상상태, 평행에서 정현 상전류인 경우 그 동작은 그림 1와 같은 페이서도로 표현될 수 있다. 페이서도는 또한 효과적인 제어 설계의 기초가 된다. E_{ph} 와 자석에 의한 기본 쇄교 자속간의 페이서 관계는 아래와 같다.

$$\tilde{E}_{ph} = jE_q = j\omega \tilde{\Phi}_{M1} V \quad (7)$$

쇄교 자속 항의 첨자 'd'는 이 페이서가 회전자에 d축과 동기화 되었음을 의미한다. 첨자 'l'은 기본 공간 포화 성분을 표시하는데, 이 성분의 페이서는 물리적 공간에서 회전자가 회전하는 것과 동기화되어 회전한다. 물리적 공간에서 회전자자의 자속축은 직축, 즉, 자석의 극 arc의 중심이다. 각 $t=0$ 에서의 물리적 회전아 d 의 위치를 정의한다. 페이서 RI 는 상 저항 양단의 전압강하이며, 당연히 I 에 평행하다. 비슷하게 동기 리액턴스 양단의 전압강하 $jX_s I$ 로 나타나고 전류 페이서를 90° 만큼 앞서 간다. 역기전력과 전압강하 페이서의 합은 단자에 인가된 전압과 같아야 한다.



〈그림 2〉 지상, 진상에서의 페이서도

그림 2는 전류와 전압이 d축과 q축으로 분해된 페이서도이다. 두 경우 모두 필수적인 동작 메커니즘을 밝히기 위해 저항을 무시하였다. I_d 가 양이라면, 그림 2-a에서와 같이 전기자나 고정자 전류가 자석에 의해 발생되는 d축 자속을 증가시키려는 공극 주위의 mmf분포를 만들어낸다. 고정자 기자력에 의한 자속은 q축에서 $jX_q I_d$ 을 유도한다. q축 성분에는 jE_q 가 더해진다. 자속밀도가 증가하여 동작점이 자화특성에서 위로 올라가고 1사분면에 $B_m > B_r$ 로 끝날 수 있다.

2.2 영구자석 고려 유한요소 해석법

유한 요소법은 수치해석 기법에 의해 전자계 시스템 문제를 해석하는 방법이다. 이 방법은 특히 형상이 복잡하거나 비선형 물질 특성을 가지는 경우 해석 적재를 구하기가 매우 어려운 경우에 매우 유용한 수치해석 기법이다. 해석 영역 내에서 만족하여야 하는 비선형 미분 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 유도가 되며, 보통 이 미분 방정식은 자기 포텐셜(magnetic potential)로 표현이 된다. 회전기, 변압기 등의 전기기기 해석에 유한 요소법을 적용하는 경우 전처리 과정(Pre-processing), 주처리 과정(Main-processing) 및 후처리 과정(Post-processing)으로 이루어진다.

전처리 과정은 요소 분할, 물질 상수값 입력 및 문제 정의 부분으로 나뉘어 진다. 문제 정의 과정은 해석 영역의 정확한 경계 조건을 부여하고, 전류가 흐르는 영역의 전류 밀도 및 전류 방향, 자석의 자화방향 등을 지정하며, 특히 경계 조건 부여 이외의 것은 앞부분의 물질 상수값 입력 과정과 밀접한 관련이 있다. 주처리 과정은 전체 해석 영역을 만족하는 편미분 방정식을 요소별로 이산화된 편미분·방정식으로 바꾸어 해를 구하는 것이다. 이산화에 의해서 편미분 방정식은 절점에서 포텐셜을 미지수로 하는 많은 비산형 연립 방정식으로 변환된다. 이 비선형 연립 방정식을 풀기 위해서는 반복 계산이 필수적이다. 또한 미지수가 많기 때문에 대형 행렬 계산을 하여야 한다. 후처리 과정은 주처리 과정으로부터 각 절점에서의 포텐셜 값이 얻어질 때, 이 포텐셜 값을 이용하여 필드 특성치, 자속밀도, 기전력, 인덕턴스 등을 계산하는 과정이다.

2.2.1 영구자석 동기 발전기 유한요소 해석

내삼형 자석 동기 발전기에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석으로부터, 별전기의 d, q 축 리액턴스, 역기전력, 공극 자속밀도 분포 등을 얻어낼 수 있다. 이러한 특성 해석이 가능하기 때문에, 발전기의 형상, 재료, 권선 수 등을 조정하여 요구되는 성능을 만족하는 발전기의 설계가 가능하다.

발전기 전력의 주파수는 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$f = \frac{P \cdot n}{120} \quad (8)$$

발전된 전압은 교류지만, 제어 정류기를 통해 직류 전원으로 변환되고, 이것이 발전기의 여자기에 여자전원을 공급된다. 원동기에 의해 구동되고, 원동기 측의 관선이 충분히 커서 영구자석 발전기의 코킹 토크는 전체적으로 회전불균일에 크게 영향을 미치지는 못할 것으로 판단되지만, 코킹은 작은 것이 바람직하다.

3. 해석 결과

〈표 1〉 해석 모델의 기본적인 사양

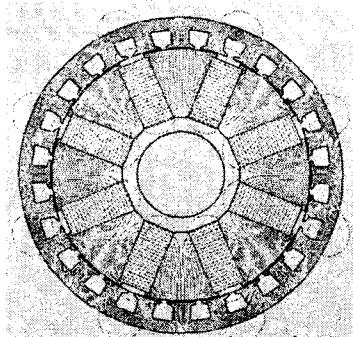
항목	값	단위
정격 입력	220	V
RPM	1800	rpm
극수	8	
슬롯수	24	
상수	3	
영구자석	0.395	T

그림 3은 영구자석에 의한 샘플 발전기의 등포텐셜도이다. 8개의 직사각자석과, 극을 형성하는 부채꼴의 회전자 치가 있다. 자석 표면적은 공극 극 면적보다 더 넓기 때문에 자석 잔류 자속밀도보다 공극 자속밀도가 더 커질 수 있다. 여기서, 자석에 나온 자속이 공극으로 흘러가야 하므로, 회전자 축을 둘러싼 링구조물을 반드시 바탕성체이어야 한다.

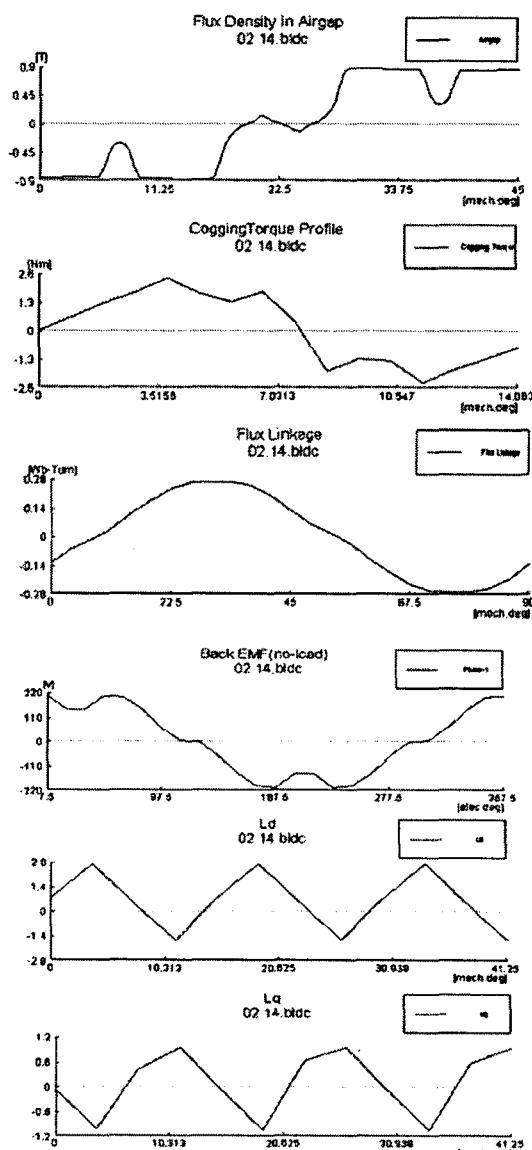
그림 4는 이러한 유한 요소 해석에 의해서 계산된 공극자속밀도분포, 코킹 토크 프로파일, 자속 쇄교수, 비교적 정현적으로 나오고 있으며, 기전력은 표 1의 사양에 따라 계산된 결과이다. d축 q축 리액턴스 크기 차이로, 릴리턴스 출력이 존재한다.

4. 결 론

영구 자석형 발전기의 동가회로에 의한 해석을 위하여 자기회로 모델링 방법에 대하여 연구, 모델을 만들 수 있도록 하였다. 본 논문에서 동기 발전기를 실제로 유한요소 해석을 수행하고, 변수가 될 수 있는 발전기의 고정자, 회전자 형상, 치수, 영구자석 치수 등을 변경하면서 발전기의 특성을 유한요소법에 의하여 해석을 수행하였다. 이로부터 다양한 입력 변화를 통해, 요구되는 사양을 만족할 수 있는 자석의 설계가 가능할 것이라 기대된다.



〈그림 3〉 발전기의 등포텐셜도



〈그림 4〉 유한요소 해석에 의한 결과

감사의 글

본 연구는 중소기업 기술혁신 기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 大川光吉, “페라이트 磁石回轉機의 設計”, pp.183~268, 1984
- [2] 서울대 전기공학부 전기역학 연구실, “영구자석 전동기 설계”, pp.174~195, 1998