

AFPM발전기의 코깅토크 저감 및 특성 향상에 관한 연구

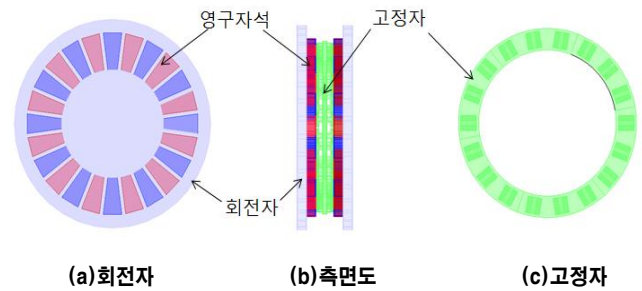
장중근, 주성준, 김창엽
호서대학교*

A study on the cogging torque reduction and the performance improvement of AFPM generator

Joong-Keun Jang, Chang-Eob Kim, Sung-Jun Joo
Hoseo University

Abstract - 본 논문은, 24극 18슬롯을 갖는 1kW 풍력발전용 AFPM발전기의 코깅토크 저감과 특성향상에 관한 논문이다. 코깅토크 저감 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서 두 가지의 방법을 제안하였고, 제안된 방법 두 가지를 혼합하여 최적화를 진행하고 코깅토크는 최소가 되고, 기전력은 최대가 되는 최적점을 찾는 최적화를 진행하여 발전기의 특성을 향상시키는 논문이다.

포함하는 발전기의 측면도를 나타낸 것으로 3층구조를 가지는 발전기임을 보여주고 있다. 이외에 세부적인 구조의 내용은 표 1에 기술해 놓았다.



<그림 1> AFPM 발전기의 구조

<표 1> AFPM 발전기의 설계 제원

구분		설계 제원
공통	극수 / 상수 / 슬롯수	24극 / 3상 / 18 슬롯
	고정자 외경 / 내경	∅ 395[mm] / ∅ 235[mm]
	적층길이 / 공극 길이	59[mm] / 1[mm]
고정자	발전전압	290[V]
	코일면적	0.3[mm ²]
	코일턴수	200 Turn
	전류밀도	3.75 [A/mm ²]
회전자	재질	주철
	사양	NdFe, 1.38[T]
	재질	알루미늄

1. 서 론

풍력발전은 자연에서 발생하는 풍력에너지로 블레이드의 회전을 통하여 발전 하며, 유해물질 발생이 거의 없는 신재생에너지의 일원이다. 이러한 장점을 가진 풍력발전은 세계적으로 2005년에는 전세계 생산 에너지 비율의 1%미만 이었으나 2015년에는 200[GW]이상의 증설을 하며 점점 그 증설용량은 계속해서 증가하는 추세이다[1]. 우리나라 역시 현재는 신재생 에너지 중 2.6%정도지만, 2035에는 18.2%로 그 비율을 높이는 것을 목표로 개발되어지고 있으며 풍력발전산업은 앞으로도 많은 개발이 이루어 질 것을 전망된다[2]. 본 논문에서는 영구자석을 갖는 풍력발전용 AFPM(Axial Flux Permanent Machine)발전기에서 발생하는 코깅토크가 형상의 변화에 따라 저감되는 방법 두 가지를 제안하고, 이후 두 방법을 혼합하였을 때, 최소의 코깅토크를 가지면서 최대의 기전력을 갖는 최적화를 진행할 것이다.

2. AFPM 발전기의 코깅토크 저감

2.1 관계이론 및 설계

2.1.1 코깅토크

코깅토크는 영구자석을 사용하는 기기에서 고정자와 회전자 사이인 공극에서 발생하게 되는 힘을 의미한다. 기기에 전류가 흐르지 않고 정지해 있을 때, 영구자석과 고정자 슬롯사이에서 자기저항(릴럭턴스)이 최소가 되는 안정된 위치에 존재하게 된다. 그러나 기기가 회전할 때, 이 자기저항이 최소가 되는 안정된 위치에서 벗어나게 되는데, 이때 다시 안정된 위치로 복귀하려는 힘을 코깅토크라 한다[3]. 코깅토크의 공식은 식 (1)과 같다.

$$T_{cog}(\theta_r) = -\frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR}{d\theta_r} \quad (1)$$

Φ_g : 공극 자속, R: 공극 릴럭턴스, θ_r : 회전자

2.1.2 EMF(기전력)

발전기의 기전력은 발전기에서 만들 수 있는 전압의 크기를 의미하게 되고 이 크기가 클수록 발전량은 증가하게 된다. 발전기 기전력은 코일의 턴 수와 권선계수, 주파수, 상당코일 등을 고려하면 기전력 공식인 식 (2)를 얻을 수 있게 된다.

$$E = 4.44fN_1k_w\Phi_a \quad (2)$$

f: 주파수, N_1 : 상당코일 턴 수, k_w : 권선계수, Φ_a : 쇄교자속

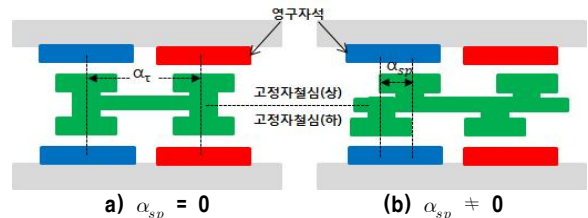
2.1.3 AFPM 발전기 설계 및 구성

본 논문에서는 그림 1의 AFPM발전기를 기본모델로 선정하였다. AFPM 발전기의 해석은 자계해석을 이용한 Flux 3D프로그램을 사용하여 해석하였고, 요소의 수는 250만개 내외이다. 기본모델의 구조는 그림 1에 나타나 있으며 (a)는 영구자석을 포함한 회전자의 구조이고, (c)는 코일을 갖는 고정자로 외부 회전형 기기이다. (b)는 회전자와 고정자를

2.2 코깅토크 저감법에 의한 설계 및 해석

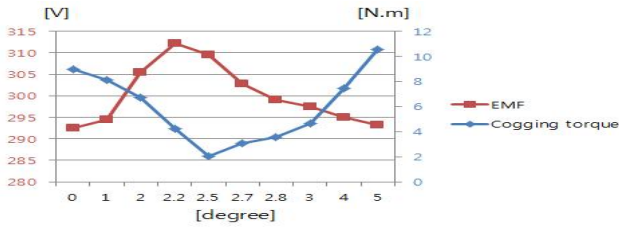
2.2.1 슬롯 위치 변경법

첫 번째 코깅토크 저감방법으로 슬롯 위치 변경법이다. 그림 2 (a)와 같이 상, 하부의 슬롯이 같은 위치에 있는 형태에서 (b)와 같이 상, 하부 슬롯의 위치를 변화시켰으며, 슬롯의 위치 변화각(α_{sp})의 변화를 통하여 릴럭턴스의 변화에 따른 코깅토크가 저감되는 방식이다[4].



<그림 2> 슬롯 위치 변경 방법

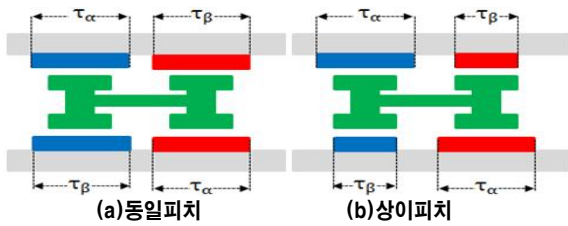
그림 3은 α_{sp} 의 변화에 따른 코깅토크와 EMF의 결과이며 코깅토크는 2.5°에서 가장 낮은 2.21[N.m] 값을 가졌고 EMF는 2.2°에서 가장 높은 312.25[V]를 보였다. 이는 식(1)에서의 릴럭턴스의 변화에 따라서 코깅토크의 값이 최소가 되고 최대기전력 값을 가지는 각각의 위치를 알 수 있다.



〈그림 3〉 α_{sp} 위치 변경에 따른 코깅토크와 EMF

2.2.2 영구자석 교번배치

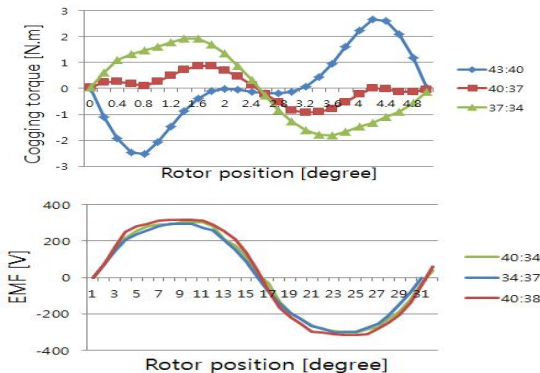
두 번째 방법은, 영구자석 교번배치로써 그림 4 (a)의 그림은 기본모델로 영구자석 τ_α 와 τ_β 의 크기가 같음을 볼 수 있다. 그러나 영구자석의 교번배치는 그림 4(b)와 같이 영구자석 τ_α 와 τ_β 를 각기 다른 크기로 교번배치 한 것으로 공극에서의 코깅토크가 상호 상쇄작용을 일으켜 코깅토크를 저감하는 방식이다. 그림 5는 τ_α 와 τ_β 의 변화를 통하여 코깅토크와 EMF를 나타낸 것이다[5].



(a) 동일피치

(b) 상이피치

〈그림 4〉 영구자석의 상이피치 배치 방법

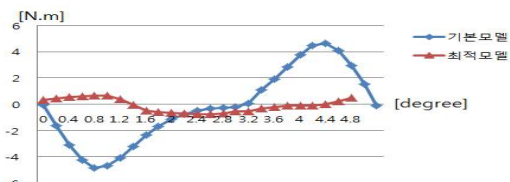


〈그림 5〉 영구자석 교번배치의 코깅토크와 EMF

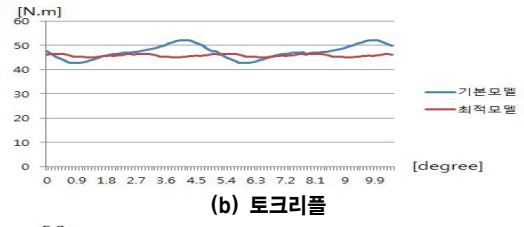
그림 4를 통하여 영구자석 교번배치의 코깅토크는 37[mm] 40[mm]에서 가장 작은 코깅토크인 1.52[N.m]을, EMF는 38[mm] 40[mm]에서 가장 높은 315.72[V]를 보였다. 앞선 결과를 통해서 식(1)에서의 최소가 되는 릴럭턴스와 영구자석 사이에 코깅토크 상쇄작용이 가장 많고, 많은 기전력이 발생하는 점을 알 수 있다.

3 AFPM 발전기의 최적형상 설계

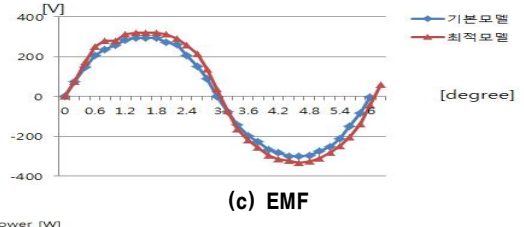
위 두 가지의 결과를 통하여 슬롯 위치 변경과 영구자석 교번배치를 같이 적용하여 최적화 하게 된다면 더 낮은 코깅토크와 높은 기전력을 갖는 모델을 찾을 수 있을 것으로 예상 되었다. 최적화 방법으로는 통계 프로그램인 Minitab의 반응표면법의 Box-Behnken법을 이용하여 최적모델의 설계 점을 찾은 후 Flux 3D를 통하여 유한요소 해석하였다. 그림 5는 최적화를 통하여 얻은 최적모델과 기본모델의 각 결과들을 비교한 그래프이다.



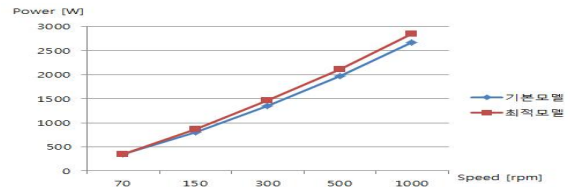
(a) 코깅토크



(b) 토크리플



(c) EMF



(d) 출력

〈그림 5〉 최적모델과 기본모델의 비교

〈표 2〉 AFPM 발전기 최적 설계 내용

	α_{sp} [°]	τ_α [mm]	τ_β [mm]	코깅토크 [N.m]	EMF [V]	출력 [W]
기본 모델	0	43	43	8.99	292.45	1250
최적 모델	2.74	37.67	38.18	1.62	321.38	1460

표 2는 최적모델의 결과를 나타낸 것으로 각 변수 $\alpha_{sp}, \tau_\alpha, \tau_\beta$ 가 표 2의 크기 만큼 변화 된다면, 코깅토크, 토크리플은 기본모델에 비해 리플이 현저히 감소되는 것과, EMF가 증가됨에 따라서 출력의 증가를 보이는 것을 알 수 있게 된다.

3. 결 론

본 논문에서는 AFPM발전기의 최적화 통하여 각 특성들의 비교를 관찰 하였다. 기존의 코깅토크 저감방법 두 가지를 비교하여 보면 슬롯 위치 변경법보다 영구자석 교번배치가 코깅토크 저감과 기전력향상에 더 효율적이라는 것을 알 수 있게 된다. 이는 코깅토크 저감법에 따라서 공극 릴럭턴스가 감소하게 되고, 이에 따라 자속이 변화하게 되어 기전력의 증가량이 다르다는 것을 알 수 있다. 또한 위 결과를 통하여 반응표면법의 Box-Behnkn법을 사용하여 최적화를 진행하여 최적모델을 얻을 수 있었다. 그 결과 최적모델이 기본모델에 비해 코깅토크는 7.37[N.m]만큼 감소하였고 토크리플은 16.9[%]만큼 감소되는 것을 볼 수 있으며, EMF는 28.93[V]만큼 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 출력의 경우 동기속도인 300[rpm]을 기준으로 하였을 때 기본모델이 1250[W]였으나, 최적모델의 출력은 1460[W]로 210[W]만큼 기본모델에 비해서 증가되는 것을 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Steven Sayer, Klaus Rave, "Global wind report", GWEC, pp.11-12, 2012.
- [2] 산업통상자원부, "제 4차 신·재생에너지 기본계획", 첨부4, pp.5, 2014.
- [3] 장중근, 이제영, 김예랑, 주성준, 김창업, "1kW AFPM 발전기의 코깅토크 저감을 위한 설계 및 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 924-925, 2014.
- [4] 정태욱, 배병덕, "이중 고정자 구조의 소형풍력터빈용 AFPM 발전기의 코깅토크 저감에 관한 연구", 조명·전기설비학회 논문집 vol.61, no.5, pp.71-77, 2012.
- [5] 정대원, "소형 풍력발전기용 AFPM 발전기 코깅토크 저감 설계", 대한전기학회 논문지 vol.61, no.12, pp. 1820-1827, 2012.