

영구자석 회전자 타입에 따른 오버행 효과 고찰

김기찬*, 김 솔**, 이 철직***, 이 주*

*한양대학교, **유한대학, ***대림대학

A Study on the Overhang Effect according to the Rotor Types of Permanent Magnet Machine

Ki-Chan Kim*, Sol Kim**, Cheol-Jick Ree**, Ju Lee*

*Hanyang University, **Yuhan College, ***Daelim College

Abstract - The overhang parameter is required to maximize the power density of generator. However, the use of overhang design causes the rise of material cost. Moreover there is somewhat different overhang effect according to the rotor types. This paper presents the overhang effect on the overhang length according to the rotors with permanent magnet of generators. To examine the phenomenon of overhang effect, the new dynamic analysis method with 2D FEM is suggested and verified by the test results.

소법을 제시하였다. 이러한 오버행 해석의 타당성 검증으로 다양한 회전자 타입에 대한 오버행 효과를 분석하였다.

2. 해석 모델

그림 1은 현재 사용되고 있는 영구자석 회전기의 대표적인 회전자 타입들로서 본 논문에서는 오버행 효과를 분석하기 위한 모델로 제시되었다. 해석모델은 영구자석 발전기로 표 1에 기본 스펙을 나타내었다. 비교 해석을 수행하기 위하여 고정자 치수와 회전자의 영구자석 체적을 동일하게 두었다.

1. 서론

현재 회로류 자석과 같은 고에너지 밀도의 영구자석 가격이 점점 내려감에 따라 영구자석 회전기의 개발이 다양한 방면에서 활발히 진행되고 있다. 특히 영구자석 회전기의 최대 약점이 되고 있는 고온 영구자석 감자 특성을 보완한 제품이 출시됨에 따라 이러한 영구자석 회전기가 일반적인 가전, 산업용 분야에서 벗어나 로봇, 자동차 및 풍력 시스템과 같은 신뢰성이 요구되는 분야에 적용되기 시작되었다.

영구자석 회전기의 주된 장점과 단점은 외부 계자원이 별도로 필요하지 않다는 점이다. 계자원이 영구자석이므로 슬립링이 필요 없으며 전류에 의한 손실이 없어 효율을 극대화시킬 수 있지만, 계자원에 대한 제어가 불가하므로 속도에 대한 역기전력 레벨을 변경하기 어렵다. 또한 동일한 회전자내에서 영구자석에 의한 계자자속이 최대화 되어야만 고효율, 고풍출력 특성을 만족시킬 있다. 이러한 이유로 영구자석 회전기의 설계 단계에서 회전자 영구자석의 효과적인 배치, 사이즈 등의 파라미터가 결정되어야 한다.

특히 영구자석 회전기의 경우, 타 회전자 타입과는 달리 회전자의 축방향 양단에 엔드 권선이 없게 된다. 즉, 영구자석 회전자의 축방향 길이를 늘릴 수 있는 기계적 여유 공간이 존재한다. 따라서 오버행을 도입하여 공극 자속밀도를 극대화시키고 출력밀도를 최대화 할 수 있다. 지금까지 설계단계에서 오버행 파라미터는 경험적 또는 프린징 자료의 가정에 의해 이루어졌다. 그러나 회전자 자체의 고풍출력화가 요구됨에 따라 회전기가 소형화되고 영구자석 회전자 타입도 다양화 됨에 따라 오차를 많이 수반하게 되었다 [1].

본 논문에서는 여러 가지 영구자석 회전자 타입에 대하여 오버행 길이에 따른 오버행 효과를 분석하고 실제 설계에 반영하고자 한다. 우선 오버행 해석법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소법을 이용하여 동특성 해석을 수행하고 시험에 의해 그 결과를 비교하였다. 오버행을 고려한 해석은 3차원 유한요소법이 원칙적으로 필요하게 되지만 시간 및 오차율에서 비효율적이므로 본 논문에서는 영구자석 파라미터의 변경에 의한 2차원 유한요

표 1. PMG 해석모델 사양

Rated	Voltage	V	170~220
	Current	A	3
	Speed	rpm	1800
Stator	Outer diameter	mm	Ø190
Rotor	Inner diameter	mm	Ø40
Pole			8
Magnet	Br (Ferrite)	T	0.4 (20℃)

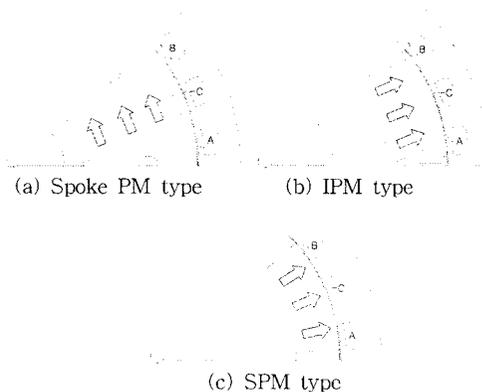


그림 1. 오버행 분석을 위한 회전자 타입

3. 오버행 해석 방법론

3.1 오버행 특성 고찰

회전자 타입에 따른 오버행 효과를 분석하기 전에 오버행 해석에 대한 방법론을 검증하여야 한다. 오버행이란 회전자의 고정자에 대한 한쪽 방향의 축방향 길이의 차로써 회전자의 영구자석 단면적이 늘어나 결국 공극자속밀도를 향상시켜 출력밀도를 극대화시킨다. 이러한 오버행을 고려한 동특성 해석방법을 2차원 유한요소법을 이용하여 제안하고 그 결과를 시험값과 비교를 통해 타

당성을 검증하였다 [2]. 여기에서는 고정자 적층길이 34mm, 회전자 적층길이 60mm로써 오버행 길이가 13mm가 되는 모델 (c)를 검증모델로 선택하였다.

먼저 2차원 유한요소법을 이용하여 오버행이 고려되지 않았을 경우, 즉 고정자 적층길이 34mm일 때 정자장 해석을 수행하고 이 때의 공극 자속밀도 분포를 산출한다. 다음으로 실제 13mm 오버행을 모델링하고 3차원 유한요소 해석을 수행한다. 그런 다음 축방향 가운데 공극부에서의 공극자속밀도 분포를 산출하고 이를 앞서 해석한 2차원 해석결과와 비교한다. 마지막으로 2차원 및 3차원 유한요소해석에서 발생된 자속밀도 차이만큼 2차원 유한요소 모델에서 기존 영구자석의 Br(잔류자속밀도)를 비례시켜 증가시키면 2차원 해석법으로도 오버행이 고려된 3차원 해석의 자속밀도 레벨로 유지할 수 있게 되고 2차원으로 동특성 해석도 가능하게 된다. 그림 2에 영구자석의 감자특성 곡선상에서 잔류자속밀도 증가되어 오버행 효과를 고려하는 원리를 나타내었다.

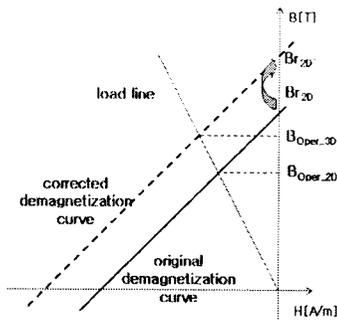


그림 2. overhang 고려 해석 방법

3.2 오버행에 의한 자속밀도 검증

그림 3은 오버행이 고려되지 않은 2D 유한요소해석과 13mm 오버행이 고려된 3D 유한요소해석에 의한 공극자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 이 분포는 축방향 코어 길이의 1/2 지점에서 1극에 대하여 원주방향으로 공극자속밀도를 나타낸 것이다. 더욱이 참고로 회전기의 고정자 및 회전자 엔드 부분에서의 자속의 누설로 인해 실제 공극 중앙에서 자속밀도 하락 정도를 확인하고자 오버행을 고려하지 않은 3D 해석 결과도 같이 나타내었다. 해석결과를 분석해 본 결과 13mm 오버행 때문에 약 33.16%의 공극자속밀도가 증가되었음을 알 수 있다. 2차원 해석에서 원래는 영구자석 잔류자속밀도 Br을 0.4[T]가 되는 감자곡선을 이용하여 해석을 수행하여야 하나 본 오버행에 의하여 약 33.16%가 증가된 0.522[T] 잔류자속밀도를 가지고 2차원 해석을 수행하면 오버행이 고려된 효과를 줄 수 있으며 그림 3의 3차원 해석을 이용한 13mm 오버행 해석 결과와도 일치함을 확인하였다.

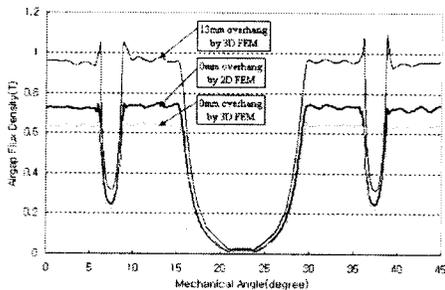


그림 3. 2D, 3D 해석에 의한 공극자속밀도 비교

3.3 오버행을 고려한 동특성 해석법 검증

오버행을 고려한 2차원 해석 방법에 의한 발전기의 무부하, 부하 특성을 해석해 보았다. 발전기 부하에 역률 1인 순수 저항 부하가 연결되어 있을 때를 기준으로 하였다. 해석방법의 타당성 검증을 위한 시험장치는 다음의 그림 4와 같이 연결되었다.

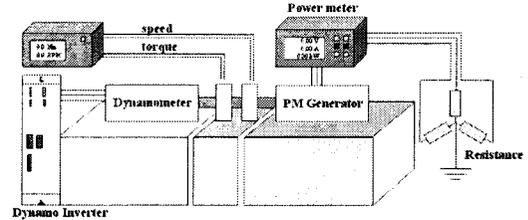


그림 4. 발전기 부하 시험을 위한 시험 장치

그림 5는 1800rpm으로 회전하고 있을 경우 무부하 역기전력 파형이다. 무부하 역기전력은 해석값이 208.11[V]이고 시험값은 208.5[V]로 오차율은 0.2% 정도이다. 오버행을 고려하지 않았을 경우 무부하 역기전력값은 173.7[V]로 오버행에 의한 자속집중 효과가 상당히 큼을 알 수 있다. 영구자석 발전기의 경우 대부분 정류를 통과하고 난 다음 다시 AC 전력을 제어하므로 정현적인 역기전력 파형보다는 출력 밀도를 더욱 우선으로 고려한다.

PMG 부하단에 상당 40[Ω]을 Y결선으로 연결하고 전압 전류 각각의 파라미터를 식 (1)과 같은 전압원 해석과 실제 시험을 통해 부하시 PMG 특성을 분석하였다.

$$E_a = R_a I_a + L_1 \frac{dI_a}{dt} + R_{load} I_a \quad (1)$$

그림 6에서 보듯이 부하 특성 해석과 시험 결과와의 오차는 거의 없었음을 알 수 있다. 따라서 본 overhang 해석 방법의 타당성을 검증할 수 있었다.

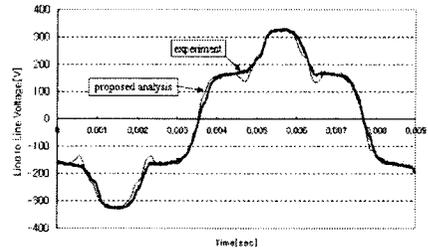


그림 5. 무부하 역기전력 특성 해석 및 시험 결과

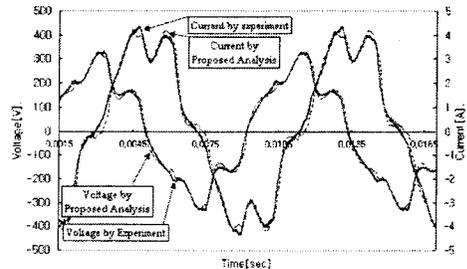


그림 6. 부하 역기전력 특성 해석 및 시험 결과

4. 회전자 타입에 따른 오버행 효과

결국 오버행이 1차적으로 공극의 자속을 집중시켜 고정자에 전달되는 공극자속밀도를 상승시킨다는 것이 검증되었다. 그러나 이러한 공극자속밀도의 상승 정도는

영구자석 회전기의 설계 결과에 따라 달라진다. 즉, 극소강판 종류에 따른 포화 정도에 의해 상승 정도가 달라지며 특히 영구자석 회전자 타입에 따라서 오버행 효과 정도가 달라진다. 따라서 일반적인 프링징 회로 가정에 의한 자기회로로는 실제 결과와 비교하여 많은 오차를 수반하므로 다음과 같은 유한요소법에 의한 오버행 해석이 필수적이다.

그림 7은 영구자석 회전자 타입에 따른 자속밀도 분포 결과로 이때의 영구자석 체적은 서로 같다. 오버행은 13mm일 경우의 해석결과를 나타내었다.

그림 8은 이미 분석한 spoke PM 회전자의 오버행 길이에 따라 3D 유한요소법을 이용하여 공극자속밀도를 산출한 결과이다. 그림 9는 매입형 PM (IPM) 회전자의 경우의 결과이며 그림 10은 표면부착형 PM (SPM)의 결과이다. 그림 8~그림 10의 결과를 종합하면 그림 11과 같은 그래프로 나타낼 수 있다. 우선 SPM의 경우 공극 자속밀도 레벨 자체도 낮지만 오버행 길이에 대하여 거의 공극자속밀도가 증가하지 않는다. 즉 SPM의 경우 오버행 효과가 거의 존재하지 않는다. 반면 IPM과 Spoke PM의 경우 오버행 효과가 크게 나타나는데 두 가지 측면에서 서로 다른 현상이 발생한다.

즉, 공극자속밀도는 spoke PM 회전자의 경우 매우 높은 레벨이지만 오버행이 늘어남에 따라 요크의 자속포화가 커지게 되어 오버행 효과가 빨리 포화된다. IPM 회전자의 경우 자속밀도 레벨은 영구자석 단면적이 줄어들게 되어 SPM보다 작지만 오버행 효과가 두드러지며 포화 레벨이 커지게 된다.

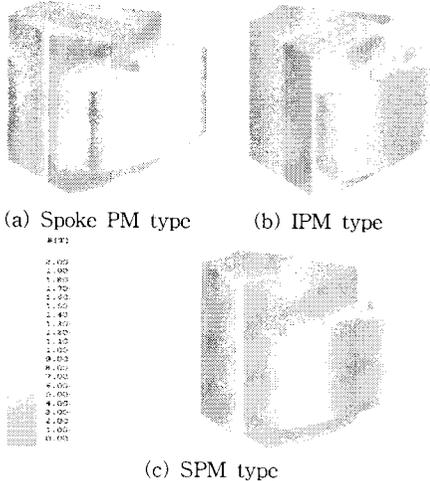


그림 7. 영구자석 회전자 타입에 따른 3D자속밀도 분포

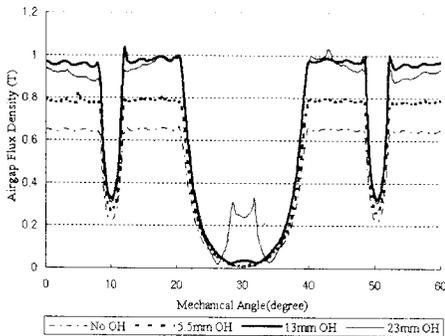


그림 8. Spoke PM 회전자의 오버행 길이에 따른 공극 자속밀도 분포 결과

종합적으로 출력밀도를 높이기 위한 타입은 spoke type 회전자에 약 38% 오버행을 채택하였을 때임을 확인할 수가 있었다.

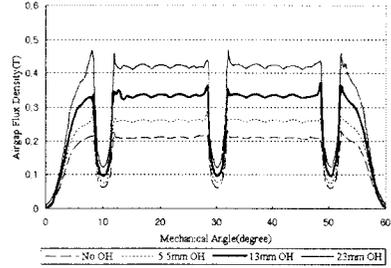


그림 9. IPM의 오버행에 따른 공극 자속밀도 분포

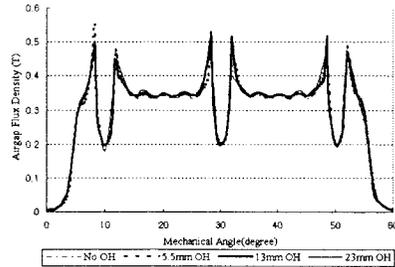


그림 10. SPM의 오버행에 따른 공극 자속밀도 분포

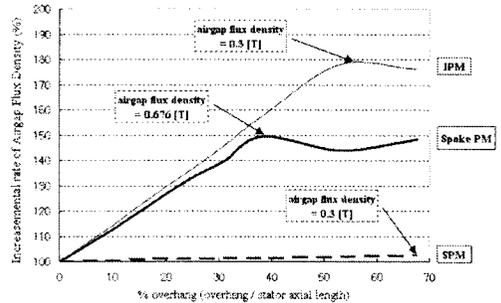


그림 11. 회전자 타입별 오버행 효과 분석

5. 결 론

본 논문에서는 오버행을 설계함에 있어 유한요소법을 이용하여 효과적으로 해석 및 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 다양한 영구자석 회전자 타입에 따른 오버행 효과가 각기 달라짐을 확인하였고 출력밀도 증대를 위한 최적의 모델을 제시하였다. 오버행 효과는 철심 재질, 구조 및 전류에 대한 자속밀도 등에 대한 다변수 합수가 됨을 확인하였고 향후 설계에서 직접 이용될 수 있도록 오버행 함수의 정립이 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글
본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라우축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] B.J. Chalmers, "Performance of interior type permanent magnet alternator", IEE Proc. on Electrical Power Applications, Vol.141, No.4, July 1994, pp.186-190.
- [2] Ki Chan Kim and Ju Lee, "The Dynamic Analysis of a Spoke Type Permanent Magnet Generator with Large Overhang", IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No. 10, October 2005