

오버행을 고려한 영구자석 동기 발전기의 동특성 해석 연구

김기찬, 이 주*

한양대학교, 에너지변환연구실*

The Study on a Dynamic Analysis of Permanent Magnet Generator considering Overhang Effect

Ki-Chan Kim, and Ju Lee*

Hanyang University, Energy Conversion Lab.*

Abstract : The purpose of this paper is characteristic analysis of permanent magnet generator (PMG) for automatic voltage regulator (AVR) power of brushless synchronous generator. However, this PMG has a spoke type permanent magnet rotor with large overhang for high power density, characteristic analysis considering concentration effect of air-gap flux density due to the overhang should be performed. 3D transient finite element method (FEM) analysis is good solution for overhang parameter, but this method needs too much calculation time. In this paper, we examined the overhang effects based on overhang length and material of rotor core by using 2D and 3D static FEM analysis, and proposed 2D dynamic FEA model considering overhang parameter which gives good and rapid results. The proposed method is verified by the test results of no load, load and short circuit test.

Key Words : finite element method, overhang, permanent magnet generator, and spoke type rotor

1. 서 론

산업용으로 사용되는 발전기는 일반적으로 brushless 권선형 동기 발전기이며 회전자도 제작비용 저감을 위해 원동형이 아닌 돌극형 타입이다. 자동전압조절기(AVR, Automatic Voltage Regulator)는 발전기의 출력전압을 일정하게 조절하기 위해 필수적인 부품이다. AVR에 입력전원을 공급하기 위한 방법으로 크게 Shunt, 보조권선, 영구자석발전기(PMG) 방식이 이용되는데 이 중 PMG 방식은 고조파 영향이 적고 시스템 측면에서도 안정적이어서 발전기 신뢰성을 향상시키는 부품이다.

현재까지 국내외 산업용 발전기 주력 생산업체 중 PMG 방식을 채택하고 있는 업체는 그렇게 많지 않다. 이 중 해외의 대표적인 발전기 생산업체의 PMG 모델을 입수하여 그 특성을 해석하고 성능을 분석해 보기로 하였다.

영구자석 회전기는 로터부의 자기회로에 따라 표면부착형(SPM), 매입형(IPM), Spoke PM 회전자로 구분되는데 Spoke type 영구자석 회전기는 자속을 집중시켜 공극자속밀도를 높이고 그 결과 출력을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 본 PMG 모델은 전기자에 쇠교되는 자속을 최대화하기 위해 Spoke type 회전자와 또한 overhang 회전자를 채택하였다.

이러한 overhang은 영구자석형 회전기의 설계과정에서 공극 자속밀도 레벨을 변동시켜 출력전압을 결정하기 위한 권선설계가 어려워진다. 또한 등가회로를 이용한 설

계 프로그램에서 경험에 의한 보정계수를 이용한 overhang 길이 선정이 가능하나 그 정밀도가 떨어진다 [1]. 또한 2차원 유한요소법에 의한 해석방법은 overhang 모델링 자체가 불가능하므로 overhang 특성을 알 수 없다. 따라서 overhang에 대한 자속밀도 집중 효과를 분석하기 위해서는 3차원 유한요소법의 적용이 필수적이다. 그러나 3차원 유한요소 해석 방법은 PMG 무부하, 부하 및 단락 특성과 같이 동특성 해석을 수행하는데 막대한 시간 및 비용이 발생되므로 좋은 solution이 아니다 [2].

본 논문에서는 복잡한 AVR 부하보다는 간단한 저항 부하를 이용하여 PMG 자체의 특성을 분석하고자 하며, PMG의 overhang을 고려하고 PMG의 무부하, 부하 및 단락특성의 동특성을 해석하기 위하여 2차원, 3차원 유한요소법을 적절히 이용하여 특성 해석할 수 있는 방법을 제시한다. 그리고 실제로 PMG 단품의 특성 시험을 실시하고 동특성 해석 결과와의 비교를 수행하여 본 해석 방법에 대한 타당성을 입증하고자 한다. 또한 설계프로그램에서 적용되는 overhang 보정 계수의 보안을 통하여 보다 정밀한 설계 결과를 얻을 수가 있다 [3].

2. 시스템 및 PMG 사양

2.1 Brushless 동기발전기 시스템

그림 1에 산업용 발전기의 시스템 구성을 나타내었다.

주 발전기와 여자기, PMG가 동일 축에 연결되어 있고 원동기에 의해 동일한 속도로 회전하고 있다. AVR에서는 주 발전기 출력전압 중 1상을 센싱하여 기준전압과의 비교를 통한 스위칭 duty비에 의해 여자기 입력 파위가 조절하는데 결국 여자기 입력 파위는 PMG에서 발생하는 출력을 이용하게 된다.

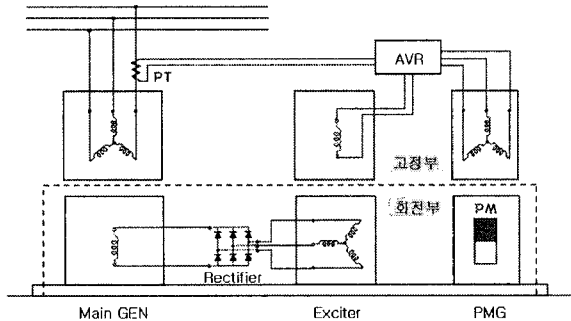


그림 1. Brushless 동기발전기 시스템

2.2 PMG 사양

본 논문의 해석모델인 PMG 사양을 표 1에 나타내었다. overhang은 13mm이며 spoke type 회전자에 적합한 ferrite 자석을 사용하였고 overhang의 자속 집중 효과를 최대화하였다. 여기에서 PMG 정격사양은 AVR 정격을 기준으로 하였다.

표 1. PMG 해석모델 사양

Rated	Voltage	V	170~220
	Current	A	3
	Speed	rpm	1800
Stator	Core length	mm	34
	Outer diameter	mm	Ø190
	Inner diameter	mm	Ø154.2
	Slot		24
	Airgap	mm	0.6
Rotor	Core length	mm	60
	Inner diameter	mm	Ø40
	Pole		8
Winding	Turn/coil		45
	Coil pitch		#1~#4
Magnet	Size	mm	t19x46x60
	Br (Ferrite)	T	0.392 (20°C)
Core Material (Stator/Rotor)			S30 / S45C
Overhang		mm	13

3. PMG 오버행 해석

3.1 오버행 해석 방법 및 모델링

먼저 2차원 유한요소법을 이용하여 overhang이 고려되지 않았을 경우, 즉 stator 적층길이가 34mm일 때 static

전자장 해석을 수행하고 공극 자속밀도 분포를 산출한다. 다음으로 overhang 효과를 고려하기 위해 실제 13mm overhang을 3D로 모델링하고 3차원 유한요소 해석을 수행한다. 그런 다음 한 가운데 공극부에서의 공극자속밀도 분포를 산출하고 이를 2차원 해석결과와 비교한다. 마지막으로 2차원 및 3차원 유한요소해석에서 발생된 자속밀도 차이만큼 2차원 유한요소 모델에서 기존 영구자석의 Br(잔류자속밀도)를 비례시켜 증가시키면 2차원 해석법으로도 overhang이 고려된 3차원 해석의 자속밀도 레벨로 유지할 수 있게 되고 2차원으로 동특성 해석도 가능하게 된다. 즉 그림 2와 같이 overhang에 의한 자속밀도 증가를 영구자석의 잔류자속밀도 증가로 표현할 수 있게 된다.

이러한 overhang 효과는 스테이터, 로터 코어의 재질 조합에 따라 서로 달라지므로 유의해야 한다. 또한 overhang이 없는 PMG 모델을 3D FEM에 의해 공극자속밀도를 분석해 보면 2D FEM에 의한 공극자속밀도보다 더 낮게 계산된다. 즉 엔드 코어 단에서의 자속누설이 크게 발생하고 있음을 알 수 있으며 적층 길이에 비해 로터 외경이 큰 경우 이 현상이 현저하게 발생한다. 따라서 overhang이 없는 PMG일 경우라도 2차원으로 동특성 해석하기 위해서 마찬가지로 영구자석 잔류자속밀도의 보정이 필요하게 된다.

본 논문에서의 FEM 해석은 Maxwell 상용 소프트웨어를 이용하였다. 그림 3은 PMG 특성해석을 위한 2D, 3D 모델링이다. 3D 모델에서는 영구자석에 의한 무부하 공극자속밀도만 해석하면 되므로 전기자 권선은 모델링하지 않았다.

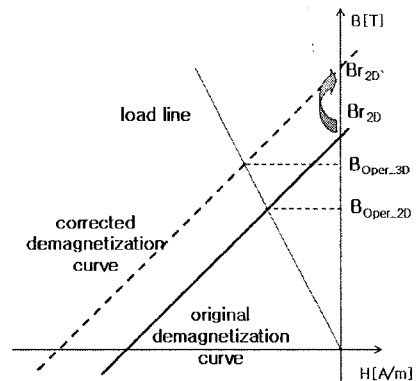


그림 2. 오버행 고려된 영구자석 감자 특성 곡선

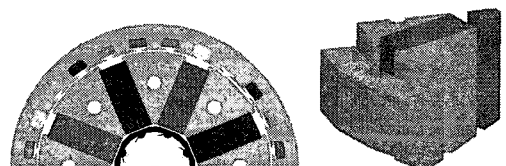
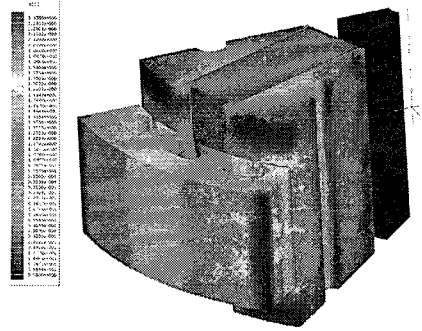


그림 3. 오버행 해석을 위한 전자장 해석 모델

3.2 동특성 해석을 위한 오버행 보정

그림 4는 2D 해석과 overhang이 고려된 3D 해석에 의한 공극자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 또한 공극자속의 누설 정도를 확인하고자 overhang을 고려하지 않은 3D 해석 결과도 나타내었다. 해석결과를 분석해 본 결과 13mm overhang에 의해 약 33.16%의 자속밀도 증가 효과가 발생되었으며 2차원 해석에서 영구자석 잔류자속밀도 B_r 을 0.392[T]에서 0.522[T]로 증가시켜 모델링 하였을 경우 그림 4의 13mm OH(3D FEM) 결과와도 일치함을 확인하였다. 그림 5에서는 축방향에 따라 공극자속밀도를 산출하여 자속 누설 정도를 보여주고 있다.



(b) 3D FEM 자속밀도 분포 (no load operation)
그림 6. 2D, 3D FEM 해석 결과

4. 동특성 해석 결과 및 시험결과 분석

이러한 방법에 의해 PMG 자체의 무부하, 부하 특성을 해석해 보았다. 실제 PMG 부하는 AVR이지만 PMG 자체의 부하 특성을 분석하기 위해 AVR 대신 저항 부하를 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 해석 방법 및 결과를 검증하기 위해 그림 7과 같이 PMG 특성 시험을 실시하고 시험결과를 해석결과와 각각 비교하였다.

4.1 PMG 무부하 특성

1800rpm으로 회전하고 있을 경우 무부하 역기전력 파형을 그림 8에 나타내었다. 무부하 역기전력은 해석 값이 208.11[V]이고 시험 값은 208.5[V]로 오차율은 0.2% 정도이다. 참고로 overhang을 고려하지 않았을 경우 무부하 역기전력 값은 173.7[V]로 overhang의 효과가 상당히 클 수 있다. 그림 9는 역기전력 파형의 고조파 분석 결과이다. 5, 7, 11, 13, 19고조파 등이 발생됨을 알 수 있으며 THD는 24.3%로 높다. 그러나 AVR 부하(DC 출력)로써 작용되는 PMG는 THD가 시스템 성능에 크게 영향을 주지 않는다. 만일 정밀제어용 전동기로 이러한 spoke type 로터가 사용된다면 로터 극 형상 설계는 필수적이라 할 수 있다.

4.2 PMG 부하 특성

PMG 부하단에 상당 24[Ω], 32[Ω], 36[Ω], 40[Ω], 48[Ω], 60[Ω]을 연결하고 각각의 파라미터를 해석과 시험을 통해 부하시 PMG 특성을 분석하였다. 40[Ω] 부하일 경우 그림 10의 spice 회로를 이용하여 FEM과 회로를 coupling한 다음 시간차분법으로 부하 특성을 계산하였다. 그림 11에서 보듯이 부하 특성 해석과 시험 결과와의 오차는 거의 없음을 알 수 있으며 따라서 본 overhang 해석 방법의 타당성을 검증할 수 있었다.

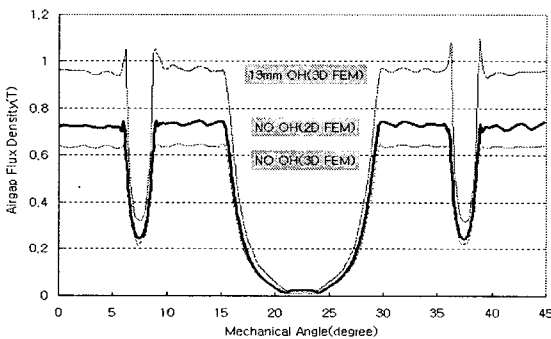


그림 4. 2D, 3D 해석에 의한 공극자속밀도 비교

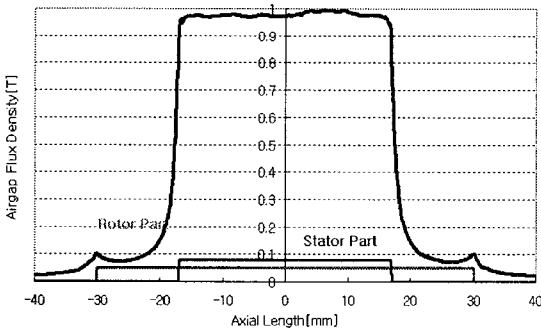
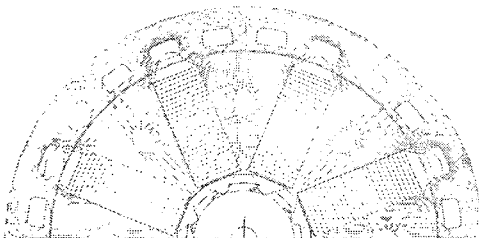


그림 5. 축방향에 대한 자속밀도 분포



(a) 2D FEM 자속 분포 (no load operation)

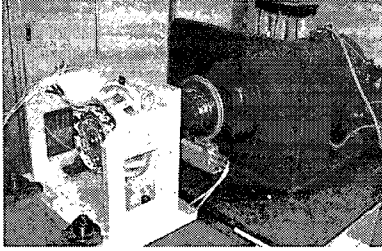


그림 7. PMG 단품 시험 Set

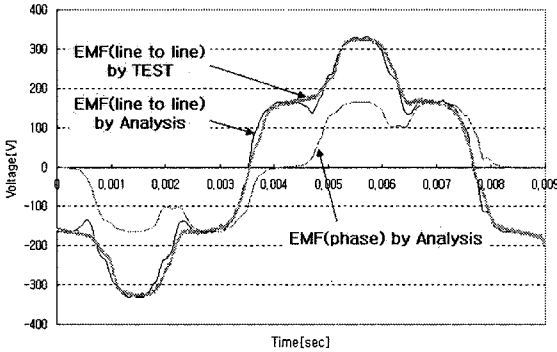


그림 8. 무부하 역기전력 특성 해석 및 시험 결과

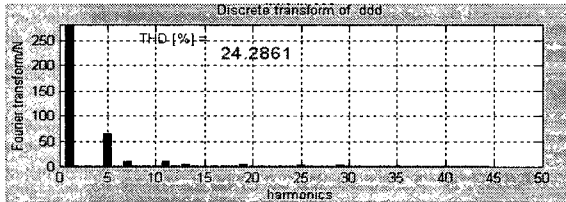


그림 9. 무부하 역기전력 파형 고조파 분석 결과

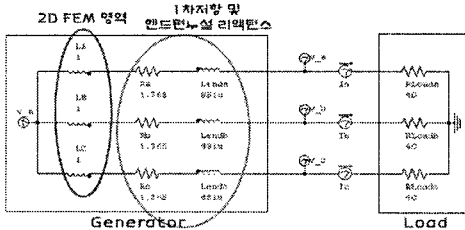


그림 10. 40[Ω] 저항 부하 Spice 회로

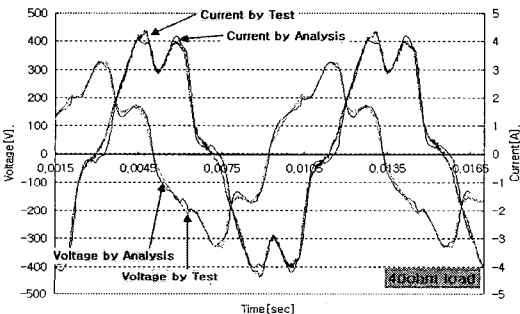


그림 11. 40[Ω] 저항 부하 운전시 전압, 전류 해석 및 시험 결과

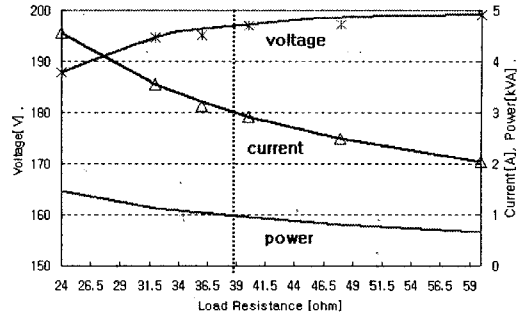


그림 11. 저항 부하 변동에 따른 부하 특성 곡선

5. 회전자 타입에 따른 오버행 특성 분석

그림 12는 현재 사용되고 있는 영구자석 회전기의 대표적인 회전자 타입들로서 본 논문에서는 오버행 효과를 분석하기 위한 모델로 제시되었다. 비교 해석을 수행하기 위하여 고정자 치수와 회전자의 영구자석 체적을 동일하게 두었다. 오버행은 13mm일 경우의 해석결과를 나타내었다.

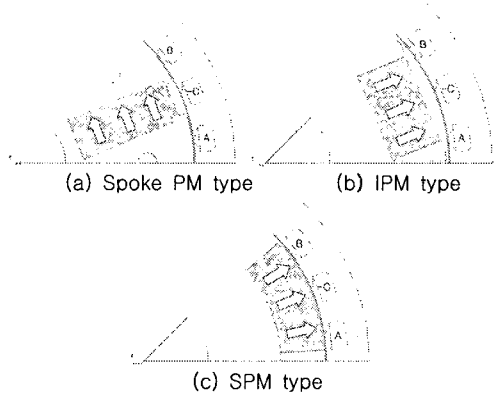


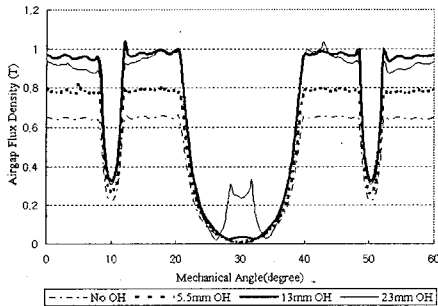
그림 12. 오버행 분석을 위한 회전자 타입

그림 13 (a)는 이미 분석한 spoke PM 회전자의 오버행 길이에 따라 3D 유한요소법을 이용하여 공극자속밀도를 산출한 결과이다. 그림 13 (b)는 매입형 PM (IPM) 회전자의 경우의 결과이며 그림 13 (c)는 표면부착형 PM (SPM)의 결과이다. 그림 13의 결과들을 종합하면 그림 14와 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.

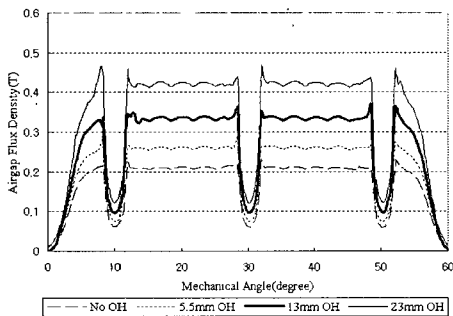
즉, 공극자속밀도는 spoke PM 회전자의 경우 매우 높은 레벨이지만 오버행이 늘어남에 따라 요크의 자속포화가 커지게 되어 오버행 효과가 빨리 포화된다. IPM 회전자의 경우 자속밀도 레벨은 영구자석 단면적이 줄어들게 되어 SPM보다 작지만 오버행 효과가 두드러지며 포화 레

벨이 커지게 된다.

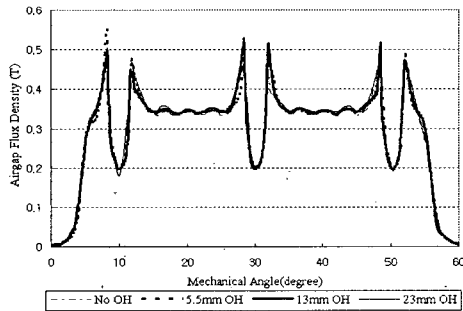
종합적으로 출력밀도를 높이기 위한 타입은 spoke type 회전자에 약 38% 오버행을 채택하였을 때임을 확인할 수가 있었다.



(a) Spoke PM 회전자의 오버행 길이에 따른 공극 자속밀도 분포 결과



(b) IPM의 오버행에 따른 공극 자속밀도 분포



(c) SPM의 오버행에 따른 공극 자속밀도 분포

그림 13. 회전자 타입에 따른 오버행 대 공극자속밀도 분포 해석 결과

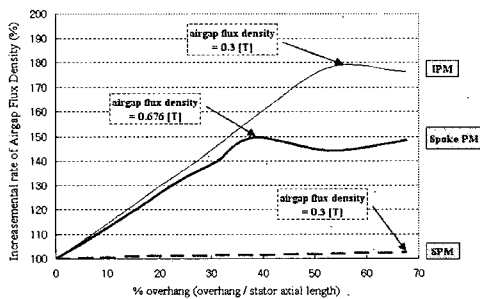


그림 14. 회전자 타입별 오버행 효과 분석

5. 결론

본 논문에서는 권선형 동기 발전기의 AVR 전원용 영구자석 발전기(PMG)를 특성 해석하고자 하였다. 본 PMG는 overhang을 가진 spoke type 회전자이므로 overhang을 고려하여 공극자속밀도 레벨을 정확히 해석하여야 한다. 본 논문에서는 2D, 3D FEM 해석을 적절히 이용하여 최종적으로 overhang이 고려된 2차원 모델을 완성하고 동특성 해석을 수행하였다. 또한 시험결과와 비교를 통하여 본 해석 방법의 타당성을 검증하였다. 마지막으로 다양한 영구자석 회전자 타입에 따른 오버행 효과가 각기 달라짐을 확인하였고 출력밀도 증대를 위한 최적의 모델을 제시하였다. 향후, 설계에 반영될 수 있는 overhang 계수 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] J.R. Hendershot Jr and TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Clarendon Press, Oxford, 1994
- [2] 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.
- [3] 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