

3상 브릿지 정류기를 갖는 초고속 전동발전기의 회전자 손실 해석

장석명, 조한욱, 정연호*, 양현섭**

충남대학교 전기공학과, 한국전기연구원*, 삼성테크윈**

Analysis on Rotor Losses in High-Speed Motor/Generator with 3-Phase Rectifier

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Yeon-Ho Jeong*, Hyun-Sup Yang**
Chungnam Nat'l Univ., KERI*, Samsung Techwin**

Abstract - Due to the high peripheral speed of the rotor and the relatively high conductivity of the magnets used, rotor eddy current loss can be substantial. On the basis of the coupled FEM and analytical method, this paper deals with the rotor loss analysis in permanent magnet high-speed machine with 3-phase rectifier.

1. 서 론

일반적으로 전기기기의 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손으로 나눌 수 있다. 동손은 전류의 저항 손에 해당되며, 철손은 재질 자체의 자기 이력 특성으로 인한 히스테리시스손과 유도 전류로 인한 손실인 와전류 손으로 나눌 수가 있다. 또한, 공극 자속밀도의 비정현적 분포에 의한 회전자 손실 그리고, 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전 조건이나 효율 등을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 손실을 정확하게 예측하여 설계 하는 것은 매우 중요하다. 특히, 초고속 시스템에 적용되는 동기 전동기는 주로 영구자석 구속용 슬리브와 영구자석을 갖는다. 그리고 이러한 재질들은 도전성을 띠므로 회전자의 와전류 손실을 유발한다. 와전류 손실은 고속용 기기에서 발생하는 회전자의 온도상승의 주원인이 되고 특히 고속 회전자의 냉각이 까다로운 점을 고려할 때 회전자 손실을 정확히 계산해 내는 것은 매우 중요하다[1].

또한, 발전기의 부하측에 전력변환 장치가 결합될 경우, 전력용 다이오드의 정류특성에 의하여 출력 상전압 및 상전류에 고조파를 유발시키며, 이는 공극자속밀도의 왜곡에 영향을 미치므로 회전자 손실의 증가에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 논문에서는 설계된 5kW, 40000rpm급 고속 전동발전기에 대하여, 전력변환장치를 갖는 해석 모델을 제시하고, 이때 발생하는 회전자에서의 와전류 손실을 예측하였다. 해석은 유한요소법과 전자기 해석법을 적용하였고, 포인팅 벡터를 이용하여 각 고조파 차수 및 영역에 따른 손실의 분포를 계산하였다[2].

2. 정류기를 갖는 초고속 발전기 시스템

2.1 시스템 구성 및 정류 특성 고찰

발전모드에서의 전력변환기 구성은 그림1과 같다. 발전기의 출력은 고속의 정류다이오드로 정류하여 직류로 변환한 후에 이를 다시 역변환함으로써 60 (Hz)의 상용전원으로 변환한다. 역변환기는 IGBT를 이용한 인버터를 사용하게 되며 출력측에는 인덕터와 커패시터로 구성된 교류 필터가 설치된다.

본 논문에서는 IGBT를 포함하는 인버터를 제외한 3상 Full-Bridge 정류기만을 적용한다.

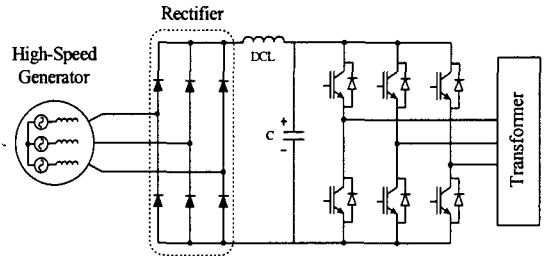


그림 1. 전력변환장치가 결합된 전동발전기 시스템

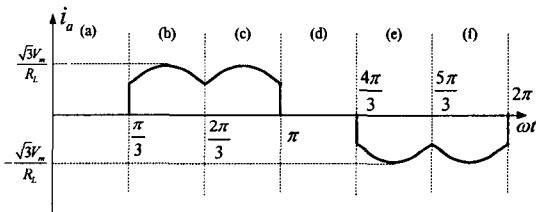


그림 2. 상전류의 파형과 도통 시간

표 1. 초고속 발전기 제원

Items	Specification
Stator	Number of Slots : 18
	Outer Diameter : 144 (mm)
	Stack Length : 55 (mm)
	Turns per Phase : 30 (turn)
Airgap	Airgap Length : 0.5 (mm)
Rotor	Number of Poles : 2
	Outer Diameter : 32 (mm)
	Stack Width : 55 (mm)
	Residual Flux Density: 1 (T)
Rating	Power : 5 (kW)
	Speed : 40000 (rpm)
	Torque : 1.2 (Nm)

그림 1에서의 3상 브릿지 정류기는 매우 일반적으로 이용되는 것으로, 출력 DC 전압에 6개의 펄스 리플이 나타난다. 또한, 각 다이오드는 120°동안 도통하며, 가장 높은 값의 순시 선간 전압을 갖는 공급선 사이에 연결된 다이오드의 쌍이 도통하게 된다. 그림 2는 3상 브릿지 정류기에 의한 출력 상전류 특성 및 다이오드의 도통시간을 나타낸다.

2.2 해석모델

고속 회전기는 회전수의 자속에 비례하는 원심력이 회전체에 작용하여 상당한 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 따라서, 회전자는 고속 회전시 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 기계적인 스트레스를 견디도록 견고한 구조가 되어야 한다. 고속회전에서 영구자석 회전자의

기계적인 강도를 높이기 위해 자성 또는 비자성의 원통형 슬리브를 부착하기도 한다. 본 논문에서는 기계적인 스트레스를 감소시키고, 진동발전기의 소형화를 목적으로 링(Ring)형태의 영구자석에 원통형 슬리브를 부착한 회전자를 갖는 해석모델에 대하여 손실의 해석을 수행하였다. 해석모델의 계원은 표 1과 같다.

2.3 전력변환기의 유무에 따른 출력특성 비교

그림 3과 그림 4는 각각 전력변환기의 유무에 따라 출력되는 상전압 및 상전류를 나타낸다.

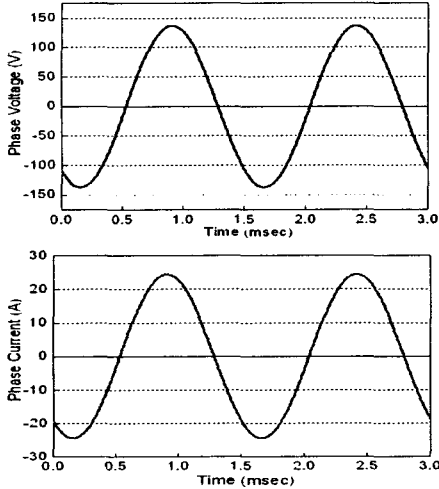


그림 3. 정류기가 결합되지 않았을 때 발전기의 출력특성

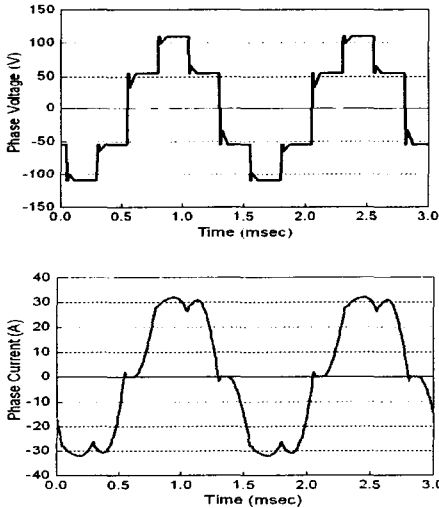


그림 4. 정류기가 결합되었을 때 발전기의 출력특성

3. 손실의 계산

2.1 유한요소해석 및 2차원 푸리에 변환

유한요소법에 의한 해석에서는 회전자 표면에서의 자속밀도를 통하여 자계고조파를 산출한다. 먼저 해석모델에서 1 슬롯피치를 15개의 회전자 위치로 나누어 각 위치에 대하여 정자계 해석을 수행한다. 이때의 자속밀도 데이터는 회전자의 슬리브 표면에서 계산되며 공간고조파 정보와 시간고조파 정보를 동시에 갖는 2차원 행렬형태를 갖는다.

2.2 전자장 특성 방정식

투자율 μ , 도전율 σ 를 갖는 모든 영역에 대해 만족

하는 일반화된 지배방정식은 식(1)로 정리된다.

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} = j\omega\mu\sigma A_x \quad (1)$$

여기서, A 는 자기 벡터포텐셜이고, 식(1)로 표현되는 미분방정식의 일반해는 식(2)으로 표현될 수 있다.

$$A_{xi} = (C_i e^{\gamma x} + D_i e^{-\gamma x}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (2)$$

따라서, 각 영역에서의 자속밀도 특성식은 식(3), 식(4)와 같다.

$$B_{xi} = -\frac{\partial A_{xi}}{\partial y} = \gamma(C_i e^{\gamma x} - D_i e^{-\gamma x}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (3)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{xi}}{\partial x} = -j\beta(C_i e^{\gamma x} + D_i e^{-\gamma x}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (4)$$

여기서, $\gamma = \sqrt{\beta^2 + j\omega\mu\sigma}$ 로 정의되고, $\beta = \pi/\tau$ 로 정의된다. 그리고, C_i 와 D_i 는 각 영역에서의 경계조건에 의하여 계산되어 진다.

2.3 포인팅 정리에 의한 손실계산

손실을 계산하는데 있어 포인팅 벡터를 이용하게 되면 각 영역에 유입되는 총에너지와 유출되는 총에너지를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 직접적으로 회전자 손실의 분포를 알아낼 수는 없으므로 각 영역 표면에서의 에너지 유출입을 계산하여 산술적으로 각 영역이 갖는 손실의 양을 계산할 수 있다.

포인팅 벡터 P 는 구하고자하는 영역표면에서의 전계의 세기 성분과 자계의 세기 성분으로 구할 수 있으며, 정상상태 정현파 자계에서의 포인팅 벡터는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \text{Real}(E_x \times H_x^*) \quad (5)$$

여기서, E_x 는 축방향 성분을 갖는 전계의 세기, H_x^* 는 자계의 접선성분 세기의 공역복소수이다. E_x 와 H_x^* 는 자속밀도 특성식 B_x , B_y 에 의해 계산이 가능하다. 그리고, 공극에서 슬리브, 슬리브에서 영구자석, 영구자석에서 허브로 전달되는 손실을 각각 P_{III} , P_{II} 그리고, P_I 라 가정하면 슬리브, 영구자석, 축에서 발생하는 손실은 각각 식(6)에 의하여 구할 수 있다.

$$P_{sleeve} = P_{III} - P_{II}$$

$$P_{magnet} = P_{II} - P_I$$

$$P_{shaft} = P_I$$

(6)

4. 해석 결과 및 검토

그림 4와 그림 5는 전력변환장치의 유무에 따른 회전자 표면 자속밀도의 고조파 분석 결과를 나타낸다. 그림 4에서 보여지는 바와같이, 전력변환장치가 결합되지 않은 경우 발생하는 주요 고조파 성분은 시간고조파 18차에서 공간고조파 17차와 19차를 갖으며, 시간고조파 36차에서 공간고조파 35차와 37차를 갖는다. 그림 5에서는 전력변환장치가 결합되었을 경우 회전자 표면의 자속밀도 고조파 성분을 나타낸다. 해석 결과는 전력변환장치가 결합되지 않은 경우와 매우 유사하나 그 크기가 다를 수 있다.

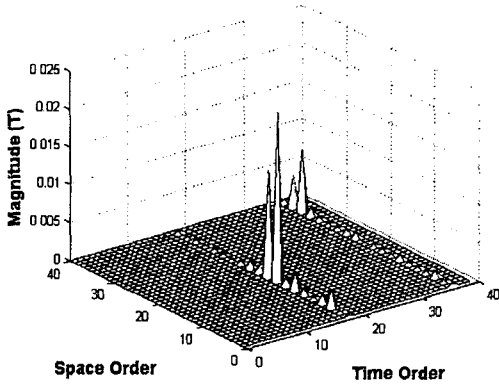


그림 4. 전력변환장치가 결합되지 않은 전동발전기의 자속밀도의 고조파 성분

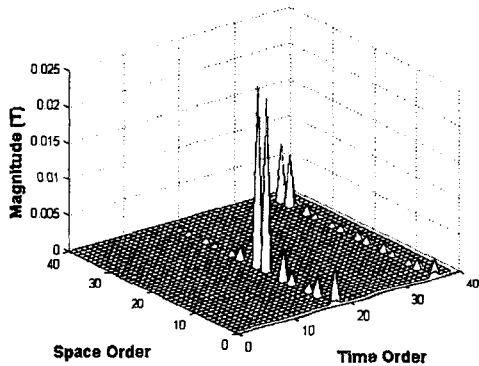


그림 4. 전력변환장치가 결합된 전동발전기의 자속밀도의 고조파 성분

표 2와 표 3은 3절에 제시된 손실의 계산 과정에 의해서 도출된 각 고조파 차수 및 영역별 손실특성을 나타낸다. 표 2는 전력변환장치가 결합되지 않은 전동발전기의 회전자 손실 특성을 나타내며, 이때, 영역별로 발생하는 손실의 비율은 슬리브에서 74.24%, 영구자석에서 25.39%이며, 축에서는 0.36%가 발생하고, 고조파의 차수에 따라서는 시간고조파 18차, 공간 고조파 17차에서 가장 큰 손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

표 3은 정류기가 결합된 전동발전기에서 발생하는 회전자 와전류 손실을 나타내는데, 영역별로 발생하는 손실의 비율은 슬리브에서 55.9%, 영구자석에서 42.79%, 축에서 1.29%가 발생한다. 고조파 차수에 따라서는 정류기가 결합되지 않은 경우와 마찬가지로 시간고조파 18차, 공간 고조파 17차에서 가장 큰 손실이 발생하는 것을 예측할 수 있으나 표에서 보여지는 바와 같이 시간고조파 18차에서 공간고조파 1차 성분이 갖는 손실의 크기가 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

또한, 전체 손실의 증가는 전력 변환장치-3상 정류기를 결합한 경우의 전동발전기 시스템이 전력변환장치를 갖지 않는 시스템의 경우보다 회전자 손실이 약 2.7 배 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력변환장치를 갖는 초고속 전동발전기에서 3상 정류기의 결합 여부에 따른 회전자 손실을 예측하였다. 본 연구는 초고속 기기의 설계시 회전자 손실의 예측 및 전력변환장치에 의해 발생하는 회전자 손

표 2. 정류기가 결합되지 않은 전동발전기의 손실 특성

Space order	Time order	
	18	36
1		
5	148.133	
7	13.277	
13	8.189	
15	1.2146	
17	319.019	
19	88.969	
23	0.333	
33		0.451
35		18.0165
37		3.913
Total	$P_{dens} = 579.4(18^{th}) + 22.4(36^{th})$ $= 446.8(\text{titanium sleeve})$ $+ 151.7(\text{magnet}) + 3.3(\text{shaft})$	

표 3. 정류기가 결합된 전동발전기의 손실 특성

Space Order	Time order	
	18	36
1	371.3768	88.9697
5	193.5593	82.5231
7	21.3369	11.0662
11	731712	2.0916
13	24.4640	5.0030
17	328.4321	2.2235
19	254.9014	1.8958
23	0.7509	0.5016
35		12.3016
37		13.1697
Total	$P_{dens} = 1202.2(18^{th}) + 256.6(36^{th}) + 163.9(54^{th})$ $= 906.8(\text{titanium sleeve})$ $+ 694.1(\text{magnet}) + 21.0(\text{shaft})$	

실의 증분을 쉽게 파악 할 수 있도록 하고, 특히, 회전자의 각 영역에서 발생하는 손실 특성 및 시간/공간 고조파에 대한 특성해석에 매우 용이할 것으로 사료된다. 에 대한 연구가 진행되어야 한다. 향후, 각 고조파에 의한 손실의 저감방안 및 열특성 해석이 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1]Mabu Sharkh, S, Harris, M.R., Irenji, N.T., " Calculation of rotor eddy current loss in high speed PM alternators", *Electrical Machines and Drives*, 1997 Eighth International Conference on (Conf. Publ. No. 444) , 1-3 Sep 1997 pp: 170-174
- [2]N. Boules, "Impact of slot harmonics on losses of high speed permanent magnet machines with a magnet retaining ring", *Electric Machines and Electromechanics*, 6, 527-539, 1981
- [3]K.Ng, Z.Q.Zhu, D.Howe, "Open Circuit Field Distribution in a Brushless Motor with Diametrically Magnetised PM Rotor, Accounting for Slotting and Eddy Current Effects", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.32, No.5, September 1996
- [4]K. Atallah, D. Howe, P.H. Melloor and D.A. Stone "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines" *IEEE Trans. on Industry Application*." vol.31, no.6, pp.60-62, 1999
- [5]장석명, 양현섭, 정상섭, 류동완, 최상규, 함상용, "고속용 영구자석 모터의 손실 특성" 대한전기학회 추계학술대회 1999, A권 pp.64-66.