

### 고속 영구자석 동기 전동기의 손실 특성

장석명, 조한욱, 최장영, 고경진  
충남대학교 전기공학과

### Characteristics of Power Losses in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Kyeong-Jin Ko  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - In high-speed PM machines, rotor losses form a larger proportion of the total losses than usual in conventional low speed machines. In order to maintain the mechanical integrity of a high-speed PM rotor intended for high-speed operation, the rotor assembly is often retained within a sleeve or can. The sleeve is exposed to fields produced by the stator from either the slotting or the mmf harmonics that are not synchronous with the rotor. These non-synchronous fields cause the significant rotor losses. An optimum design of high-speed PM machines requires the accurate prediction for these rotor losses. On the basis of analytical field analysis and 2D finite element analysis (FEA), this paper deals with the rotor losses.

#### 1. 서 론

최근 산업시스템이 다양해지고 에너지 절감요구가 높아짐에 따라 각종 전력변환기들은 고효율, 고품질, 고성능화되어 가는 추세이며, 전력변환기의 손실과 이에 의한 열의 발생은 효율 저하 뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용하므로, 저손실 소재 및 손실저감 방안에 대한 연구가 더욱 요구되고 있는 실정이다 [1]. 일반적으로 전기기기의 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손으로 크게 나눌 수 있다. 동손은 전류의 저항손에 해당되며, 철손은 재료 자체의 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스손과 유도전류로 인한 손실인 와전류손으로 나눌 수가 있다. 또한, 공기 자속밀도의 비정현적 분포에 의한 회전자 손실, 그리고 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전조건이나 효율 등을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 손실을 정확하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다.

#### 2. 철 손

##### 2.1 철손의 표현

철손은 시변하는 자계에 의하여 철심의 재료적 성질에 의해 발생하는 손실을 일컫는다. 이러한 철손에 대한 물리적 현상의 고찰은 많은 논문이나 문헌을 통해 제시되어 있지만, 철손의 복잡한 메커니즘에 대한 통찰에 관한 내용은 아직도 많은 연구가 요구된다.

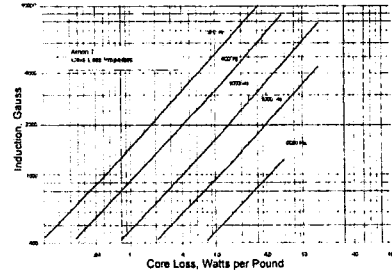
일반적으로 철손에 관련된 정보는 자속밀도나 주파수에 따른 단위 철손으로 제조업체에 의해 표나 그래프로 제공된다. 하지만 제공된 표나 그래프에는 설계자가 원하는 자속밀도나 주파수에 따른 단위 철손이 제공되지 않으므로 설계자들은 철손 계수를 구하여 설계자가 원하는 자속밀도와 주파수에서의 철손을 구하여야 한다.

일반적으로 철손( $P_c$ -Core loss)은 두가지의 성분으로 분류되며, 이는 히스테리시스 손실 ( $P_h$ -Hysteresis loss)과 와전류 손실 ( $P_e$ -Eddy current loss)이다. 일반적으로, 히스테리시스 손실은 자성재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇회 주회하는가의 문제이며, 이는 주파수  $f$ 와 자속밀도  $B$ 에 비례한다. 그리고, 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 도전성을 띤 재료의 기전력 ( $E = 4.44/NBS$ ) 변화에 의한 와전류의 증가와 이에 따른 손실( $V^2/R$ )에 기인하므로,  $f^2$ 과  $B^2$ 에 각각 비례한다. 그러므로, 이상적인 정전과 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz 식을 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

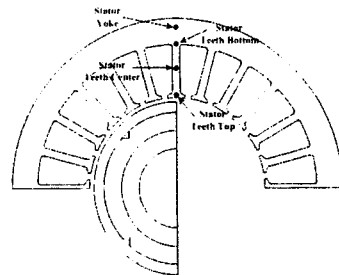
##### 2.2 철손의 계산

설계단계에서 전기장관의 선택은 장관의 제조사에서 제공되는 철손데이터나 데이터 시트 등을 통해서 이루어진다. 그러나, 제공되는 대부분의 데이터는 철손곡선을 통해 자속밀도 또는 주파수에 대한 히스테리시스, 와전류, 이상와전류손실의 양을 제시한다. 따라서, 이상와전류손실을 포함하지 않는 식(1)의 Steinmetz 방정식에 의한 철손의 고찰은 실험과 비교하여 정밀도가 낮다. 따라서, 본 연구에서는 우선적으로 식(3)에 제시된 수정된 Steinmetz 식을 이용하여 고주파 응용에 적합한 미국의 Arnold Magnetic Technologies Corporation (이하 Arnold 사)의 Arnon 7에 대하여 철손 데이터의 분석을 하였다. 그림 1은 Arnold 사가 제공하는 Arnon 7의 주파수에 따른 단위중량당 철손 데이터를 나타낸다. Arnold 사의 Arnon 시리즈 전기장관은 고주파수에서 철손이 매우 낮은 고성능 자성재료로, Arnon 7의 두께는 7 mil (0.127mm)이다. 그리고, 코팅은 최소 0.000040 in에서 최대 0.00015 in이며, 자체 절연성능은 최소 10  $\Omega$ -cm<sup>2</sup> lam 이다.

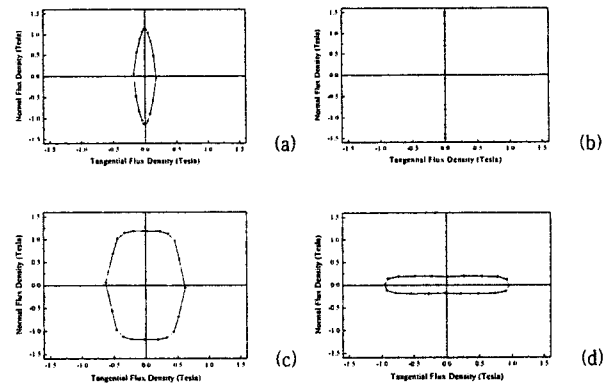
그림 2는 고정자에서 교번자계 및 회전자계의 분리를 위한 시속밀도 취척 지침을 나타낸다.



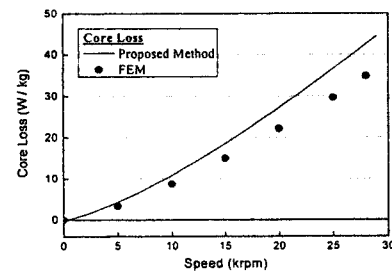
〈그림 1〉 Arnon 7의 철손 데이터



〈그림 2〉 해석 모델 및 자속밀도 계산 위치



〈그림 3〉 (a)치플, (b)치중간, (c)치-요크경계, (d)요크



〈그림 4〉 속도-철손 특성

치플, 치중간, 치와 요크의 경계부분, 요크 등 4부분에 대하여 유한요소해석을 통해 계산하였다. 그림 3은 4부분에서의 자속밀도 제적을 나타낸다. 치중간에서는 교번자계가 발생하고, 치플과 치와 요크경계에서 주로 회전자계가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

## 2. 회전자 손실

### 2.1 회전자 손실의 계산

회전자의 도전성 재질에서 발생하는 회전자 와전류 손실의 해석은 극좌표 계에서 축방향으로 존재하는 와전류해석에 관한 문제이므로 Bessel 방정식의 미분, 적분과 같은 수학적 계산이 포함되어 매우 어렵고 복잡하다. Z. Q. Zhu와 D. Howe는 [2]에서 이러한 해석적 기법을 이용하여 회전자 손실을 계산하였는데, 이는 5000 rpm 이하의 중저속 영역에서는 잘 일치함을 보이거나 고속 영역에서는 많은 오차를 가짐을 발표하였다. N. Irenji는 [3]에서 유한요소해석과 해석적 기법을 각각 자속밀도해석과 손실해석에 적절히 보완 적용하여 고속 전동기에서의 회전자 와전류 손실을 각각의 시간고조파 및 공간고조파, 회전자의 각 영역에 대하여 계산한 결과를 발표한 바 있다. 또한, 본 저자는 [3]에서 제시된 손실 해석 기법을 적용하여 고속 전동기에서의 회전자 손실의 해석에 관한 내용을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 앞서 언급된 손실 해석에 관한 단점을 극복하기 위한 해석적 기법을 제시한다. 먼저 회전자 표면에서의 자속밀도를 구하기 위하여 2차원 극좌표계에서의 지배방정식을 유도하고 해를 구하여 영구자석에 의한 자계와 고정자 전류에 의한 자계를 구한다. 시간고조파와 공간고조파를 동시에 고려하기 위하여 구해진 자속밀도는 1 슬롯 피치를 30등분한 각 만큼 회전하면서 30개 위치에 대한 자속밀도를 취득한다. 둘째, 앞서 구해진 자속밀도가 시간 및 공간적 분포를 갖는 2차원 데이터이므로 2D FFT를 이용하여 자속밀도의 시간 및 공간고조파 성분을 계산한다. 셋째, 앞서 구해진 자속밀도의 고조파 성분을 이용하여 전계의 세기 E와 자계의 세기 H 데이터를 구하고 포인팅 벡터를 적용하여 각 고조파 성분별 회전자 손실을 계산한다.

각 영역에서 정현적 특성을 갖는 자계에 대한 손실의 분포는 각 영역에서 에너지의 전달을 관계 짓는 포인팅 벡터 P에 의해 계산될 수 있다. 포인팅 벡터에 의한 손실 관계식은 식(3.34)와 같다[8][9].

$$P = E \times H$$

여기서, E는 z-방향(축방향) 전계의 세기를 나타내고, H는 자계의 세기의 수평(x-방향)성분이다. 이처럼 포인팅 벡터를 이용하여 손실을 구할 때의 장점은 회전자의 표면에서의 자속밀도 성분만을 이용하여 슬리브 영역, 영구자석 영역, 축 영역의 손실을 단순히 구해진 손실의 크기만을 산술적으로 가감하여 각각 구할 수 있다.

표 1은 무부하시 재질별 회전자 손실의 양을 나타낸다. 99.4%의 손실이 슬리브(Inconel718)에서 발생한다. 표 2는 공냉-부하시 손실의 양이며, 98.2%가 슬리브에서 발생하며, 표 3의 수냉-부하시 손실은 95.2%가 슬리브에서 발생함을 알 수 있다.

〈표 1〉 재질별 회전자 손실 밀도 (무부하시)

재질	손실 밀도
Sleeve	94.3785 ( W / m <sup>2</sup> )
PM	0.4927 ( W / m <sup>2</sup> )
Total	94.8712 ( W / m <sup>2</sup> )

〈표 2〉 재질별 회전자 손실 밀도 (공냉-부하시)

재질	손실 밀도
Sleeve	125.6922 ( W / m <sup>2</sup> )
PM	2.2145 ( W / m <sup>2</sup> )
Total	127.9066 ( W / m <sup>2</sup> )

〈표 3〉 재질별 회전자 손실 밀도 (수냉-부하시)

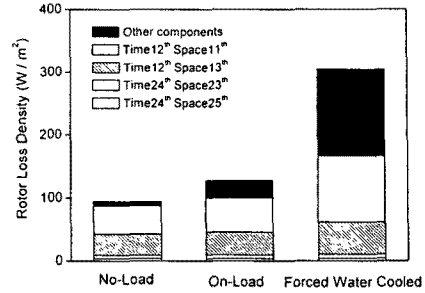
재질	손실 밀도
Sleeve	290.0344 ( W / m <sup>2</sup> )
PM	14.3857 ( W / m <sup>2</sup> )
Total	304.4201 ( W / m <sup>2</sup> )

그림 5는 정격속도 28000 rpm에서 고조파 차수별 회전자 손실의 발생을 나타낸다. 극상 슬롯수가 6개 이므로 시간고조파는 12의 배수 차수에서, 공간고조파는 12의 배수의 앞, 뒤 차수인 11차, 13차, 23차, 25차에서 발생한다. 무부하시 이외의 차수에 의한 손실은 비교적 적은 양을 차지하지만 냉각방식에 의한 전류밀도의 증가는 기타 고조파에 의한 회전자 손실의 양을 증대시키며, 이는 인버터에 의한 시간고조파 추가시 더욱 심화될 것을 보여준다. 그림 6-8은 속도에 따른 회전자 손실을 무부하시, 공냉-부하시, 수냉-부하시에 따라 제시된 방법과 유한요소해석에 의한 계산결과를 비교한 것이다. 각각의 경우에 대하여 제안된 회전자 손실해석방법이 비교적 타당한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

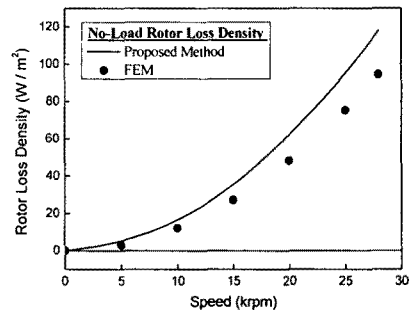
## 3. 결 론

본 연구에서는 고속 영구자석형 전기기기에의 적용이 적합한 저손실 강판인 Amon 7의 철손의 해석에 관한 기법을 제안하였다. 철심의 제작자에 의해 제공되는 주파수, 자속밀도-철손 데이터의 분석과 수정된 Steinmetz 식 및 Dynamic Hysteresis Loop를 고려한 Steinmetz 식을 적용하여 철손에 관련된 계수 및 단위 중량당 철손을 예측하였다. 본 연구에서 제시된 방법에 의해 계산된 철손은 기존의 데이터와 비교하여 해석의 타당성을 검증하

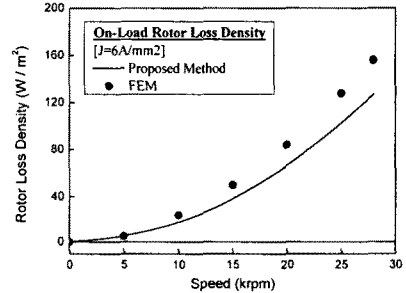
였다. 또한 제시된 철손에 관련된 계수들은 Amon 7을 이용한 영구자석형 고속 전기기기의 설계 완료시에 수치해석 기법을 이용한 철손의 정밀한 해석에 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.



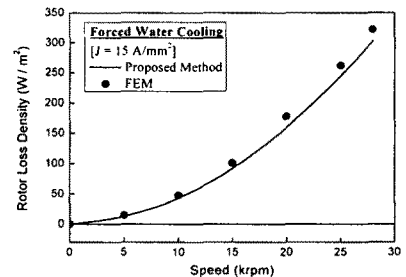
〈그림 5〉 고조파 차수별 회전자 손실 분포



〈그림 6〉 속도-회전자 손실특성 (무부하시)



〈그림 7〉 속도-회전자 손실특성 (공냉-부하시)



〈그림 8〉 속도-회전자 손실특성 (수냉-부하시)

## 참 고 문 헌

- [1] 하경호, 차상운, 김재관, 임양수, 허운, 홍정표, "모터 코어 내부에서 비정현적 자계의 거동에 따른 철손 해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2005.
- [2] K. Atallah, D. Howe, P.H. Mellor and D.A. Stone, "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines" IEEE Trans. on Industry Application, vol.31, pp.60-62, 1999.
- [3] S.M.Abu Sharkh, M.R. Harris, N.Taghizadeh Irenji, "Calculation of rotor eddy current loss in high-speed PM alternators", Electrical Machines and Drives, pp.170-174, 1997.