

원통형발전기 자기소음저감을 위한 특성해석에 관한 연구

김근웅* 김기찬* 이정일* 김진오*
 : 현대중공업(주) 기전연구소, * : 현대중공업(주) 신제품개발실

Study on the Characteristic Analysis for Magnetic Noise Reduction of Cylindrical SG

K. W. Kim, K. C. Kim, J. I. Lee, J. O. Kim
 Hyundai Heavy Industries Co.,LTD.

Abstract - The purpose of this paper is the selection of an optimum slot combination minimized the harmonics of air gap flux density and e.m.f., and reduction of the magnetic noise through the theoretical study on the cause and result of the magnetic noise. The analysis method is performed by the magnetic noise equivalent program and the FEM.

1. 서 론

소음과 진동의 발생원인중 전기기기의 에너지변환과 직접적으로 관련이 있는 전자기장에 의한 소음이 매우 중요하며, 이 소음을 자기음이라 한다. 자기음은 공극자계의 변화에 따라 힘이 발생하고 철심표면에 응력(Maxwell Stress)으로 작용하여 철심의 진동을 야기시키고 소음을 발생하는데 고정자와 회전자의 슬롯존재에 기인한 퍼미언스의 변화와 자기포화 및 편심에 의한 영향을 크게 받는다. 발전기에 있어서 자기음의 구성은 회전자의 기자력과 고정자와 회전자의 퍼미언스에 의한 공극자속밀도 성분의 방사력에 의한 소음으로서 부하조건에 관계없이 고정된 값이며, 적절한 슬롯조합으로 최소화 가능하다 [1][2]. 이때 주의할 것은 철심의 고유의 공진주파수와 고조파 자속밀도에 의한 진동주파수가 동일한 경우 자기소음이 매우 크게 되므로 공진주파수와 고조파의 주파수의 비를 고려한 다이나믹 디플렉션을 고려해야 한다. 본 논문에서는 발전기의 자기소음 저감을 위하여 슬롯조합에 따른 고조파 공극자속밀도와 방사력을 산정하고 방사력에 의한 자기소음을 산정, 평가하므로써 자기소음 저감가능한 슬롯조합을 채택하는데 그 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 해석 모델 및 사양

본논문의 해석을 수행하기 위한 원통형 동기발전기의 대상모델은 그림 1에 단면도로 도시하였으며, 발전기 기본 사양은 표 1에 나타내었다.

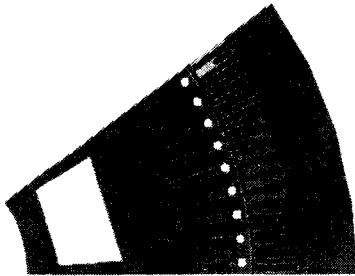


그림 1. 원통형발전기 해석모델

표 1. 원통형 동기발전기 기본사양

용 량	1420kVA	
극 수	10극	
전 압	450V	
고정자철심	외경[mm]	780φ
	슬롯 수	120EA
회전자철심	외경[mm]	596.4φ
	슬롯 수	60EA (90EA)

2.2 자기소음 산정 수식고찰

발전기의 경우 무부하일때는 전기자반작용이 거의 없기 때문에 계자기자력만 존재하고 고정자의 슬롯퍼미언스와 상호작용에 의해 고정자 요크의 소음을 발생시키므로 공간고조파 해석을 통하여 예측하는 것이 가능하며, 무부하일때의 소음의 예측이 경험상 부하일때에도 불변하므로[3] 본 연구에서는 발전기의 무부하 해석에 의해 소음을 예측하는 것으로 주안점을 둔다. 자기포화 및 회전자 공극편심에 의한 영향을 제외하고 자기소음에 영향을 주는 요소는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 고정자 슬롯의 존재에 의한 고정자 고조파 퍼미언스
- 2) 회전자의 고조파 기자력과 퍼미언스
- 3) 고조파에 의한 방사력(Radial force)의 극간격
- 4) 슬롯수에 의존하는 소음 주파수
- 5) 고정자 철심의 관성모멘트와 공진주파수

이 방법은 주파수 전역에 걸쳐 소음스펙트럼을 계산하는데 사용하며, 회전자 고조파 기자력과 고정자 슬롯 고조파 퍼미언스에 의한 공극자속밀도 및 방사력을 산정하여 고정자 요크에서의 휨의 정도와 소음을 예측한다. 단 고정자의 스류는 등가회로에서는 고려하지 않았다. 그림 2는 발전기에 있어서 자기음을 산정하는 절차를 도시하였다.

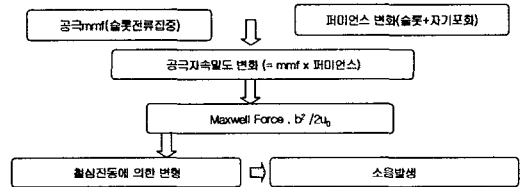


그림 2. 발전기의 자기음 산정 Process

2.2.1 자기소음 산정 수식

회전자권선에 작용하는 기자력은 회전자가 w 로 회전하고 고정자의 변위각 θ_1 에 대한 회전자의 변위각이 $p\theta_2 = p(\theta_1 - wt)$ 이라면

$$M(\theta_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos[np(\theta_1 - wt)] \quad (1)$$

이고[3], 여기서 n_{th} 기자력 고조파의 크기는

$$M_n = \frac{1}{\pi} \frac{I_2(\zeta_2 S_2)}{p} \frac{k_{un}}{n} \quad (2)$$

$$(n=2k+1, k=0, 1, 2, 3, \dots)$$

으로 나타낸다[4]. 고정자 슬롯퍼미언스는 고정자만 슬롯이 존재한다고 가정할 상태에서 산정하며 고정자 슬롯이 S_1 이라면

$$\lambda(\theta_1, t) = \lambda_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \cos k S_1 \theta_1 \right) \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

이다. 여기서, λ_0 는 평균퍼미언스로 고정자와 회전자와의 기터계수를 결합하므로 인해 결정되고 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_{r1} k_{r2} g} \quad (4)$$

무부하조건에서 수식 (1)과 (3)식의 결합에 의한 공극자속밀도를 표현하면

$$B(\theta_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos[n p (\theta_1 - \omega t)] \lambda_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \cos k S_1 \theta_1 \right) \quad (5)$$

이다. 고정자 외경의 임의 점에서 작용하는 힘의 크기는 방사성분과 접선성분이 존재하지만 접선성분의 크기는 코아의 힘의 정도가 매우 작기 때문에 무시되며, 그 임의 점에서 기자력과 퍼미언스의 곱인 자속밀도 자승에 비례한다.

고정자 내경에 작용하는 방사력은 자속밀도 (5)의 자승에 의하고 방사력 계산시 기자력의 제곱항과 같은 계열에 의해 곱해진 항은 모드차수가 높고 크기 때문에 음향학 관점에서는 고려치 않으므로[1] 고정자와 회전자의 상호작용에 의한 고조파퍼미언스 부분만을 고려하면 다음수식과 같이 된다

$$P_r(\theta_1, t) = \frac{B^2(\theta_1, t)}{2\mu_0} = \frac{1}{16\mu_0} \sum (\lambda_0^2 M_n M_{n'} \lambda_{k1} \lambda_{k2}) \cos[(2n' p - k' S_1) \theta_1 - 2n' p \omega t] = \sum P_r \cos(v \theta_1 - 2n' p \omega t) \quad (6)$$

(6)식에서 $|2n' p - k' S_1|$ 은 고조파에 대한 방사력 계산에서 모드수이며, $|2n' p - k' S_1|=1$ 에 가장 가까운 고조파 n' 이 가장 긴 극간격을 가지는 고조파이며, 이때 소음의 위험이 더 커지는 것으로 문헌에서 발표되고 있다[3]. 시험측정에서 특정소음의 주파수는 경험상의 법칙에서 주어지며 다음과 같다.

- 1) $|2n' p - k' S_1|$ 를 최소화시키는 n' 값의 결정에 의해 얻어진다.
- 2) $k'=1$ 인 가장 긴 극간격을 가진 파형에 대응한다.
- 3) n' 값은 $\frac{S_1}{2p}$ 에 가장 가까운 정수에 해당한다.

이때 소음을 일으키는 특정 고조파의 주파수는

$$f_h = 2n' p f / p = 2n' f \quad (7)$$

이다. (6)식의 방사력은 단위면적당 최대치로 표현되므로 고정자 요크상에 균일하게 작용하는 철심의 적층길이당 평균 방사력으로 다시 표현하면

$$P_r = \frac{2}{\pi} P_v \frac{\pi D_g}{2\nu} \quad [\text{N/m}] \quad (8)$$

이다. 여기서 $\frac{\pi D_g}{2\nu}$ 는 진동 Mode에서 1개의 node의 극간격에 해당된다.

먼저, 고정자 요크상에 자기력에 의한 스태틱 디플렉션(Static deflection)을 구하기 위해서는 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 고정자티스와 프레임의 강성은 무시한다.
- 2) 고정자 요크와 같은 단면적의 강철(Solid steel) 빔으로 가정한다.
- 3) 빔은 링의 형태로서 정현적인 분포의 하중이 균일하게 인가된다.

- 4) $2p$ 극(r mode) 자기력은 2ν 의 노드(Node)를 가진 진동을 발생시킨다.

이상과 같은 가정은 발전기 완제품을 시험할때 코아와 프레임사이의 열팽창이 달라서 코아와 프레임의 기계적 결합이 단단해지기 때문에 예측한 소음보다 작게 측정될 가능성이 있다. 그림 3은 고정자 요크상에서 방사력의 진동모드형태와 1/2 파장길이에 대해 표현하였다.

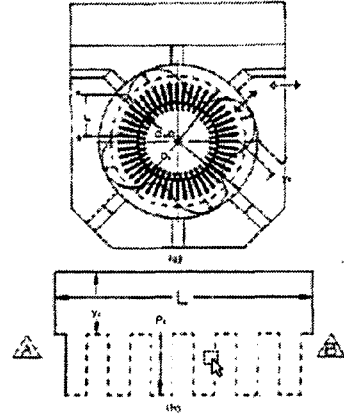


그림 3. 방사력의 1/2 파장길이에 대한 표현

그림3에서 진동 mode의 1/2인 한 node의 극간격 L에 대해 상기 가정을 고려하여 스태틱 디플렉션을 나타내면 식 (9)와 같이 된다[5].

$$\delta_s = \frac{P_r L^3}{2\pi^3 E I} = \frac{P_r D_s^3}{16 E \nu^3 I} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

$$\text{여기서, } D_s = D_g + 2h + y_s \quad [\text{m}]$$

$$L = \frac{\pi D_s}{2\nu}$$

$$I = \left[\frac{(D_o - D_r)^4}{2} - h^3 \right] / 12 \quad [\text{m}^3]$$

$$E = 2.0683 \times 10^{11} \quad [\text{N/m}^2]$$

Steel ring에서 전단응력을 무시한 휨진동이 발생하고 고정된 길이에 대해 탄성이론에 의한 공진주파수는 식 (10)과 같이 구한다.

$$f_0 = \frac{36700 \nu (v^2 - 1) y_s}{D_s^2 \sqrt{W_r (v^2 + 1)}} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } W_r = \left(\frac{\text{yoke} + \text{teeth}}{\text{yoke}} \right) \text{중량비}$$

과 같이 된다. 스태틱 디플렉션은 실제적으로 얻어질수 있는 동적인 조건에 의해 수정되어야 한다. 이것을 다이내믹 디플렉션(Dynamic deflection)이라 하고 이것은 특정 고조파주파수가 철심의 공진주파수와 가까우면 소음이 크게 증가되는 증폭계수의 영향을 고려해야 된다. (9) 및 (10)과 증폭계수와와의 관계에서 다이내믹 디플렉션은 다음과 같이 구할수 있다.

$$\delta_d = \frac{1.11 \delta_s}{\left(1 - \left(\frac{f_h}{f_0} \right)^2 \right)} \quad [\text{m}] \quad (11)$$

소리의 전파방향에 직각인 단위면적을 단위시간에 통과하는 음파의 에너지를 그 점에 있어서 음의 세기라 하며, 고정자 표면에서의 소음의 세기 레벨을 구하면 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$SI = 10 \log_{10} \left(\frac{SI_r}{10^{-10}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

$$\text{여기서, } SI_r = 1.3 \times 10^{-4} (2\delta_d)^2 f_h^2 \quad [\text{watt/cm}^2]$$

$$SI_r = 10^{-16} \quad [\text{watt/cm}^2] : \text{기준세기}$$

측정위치에서 소음의 세기를 계산하기 위해서는 고정자

표면으로부터 측정위치의 거리를 고려하여야 한다. 그러나 최저주파수의 파장보다 짧거나 기계 최장길이의 2배보다 짧은 거리인 근접음장(Near Field)에서는 오차가 발생하므로 피해야 하며, 또한 멀리 떨어져 있는 반사음장(Far Field)에서도 다른 오차를 수반할 수 있다. 근접음장과 반사음장사이를 자유음장(Free Field)이라 하는데 이영역에서는 거리가 2배로 증가할때마다 음압이 6dB씩 감소한다.

본 연구에서는 자유음장이라고 가정 상태에서 국제규격에 언급되는 프레임으로부터 1m일때 소음을 산정한다.

(12)식을 전동기 중심에서 거리 d를 고려한 수식으로 나타내면 식 (13)으로 된다.

$$SI = 10 \log_{10} \left(\frac{SI_f}{SI_r} \times 1.2 \times \left(\frac{1}{RKO} \right)^2 \right) \quad [dB] \quad (13)$$

$$\text{여기서, } RKO = \frac{d}{D_o/2}$$

2.3 자기소음 해석결과 및 분석

본 연구에서는 원동형 동기발전기를 기본설계를 한 다음 고정자-회전자-뎀퍼 슬롯수가 각각 120-60-90, 210-60-90, 210-80-120의 3종류의 슬롯조합에 의한 전자기적 상등성을 갖는 동일한 조건에서 등가설계를 행하고 이 설계데이터에 대한 고조파분석을 통하여 공극자속밀도 및 방사력에 의한 자기소음을 해석하여 가장 적절한 슬롯조합을 선정하고자 하였다. 해석방법으로는 그림 4와 같이 등가회로 해석과 FEM에 의해 수행하였다.

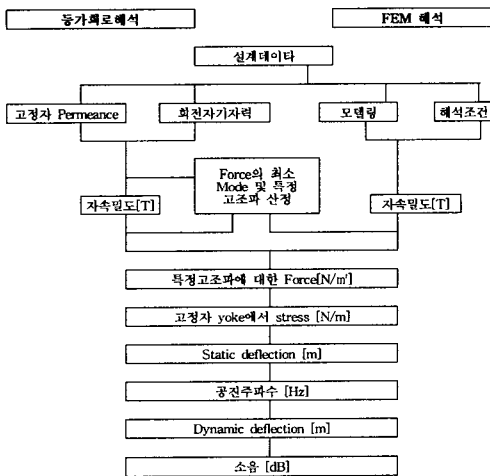
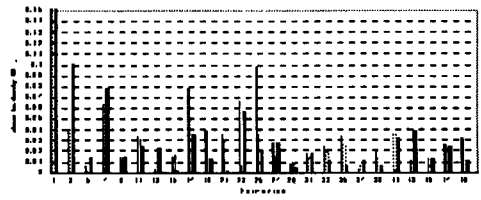


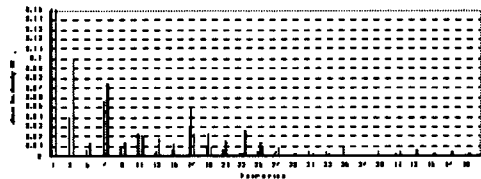
그림 4. 해석 수행방법

그림 5는 FEM 해석방법을 통하여 1420kVA 발전기의 슬롯조합별 스유티유무에 따른 공극 자속밀도의 분포를 분석하였다. 스유티가 고려됨에 따라 공극자속밀도의 고조파 차수가 전체적으로 감소되는 현상을 나타내고 있다. 표 2는 그림 4의 해석 수행방법에 따라 등가회로와 FEM해석결과에 의해서 1420kV 발전기의 슬롯조합별 소음산정을 나타내었다. 크기에 있어서는 등가회로 해석결과가 스유티가 있을 경우의 FEM 해석결과보다 19dB 차이가 작게 해석되고 있으나 고정자 퍼미언스 고조파 차수에 따른 회전자 기자력의 고조파차수별 소음 경향은 거의 일치하고 있다.

소음레벨이 큰 순서로는 등가회로에서 A>C>B 순서이고, FEM에서도 같은 경향을 나타내고 있다. A 슬롯조합이 소음이 큰 슬롯조합이며 적용시 고려해야 할 필요가 있다는 것은 2가지 해석결과 일치하고 있다.



a) Skew 무시



b) Skew 고려

그림 5. 슬롯조합별 고조파차수에 의한 공극자속밀도

모델	A			B			C		
슬롯수	120-60-90			210-60-90			210-80-120		
<i>k</i>	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>n</i>	11	25	35	19	43	61	23	43	61
<i>v</i>	10	10	10	20	10	20	20	10	20
소음산정(시험값 :79dB-A기준)									
등가회로	58dB	69dB	65dB	51dB	56dB	42dB	57dB	58dB	61dB
F	Skew	85dB	88dB	-	61dB	85dB	-	70dB	85dB
M	non-	106dB	118dB	-	80dB	103dB	-	85dB	103dB

3. 결 론

본 연구에서는 제자기자력과 고정자퍼미언스에 의한 등가회로해석과 FEM해석에 의해서 슬롯조합별 공극자속밀도와 자기소음을 산정, 비교하므로 인해 전자기적 소음을 최소화하는 슬롯조합을 선정하고 방법을 제시하였다. 제작시는 고정자 슬롯수 증가에 의한 제작비용도 고려해야 할 요소이므로 규격내에 만족하고 최소비용으로 발전기를 제작할 수 있는 슬롯조합을 산정할 필요가 있으며, 향후 자기포화를 고려한 연구를 추가하여 시험값과 절대값이 일치하도록 하겠다.

[참 고 문 헌]

- P.L.TÍMÁR, "Noise and Vibration of Electrical Machines", Elsevier Scientific Publishing Company, 1989.
- S.J.Yang, "Electromagnetic Acoustic Noise and Vibrations of Cylindrical Rotor Synchronous Machines", B.9 Noise and Vibrations., 1959, PP 431-436.
- J.H.Walker, "Open-Circuit Noise in Synchronous Machines", I.E.E., Vol.107, Part A, No.36, Dec. 1960, PP 505-512.
- Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motors", Mcgraw-Hill Book Company, INC., 1959.
- Alger, "The Nature of Polyphase Induction Machines", General Electric Company, 1951.