

대용량 인버터 구동 전동기 고조파 손실해석

이정일*¹⁾, 박정대¹⁾, 권병훈²⁾

1)현대중공업 기계전기연구소, 2)현대중공업 전전시스템사업본부

The Harmonic Loss Analysis for Inverter Driven Large Induction Motor

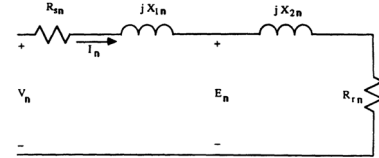
J.L Lee, J.T Park, B.H Kwon
Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd

Abstract - In this paper, the harmonic loss of the inverter driven induction motor was analyzed. It was analyzed through the theoretical consideration on the variations of equivalent circuit constants, and harmonic losses, including the effects of resistance increase and inductance decrease of stator, not through the general method that considering just the effects of the harmonic losses of only the rotor. It was verified by comparing the harmonic analysis results with the test results for HHI's inverter driven motor.

여기서, ρ 는 저항률, f_v 는 시간고조파 주파수
회전자 저항 및 리액턴스는 식 3)에서 도체 층수를 하나로, 고정자는 다수개의 층으로 계산한다.

2.2 고조파 동손

고조파 손실계산은 그림 2와 같은 고조파 등가회로를 이용하여 고조파에 의한 표피효과 및 와전류 효과를 고려하여 계산한다.



<그림 2> 고조파 등가회로

고조파 등가회로 정수 및 손실은 다음과 같이 계산된다.

- 고조파 슬립($v \gg 1$) : $s_v = \frac{vf_1 - (1-s)f_1}{vf_1} \cong 1$

- 고조파 전류

$$I_v^2 = \frac{V_v^2}{(R_{sv} + R_{rv})^2 + (X_{1v} + X_{2v})^2} = \frac{V_v^2}{Z_v^2} \quad (5)$$

여기서, V_v 는 주파수 f_v 에서의 고조파 전압의 실효치

- 고조파 등가회로 정수

$$R_{sv} = k_r(s) R_s'(dc), \quad R_{rv} = k_r(r) R_r'(dc)$$

$$X_{1v} = k_x \frac{f_v}{f_1} X_1' + \frac{f_v}{f_1} X_{1e}, \quad X_{2v} = k_x \frac{f_v}{f_1} X_2' + \frac{f_v}{f_1} X_{2e}$$

$$Z_v = (R_{sv} + R_{rv}) + j(X_{1v} + X_{2v})$$

$$= (C_2'' h R_{s'(dc)} + C_1'' H R_{r'(dc)}) f_v^{0.5} + j \left[\left(\frac{C_1'}{f_1 h} X_1' + \frac{C_3'}{f_1 H} X_2' \right) f_v^{0.5} + [X_{1e} + X_{2e}] \frac{f_v}{f_1} \right] \quad (6)$$

- 고조파 고정자 동손, $W_{cu(sv)} = 3 I_v^2 R_{sv} \quad (7a)$

- 고조파 회전자 동손 $W_{cu(rv)} = 3 I_v^2 R_{rv} \quad (7b)$

- 고조파 동손 비율

$$\frac{W_{cu(sv)}}{W_{cu(s1)}} = C_2'' h f_v^{0.5} \left(\frac{I_v}{I_1} \right)^2 \quad f_v > 51 h^{-2} \quad (7c)$$

$$\frac{W_{cu(rv)}}{W_{cu(r1)}} = C_1'' H h f_v^{0.5} \left(\frac{I_v}{I_2} \right)^2 \quad f_v > 108 h^{-2} \quad (7d)$$

여기서, I_1, I_2 는 각각 기본파 주파수 고정자, 회전자 전류

2.3 고조파 철손

회전기의 철심에서 자속의 변화로 교번자속이 통과하면 와전류 및 히스테리시스 철손이 발생한다. 고조파 철손은 철심의 표피효과, 와전류 반작용 효과에 대하여 와전류 손실계수 및 히스테리시스 손실계수를 적용하여 계산하며 다음과 같다.

$$W_{fe(sv)} = \left[\sigma_e \left(\frac{f_v}{100} \right)^2 k_{sk}^2 k_{er} + \sigma_h \left(\frac{f_v}{100} \right)^2 k_{sk}^2 \right] \left(\frac{B_{mv}}{100} \right)^2 \text{ W/kg} \quad (8a)$$

$$W_{fe(rv)} = \left[\sigma_e' \left(\frac{f_v}{100} \right)^2 k_{sk}^2 k_{er} + \sigma_h' \left(\frac{f_v}{100} \right)^2 k_{sk}^2 \right] \left(\frac{B_{mv}}{100} \right)^2 \text{ W/kg} \quad (8b)$$

1. 서 론

본 논문에서는 인버터의 전원 고조파에 의한 유도전동기의 고조파 손실을 해석하였으며, 고조파 영향을 회전자만 고려한 일반적 방법과 달리 고정자의 저항증가 및 인덕턴스 감소효과, 표류 부하손 영향을 포함하여 전동기 도체 및 철심에 작용하는 표피효과, 와전류 반작용 효과를 고려하여 회로정수의 변화특성 및 고조파 손실을 해석하였다.

당사의 인버터 전동기를 대상으로 해석결과를 검증하였으며, 해석방법은 일반적 방법에 비해 정확도가 높고 시험결과와 비교를 통해 해석방법이 타당함을 확인하였다.

2. 시간고조파 손실특성

2.1 고조파 회로정수

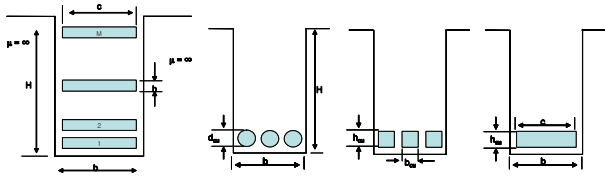
권선 저항 및 리액턴스 주파수 함수로 그림 1과 같이 M개의 도체로 구성된 슬롯의 표피효과를 영향을 고려하여 계산된다.

$$R(\omega) = k_{rn} R_0, \quad X(\omega) = k_{xn} X_l(\omega) + X_{end}$$

여기서, ω : 각 주파수 (rad /sec.)

$X_l(\omega)$: 누설 리액턴스, X_{end} : 엔드권선 누설 리액턴스

k_{rn}, k_{xn} : 각각, 저항 및 리액턴스 보정계수



a)도체구성 b) 등가 각동선 치환과정

<그림 1> 등가 각동선 치환과정

저항 및 리액턴스 보정계수는 식 1), 2)와 같고

$$k_{rn} = \phi(\xi) + n(n-1)\psi(\xi) \quad (1)$$

$$k_{xn} = \frac{3}{2\xi^2} [\eta(\xi) + n(n-1)\lambda(\xi)] \quad (2)$$

여기서, $\phi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}, \quad \psi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi + \cos 2\xi}$

$$\eta(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}, \quad \lambda(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi}$$

$\xi = h/\delta$: 도체 두께에 대한 Skin depth비율

M개 도체의 평균값을 적용한 보정계수는 식 3)과 같고, Skin depth는 식 4)와 같다.

$$k_r = \phi(\xi) + \frac{M^2-1}{3}\psi(\xi), \quad K_s = \frac{3}{2\xi^2 M^2} [n(\xi) + \frac{M^2-1}{3}\lambda(\xi)] \quad (3)$$

$$\xi = \frac{h}{\delta} = \left(\frac{\pi \mu_0}{\rho} \cdot \frac{c}{b} \right)^{0.5} h f_v^{0.5} \quad (4)$$

여기서, B_{mv} : 고조파 공극자속밀도 최대치 (Gauss)

$$k_{sk} = \frac{\sqrt{2}}{\xi} \sqrt{\frac{\cosh \xi - \cos \xi}{\cosh \xi + \cos \xi}} : \text{표피효과 계수}$$

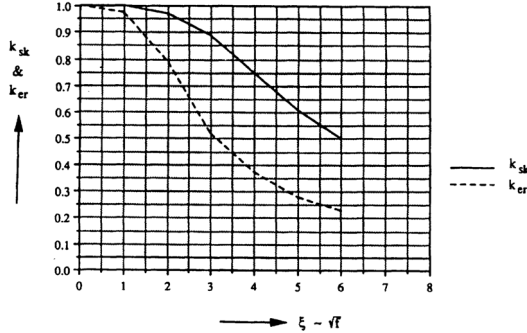
$$k_{er} = \frac{3}{\xi} \left(\frac{\sin h \xi - \sin \xi}{\cos h \xi - \cos \xi} \right) : \text{반작용 계수}$$

$$\xi = 2d\lambda, \quad \lambda = \sqrt{\frac{\mu\omega_v}{2\rho}} = \frac{1}{\delta}$$

$2d$: 적층강판 두께, δ : skin depth, $\mu = \mu_r \mu_0$: 철심 투자율 H/m

ρ : 철심의 저항율, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \approx 0.15 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

σ_e, σ_h : 100 Hz, 1 Tesla에서 와전류 손실 및 히스테리시스 손실계수



<그림 3> 표피효과(k_{sk}) 및 반작용 계수(k_{er})변화

2.4 고조파 표류손 (Stray losses)

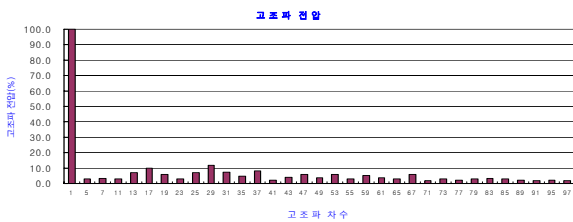
본 논문에서 고조파 표류손은 고조파에 의한 슬롯, 지그재그 및 엔드권선 누설자속에 의한 표면손을 계산하였으며, 계산방법은 참고문헌 [1]을 적용하였다.

2.5 손실해석 및 검증

검증모델 사양은 표 1과 같다. 모델 1은 저차 고조파 성분이 크고, 고조파 크기는 스위칭 주파수와 무관하게 고조파 차수에 반비례하는 특징을 가진 6 Step 방식이며, 모델 2는 5400kW 전동기로 저차 고조파 저감을 위해 PWM 제어방식을 적용한 모델로 고조파 성분은 그림 4와 같다.

<표 1> 검증모델 사양

구분	모델 1	모델 2
용량(kW)	210	5,400
극 수	4	2
전원 (V/Hz)	1100/75	3,150 / 60
전원형식	6 Step	PWM
스위칭주파수(Hz)	-	900
철심등급	S30	S14



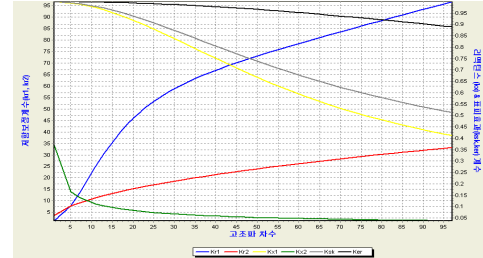
<그림 4> 모델2 전원 고조파 함유율

해석방법은 기존의 방법에 비해 첫째, 표피효과에 의한 고정자 저항의 증가 및 인덕턴스 감소효과를 포함하여 고정자 고조파 동손을 계산하였다. 둘째, 회전자 저항 및 인덕턴스의 계산방법은 기존과 동일하나, 고조파 고정자 임피던스의 보정을 통해 고조파 전류의 계산을 통해 회전자 손실을 계산하였다. 셋째, 고조파 표류 부하손을 포함하고, 고조파 철손은 표피효과, 와전류 반작용의 영향을 고려하였다. 고조파 차수에 따라 등가회로 정수, 표피효과 및 와전류 반작용 계수는 그림 5와 같다.

표 2는 모델 1의 고조파 손실 해석결과 및 시험 값과 비교한 결과이다. 기존방법에 의한 총 고조파 손실은 시험결과의 90% 수준으로 오차가 크나, 개선된 방법은 시험결과 대비하여 오차율이 1.6%로 매우 작으면서도, 동손, 철손의 손실분포도 시험결과와 유사한 수준으로 기존방

법에 비해 해석의 정확도가 매우 높음을 확인하였다. 단, 표류손의 차이는 계산기술 보다는 철심의 편칭, 적층 등의 제작적 원인에 의한 것으로 판단된다.

표 3은 모델 2의 해석결과로서 저차 고조파 손실보다는 17, 29차 등 스위칭 주파수 성분의 손실이 크다. 총 고조파 손실은 기존방법에 비해 2.5% 정도 차이가 있으며, 각각의 손실도, 특히, 철손의 차이가 크게 발생하였다. 모델 2의 해석결과도 기존방법에 비해 정확한 것으로 판단되나, 향후 시험을 통해 상세히 검토 할 예정이다.



<그림 5> 표피효과, 와전류 반작용 계수

<표 2> 모델 1 해석 및 시험결과

구분	시험 (A)	손실(기본과포함)		고조파손실효석		손실비율(%)	
		기존 (B)	개선 (C)	기존	개선	기존 (B/A)	개선 (C/A)
총 손실(kW)	17.85	16.1	18.15	1.29	3.35	90.1	101.6
1차동손(kW)	5.86	5.08	5.83	0.14	0.89	86.7	99.5
2차동손(kW)	5.35	4.3	5.67	0.62	1.99	80.0	106.0
표류손(kW)	2.16	1.0	1.44	-	0.44	46.3	66.7
철손(kW)	3.35	3.68	3.17	0.53	0.02	109.8	94.3

<표 3> 모델 2 해석결과

고조파 차수	총손실 (%)		1차동손 (%)		2차 동손(%)		표류손 (%)		철 손 (%)	
	기존	개선	기존	개선	기존	개선	기존	개선	기존	개선
1	216.2	kW	27.5	kW	22.2	kW	65.6	kW	36.4	kW
5	0.14	0.4	0.09	0.92	0.62	1.02	0.0	0.59	0.29	0.01
7	0.12	0.4	0.06	1.0	0.39	0.76	0.0	0.53	0.39	0.01
13	0.33	1.0	0.08	3.23	0.85	1.45	0.0	1.39	1.26	0.03
17	0.51	1.5	0.09	4.89	1.25	1.92	0.0	2.1	1.96	0.07
29	0.32	1.2	0.05	3.74	0.87	1.32	0.0	1.91	2.72	0.1
31	0.35	0.4	0.01	1.25	0.28	0.44	0.0	0.66	1.75	0.04
손실비율 (기본과기준)	5.1	7.56	0.47	22.9	6.02	9.87	0.0	11.7	23.3	0.54

3. 결 론

본 논문에서는 인버터의 전원 고조파에 의한 유도전동기의 고조파 손실을 해석하였으며, 고조파 영향을 회전자만 고려한 일반적 방법과 달리 고정자의 저항증가 및 인덕턴스 감소효과, 표류 부하손 영향을 포함하여 전동기 도체 및 철심에 작용하는 표피효과, 와전류 반작용 효과를 고려하여 회로정수의 변화특성 및 고조파 손실을 해석하였다.

당사의 인버터 전동기를 대상으로 해석결과를 검증하였으며, 해석방법은 일반적 방법에 비해 정확도가 높고 시험결과와 비교를 통해 해석방법이 타당함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] de Buck, F.G.G "A simple but reliable loss model for inverter-supplied induction motors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-20, No1, pp.190-202, 1986
- [2] EUGENE A. K., Howare E. J. "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, pp 624-631, 1968
- [3] Largiadier, H., "Design aspects of induction motors for traction applications with supply through static frequency changers", Brown Bpveri Review, 57, 152-167, 1970
- [4] Donald W.N., Syed A.N. "High Frequency Losses in Induction Motors", NASA Contractor Report, June, 1991