

고효율 대형 유도기의 해석 및 설계

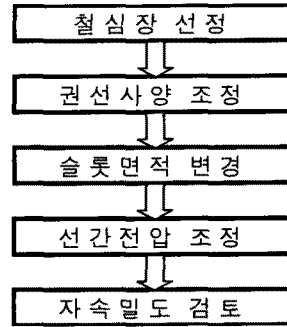
황상연, 조동혁, 이인우
(주)효성 중공업연구소

The Design and Analysis of High Efficient Oversized Induction Motor

Sang-Yeon Hwang, Dong-Hyeok Cho, In-Woo Lee

R&D Center, Power & Industrial Performance Group, HYOSUNG Corporation

Abstract - 본 연구에서는 유도기의 사용 환경과 운전 조건을 고려하여 출력 1 [MW]급의 대형 유도기를 설계하였다. 유도기의 설계사양은 당시의 유도기 설계 프로그램(=등가회로법)을 통하여 전체적인 사양을 도출하였고, 기계 방정식과 결합된 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 세부적인 동특성을 해석하였다. 유도기의 설계 변수는 턴수, 슬롯면적, 운전전압으로 하였고, 구동 주파수 25-60 [Hz]의 범위에서 가장 효율이 높은 유도기를 설계하였다. 해석의 타당성을 검증하기 위하여 샘플용 유도기를 제작하고 부하 시험을 수행하여 해석결과와 비교하였다. 부하 시험은 구동 주파수 25-60 [Hz]의 범위에서 부하율을 25-100 [%]로 변화시켜 수행하였다.



1. 서 론

그림 1 전기설계 알고리즘

선진국에서는 시스템 효율이 나쁜 DC전동기 대신에 시스템 효율이 뛰어난 인버터 구동형 유도전동기를 이용한 시스템 연구를 완성하였고, 현재 세계 시장을 석권하고 있다. 국내 시장 역시 자동 공정시스템에 들어가는 대형 유도기를 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구는 대형 유도기의 수입을 대체하기 위하여 개발하였던 고효율 전동기의 설계 과정을 설명하였다. 설계 조건은 주파수 25-60 [Hz]에서 1 [MW] 출력을 갖도록 설계하였다.

표 1은 유도기의 설계 사양을 정리한 것이다. 프레임은 500 Fr 표준을 사용하였고, 운전 효율을 최적화하기 위하여 주파수별로 선간 전압을 조정하였다.

2. 유도기 해석 및 설계

표 1 유도기 설계 사양

2.1 등가회로 해석

전기설계 알고리즘은 그림 1과 같다. 주파수 25-60 [Hz]에서 정출력 특성을 갖기 때문에, 우선적으로 주파수 25 [Hz] 조건에서 효율값이 최대가 되는 권선사양, 슬롯치수와 전원조건을 설계하였다. 철심장은 800 [mm]로 하였고, 권선 사양은 슬롯피치, 턴수, 결선방식을 조정하였다. 슬롯피치는 Throw 1-12의 단결선으로 감았고, 턴수와 결선방식은 3턴 1Y 결선으로 구성하였다. 턴수 선정 후에 고정자와 회전자의 슬롯면적을 조정하고, 손실값을 계산하였다. 슬롯 면적의 변경에 따라 효율값이 최대가 되는 치수를 선택하였다. 선간전압은 주파수 25 [Hz]에서 2,150 [V]로 설계하였고, 주파수 60 [Hz]에서 3,300 [V]로 설계하였다. 치와 요크부가 포화되지 않도록 슬롯치수를 조정하였다. 치와 요크부의 자속밀도는 1.8 [T] 이하가 되도록 설계하였다. 자속밀도 값을 낮추기 위해서 슬롯면적은 동일하게 유지하면서 치폭을 늘리는 방법을 사용하였다.

주파수 [Hz]	25	60
출력 [MW]	1.0	
철심장 [mm]	800	
턴수 및 결선	3턴 1Y	
선간 전압 [V]	2,150	3,300
슬롯수	고정자	72
	회전자	90
고정자	외경 [mm]	910
	내경 [mm]	650
회전자	외경 [mm]	644
	내경 [mm]	450

그림 2는 고정자와 회전자의 슬롯 형상이다. 고정자 슬롯은 각선 사양으로 감고, 회전자 슬롯은 동바를 심는다. 고정자와 회전자의 슬롯면적을 변경시켜 가면서 효율 최대점을 찾았다. 고정자의 슬롯면적은 기존의 768에서 921 [mm²]로 20 [%] 만큼 증가시켰다. 1차 동손을 줄이기 위하여 각선 두께, 각선 폭과 릴수를 변경시켰다. 회전자의 슬롯면적은 기존의 330에서 342 [mm²]로 3.6 [%] 만큼 증가시켰다. 점적률은 56.3 [%]이고, 절연 여유를 고려하고 권선의 조립 가능 유무를 점검하였다. 슬롯 절연은 코로나 방전시의 절연 파괴에 견딜 수 있도록 절연 방식을 채택하였다.

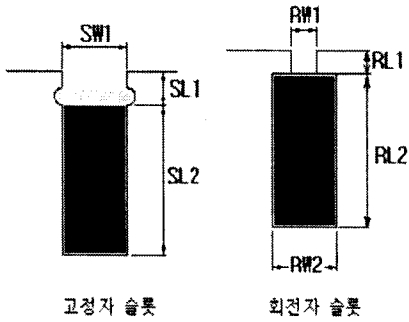


그림 2 슬롯형상과 변수

표 2는 슬롯면적의 변경에 따른 유도기의 특성을 비교한 것이다. 표 2에서 1차 동손과 총손실이 가장 작은 3안을 설계사양으로 도출하였다. 등가회로법의 해석결과 효율은 주파수 25 [Hz]일 때 94.6 [%], 주파수 60 [Hz]일 때는 95.8 [%]가 되었다. 자속밀도 값은 폭이 작은 치부에서 크게 분포하는데, 25 [Hz] 조건에서는 1.87 [T] 이하였고, 60 [Hz] 조건에서는 1.2 [T]이하로 분포하였다. 자속밀도 값은 유한요소 해석을 통하여 재검토하였다.

표 2 등가회로 해석(주파수 25 Hz)

구분	기준	1안	2안	3안
철심장[mm]	750	750	800	800
턴수[T/C]	3	3	3	3
슬롯면적 [mm ²]	고정자	767	939	921
	회전자	330	378	342
손실분포 [W]	1차 동손	27,176	19,778	18,840
	2차 동손	13,501	9,179	10,522
	표류부하손	13,808	13,786	13,800
	풍손마찰손	9,742	9,823	9,798
	철손	4,884	6,919	6,308
손실합계	69,111	59,485	59,268	
선간전압[V]	1,950	2,200	2,200	
전류[A]	355.1	343.3	329.2	
효율[%]	93.5	94.4	94.4	
자속밀도 [T]	고정자 치	1.81	1.97	1.81
	고정자 요크	1.32	1.73	1.63
	회전자 치	2.07	2.14	1.91
	회전자 요크	1.56	2.06	1.88

2.2 유한요소 해석

시간차분 해석, 전압원 해석과 기계 방정식과의 연계 해석은 FLUX2D(Ver.9.2)를 이용하였다. 유도기의 해석 형상은 그림 3과 같다. 전체 극수는 6극이고, 총 슬롯수는 고정자 72개, 회전자 90개 이다. 해석의 정확성을 위해서 그림 4의 회로도에서 상당 엔드 누설 인덕턴스와 상당 엔드턴에 해당하는 저항을 구하여야 한다. 또한 기계 방정식과의 연계를 위해서는 회전자 관성에 대한 정확한 계산이 필요하다.[1] 유한요소 해석을 통하여 유도기의 동특성과 자속밀도 분포를 검토하였다.

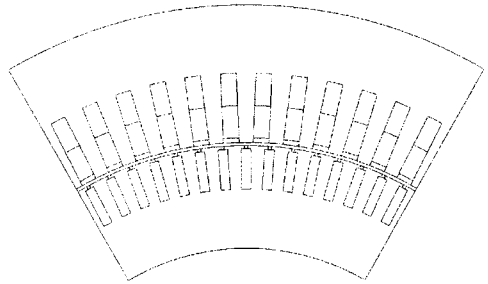


그림 3 유도기 해석 형상

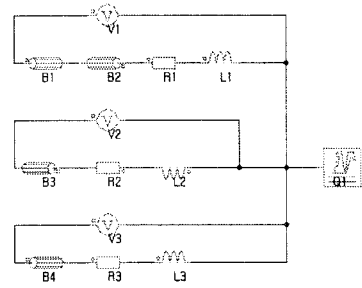


그림 4 프로그램에서 이용한 회로도

동특성 해석 결과로 속도 파형과 전류 파형을 구하였다. 그림 5는 주파수 25 [Hz]일 때의 속도 파형인데 정상 상태 시에 495.1 [rpm]으로 수렴하였다. 그림 6은 유도기의 전류 파형인데 주파수 25 [Hz]에서는 314.8 [Arms]로 수렴하였다.

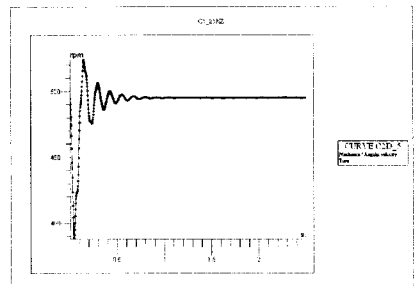


그림 5 속도 파형

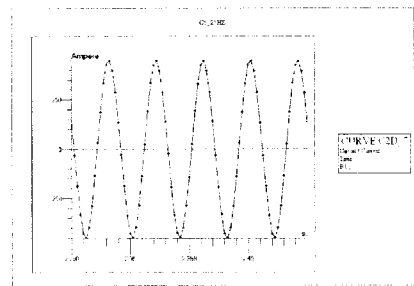


그림 6 전류 파형

그림 7은 정상 상태의 자속선 분포인데, 1차측과 2차측에서 완전한 폐루프를 형성하여 6극으로 분포되었다. 그림 8과 그림 9는 회전자의 자속밀도 파형인데, 치(Tooth)부는 1.74 [T], 요크부는 1.5 [T] 이하로 분포하여 양호하였다.

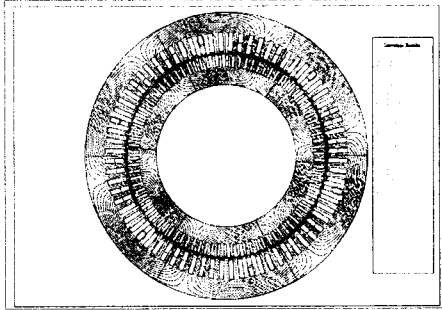


그림 7 자속선 분포

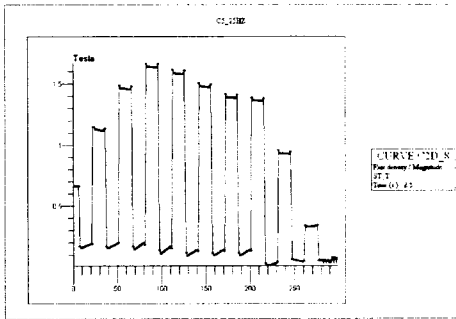


그림 8 자속밀도(치부)

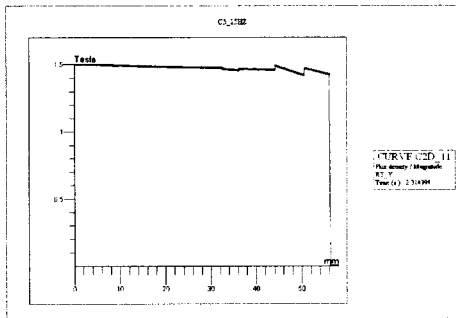


그림 9 자속밀도(요크부)

2.3 시험 결과와의 비교

해석의 정확성을 알아보기 위하여 제작된 전동기의 해석값과 부하시험 결과를 비교하였다. 대형 유도기를 설치하였던 시험 장비는 용량의 한계로 인하여 주파수 25 [Hz]의 부하율 100 [%] 시험은 불가능하였다. 따라서 부하시험의 범주는 주파수 30-60 [Hz]까지는 부하율 25-100 [%]로 변경하였고, 주파수 25 [Hz]에서는 부하율 75 [%]까지만 수행하였다. 표 3에서는 주파수 60 [Hz]일 때의 해석값과 시험값을 비교하였다. 전력을 3,300 [V] 인가했을 때의 전류값은 등가회로 해석에서는 204.3 [A], 유한요소 해석은 202.5 [A] 이었고, 시험값은 204.8 [A]가 나왔다.

효율은 등가회로 해석에서 95.8 [%], 시험값은 96.2 [%] 이었다. 역률은 등가회로 해석에서는 89.4 [%], 시험값은 88.9 [%] 이었다. 정상 속도는 등가회로 해석은 1194.8 [rpm], 유한요소 해석은 1195.0 [rpm], 시험값에서는 1192.0 [rpm] 이었다. 토크값은 등가회로 해석은 7,989 [N.m], 유한요소 해석은 7,958 [N.m], 시험값은 8,015 [N.m] 이었다. 표 3과 같이 샘플 유도기에 대하여 해석과 시험값을 비교해 본 결과 전류, 권선저항, 효율, 역률, 속도 및 토크값에서 거의 비슷한 결과가 나왔다. 오차는 시험값을 기준으로 산정하였다.

표 3 샘플 유도기의 해석과 시험값(주파수 60Hz)

구분	해석		시험	오차 [%]
	등가회로	유한요소		
전압[V]	3,300			
전류[A]	204.3	202.5	204.8	1.1
권선저항[Ω]	0.0863		0.0888	2.8
효율[%]	95.8	-	96.2	0.4
역률[%]	89.4	-	88.9	0.6
속도[rpm]	1194.8	1195.0	1192.0	0.3
토크[N.m]	7,989	7,958	8,015	0.7

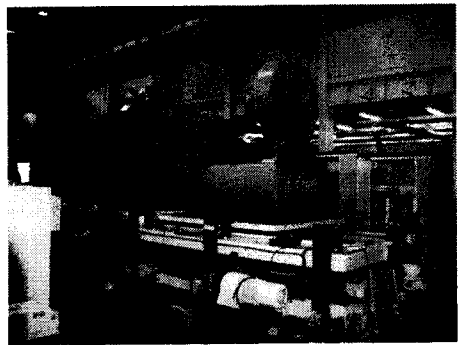


그림 10 샘플 유도기 시험장치

3. 결 론

본 논문은 등가회로법과 유한요소법을 이용하여 대형 유도기를 설계하였다. 유도기의 설계 개념은 주파수 25 [Hz] 조건에서 출력 1 [MW]가 되고, 주파수 25 [Hz]와 60 [Hz]에서 효율값이 최대가 되는 전원 사양을 도출하였다. 등가회로 해석에서는 당사의 유도기 설계 프로그램을 이용한 전체적인 사양을 도출하였고, 유한요소 해석은 전자계 상용 툴인 FLUX2D를 이용한 속도특성, 전류특성 및 자속밀도를 검토하였다. 설계 변수는 철심장, 권선사양, 슬롯면적, 선간전압으로 정하고, 손실값이 최소가 되고 효율이 최대가 되는 설계점을 찾았다. 설계 샘플 유도기의 제작과 부하시험을 통하여 해석값과 비교 및 검증은 하였고, 대형 유도기의 전기설계 알고리즘을 정립할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 황상연, 차종환, 한상열, 조동혁, "유도성 기동 영구자석 전동기의 기동특성 해석 및 시험", 대한전기학회 춘계, pp22-24, 2003
- [2] "FLUX9.2 User's guide", CEDRAT, 재우기술 2005.7