등가부하법에 따른 유도기 온도상승 시험시 발생 증분 손실 해석

박정태*[1], 이정일[1], 김근웅[1], 권중록[1], 권병훈[2]
1)현대중공업 기계전기 연구소, 2)현대중공업 전전시스템 사업본부

Analysis on the increasing loss in Temperature rise test of induction motor by equivalent load method

J. T. Park, J. I. Lee, K. O. Kim, J. L. Kwon, B. H. Kwon
Hyundai heavy industries Co., Ltd

Abstract - As equivalent load method of induction motor, even without connecting load, for temperature rise test has been acknowledged economic and corrective method, the method has been widely used instead of the real load method, and also international standards IEC 61986 is published in 2002. ABB, an well-known and famous electric machinery maker in the world, has been already applying the equivalent load method since 2002.
HHI has been using real load method and equivalent load method for temperature rise of induction motor, it is already known that the equivalent test results is higher as 1-5°K than that of real load test. But, quantity analysis for the reason of the temperature rise is not satisfied sufficiently.
So, in this paper, quality analysis and also quantity analysis was conducted.

1. 서 론

등가부하법은 1921년 Ytterberg에 의해 처음으로 제안된 후에 실부하법에 비해 경제적이면서도 또한 실부하법에 의한 온도 상승 시험결과와도 충분히 정확한 값을 가지며 따라서 실부하법을 대체할 수 있는 매우 훌륭한 방법이며, 이미 규격(IEC 91686-2002, JEC 2137-2000)으로 정리되어 실행되고 있다.
관련논문을 분석 한 결과, 1970년대에 기본 이론 논문이 다수 발표 되었고, 1990년대 말부터는 등가부하법 이론에 대한 발전이 없이, 인버터 이용한 중첩 전원을사용하여 등가부하법을 실현하려는 논문이 발표되고 있다.
따라서, 최근의 논문 보다는 1970년대의 논문을 기본으로 하여 일반적으로 실부하법보다 중첩 등가부하법의 온도 상승이 높은 원인을 찾고자 하였다.
Radic 등[1]은 등가부하법 관련하여 실험 결과를 1976년에 Brown Boveri사의 사보에 게재하였다. 서로 다른 두 주파수가 중첩된 전압 파형이 측정되고 또한 그러한 전압에 대해서 전동기 입력전류 파형과 회전속도의 측정파형이 보인다. 회전속도가 동기속도를 중심으로 맥동하고 있는 파형을 확인할 수 있다.
Jordan 등[2] 은 등가부하법을 일단 정상상태 이론과 동적 해석으로 나누어서 이해하려고 했고, 정상상태 이론으로부터 약간의 직관력과 동적 해석에 의존하지 않고 시험 특성 평가의 기본을 제공하며, 완벽한 동적 해석을 위해서는 복잡한 연립 미분 방정식을 풀어야 한다는 언급을 하고 있다.
Schwenk 등[3] 은 미방을 푸는 대신에 '자속파' 라는 개념을 사용함으로써 맥동하는 모터의 거동에 대해기본적인 이해를 돕고 있다. 그 결과, 자속 파형의 크기와 각속도는 시간, 전압, 주파수의 함수로써 변하는 것을 보였으며, 자속파 각속도의 진동 주파수와 자속파 크기의 진동 주파수는 같고 그리고 주전원과 보조전원 주파수의 차이가 같다는 것을 보였다.
Meyer 와 Lorenzen [4]은 두 주파수법으로 구동되는 삼상 유도전동기의 시스템 방정식을 공간 벡터를 사용하여 유도하였고, 결과를 실부하법과 비교하였다.
Grantham [5] 는 인버터를 사용하여 간단히 등가부하법을 구현하였다. 이론은 [3]의 논문을 참고 하였고, 시험결과를 일부 실었다. 이론적 발전은 미미한 것으로 보인다.
한편, 유도전동기 온도상승 측정과 관련, 당사에서는 실부하법 및 등가부하법을 사용 중이며, 등가부하법에 의한 온도 상승이 실부하법보다 약 1-5°K 정도가 증가된다는 사실을 확인하고 있으나, 그 원인에 대한 정량적인 분석이 미흡한 상황이었다.
따라서 본 논문에서는 정성적인 손실 추정은 물론 정량적인 해석을 하였으며, 등가부하법 측정시 사용되는 맥동 전압, 전류에 의한 손실 증가에 대한 등가부하법 온도 상승 기준을 제시, 등가부하법에 대한 당사 고유의 이론적, 실험적 근거를 마련하였다.

2. 본 론

2.1 등가부하법 기본 원리 및 시험규격

중첩전원 등가부하법에 의한 온도상승이 실부하법에 비해 높은 이유와 증분 손실의 특성을 파악하기 위하여 중첩전원 등가부하법의 기본원리를 분석하고, 시험방법 관련, 규격을 검토하였다.

2.1.1 등가부하법 기본 동작

전압과 주파수가 상이한 전원을 중첩시켜 전압, 속도의 변동, 자속의 맥동에 의한 전동기-발전기로 반복적 동작으로 유도기에 실부하 없이 정격전류가 흐르도록 보조주파수 및 전압을 조정한다.

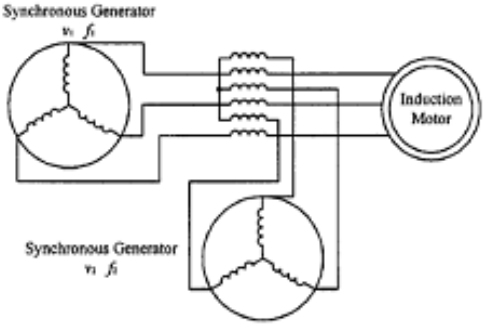

그림 2.1 1차 중첩전원 등가부하법 시험 결선도

2.1.2 등가부하법 원리 분석 및 해석 방법

중첩전원에 의한 등가부하법의 원리는 IEC 61986 에 간단히 설명되어 있다.
주전원 50Hz, 보조전원 40Hz 일 때, 모터의 동작점은 그림 2.2 과 같이 주 주파수, 보조 주파수에 대한 속도-토크, 속도-전류 곡선으로부터 유추할 수 있다. 즉, 50Hz 전원에 의한 양의 토크(A점)는 40Hz 전원에 의한 음의 토크값 (B점)과 균형을 이룬다. net 전류는 주로 40Hz 전원에 의해 셋팅된 전류에 (C점) 의해 결정되는데, 50Hz에 대해서 모터는 매우 낮은 슬립(그러므로 낮은 전류)에서 운전된다.

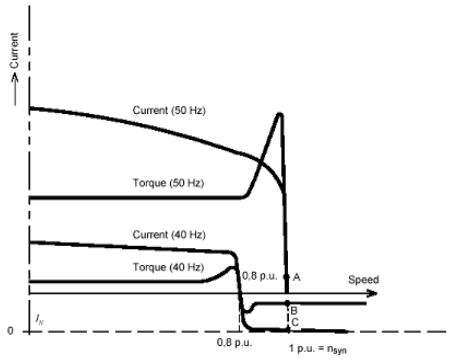

그림 2.2 등가부하법 원리 분석 속도-전류,토크 곡선

IEC 61986 에서 간단히 설명된 중첩전원에 의한 등가부하법의 원리를 바탕으로 손실 발생에 대해 다음과 같이 분석, 계산하였다.
주전원에 의한 전류는 무부하 전류이며, 보조전원에 의한 전류가 등가부하 시험시 정격전류의 거의 전부라고 할 수 있다. 또한 보조전원에 의한 전류가 유도기의 (-) 슬립에서 동작하므로, 회전자 슬롯에 표피효과가 발생하기 어렵다고 판단된다.
따라서, 보조전원에 의한 유도기의 마이너스 슬립시의 전류가 동손의 거의 대부분을 차지하며, 널리 알려진 유도기 T 등가회로를 사용해서 구할 수 있다.
철손은 주전원과 보조전원의 의한 주파수 및 자속밀도의 함수이며, 철손의 계산에 있어, 주파수와 자속밀도 성분에 의한 손실 계산수식은 널리 알려진 이론이며, 그 값을 쉽게 계산할 수 있다.
풍손과 마찰손은 실부하시험, 등가부하 시험시 서로가 거의 같은 속도로 회전하고, 비록 속도가 동기속도근처에서 맥동하기는 하나 차이가 거의 없다고 볼 수 있다. 표류부하손실도 회전속도와 전류가 거의 비슷하므로, 역시 거의 차이가 없다고 볼 수 있다.

2.1.3 시험규격

유도기 온도상승 시험 관련하여 국제규격으로는 2002년에 발표된 IEC 61986이 있으며 이 표준의 목적은 간접 부하 test를 서술하고, 온도상승을 결정하는 것으로, 중첩법 (superposition method) 과 등가부하법 (equivalent load method)으로 구성되어 있다. 일본규격으로는 JEC 2137이 사용되고 있는데 일본 전기학회의 유도기 표준규격이며 유도기의 시험 전반에 대해 다루고 있다.

2.2 검증 모델 해석 및 시험

2.2.1 검증모델 및 시험방법

1차중첩 전원 등가부하법을 사용하여 시험을 하였다. 그림 2.3은 중첩전원 등가부하시험 다이아그램이다. .사용한 검증모델은 290 kW, 4극, 6.6 kV 고압 유도전동기이다. 이 전동기는 자성웨지가 사용된 특징을 갖고 있다.

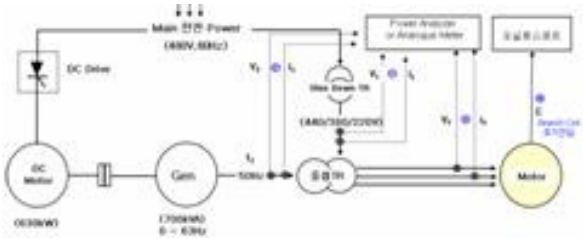

그림 2.3 중첩전원 등가부하시험 다이아그램

중첩전원에 의한 등가부하 시험은 실부하 정격전류와 등등한 전류가 흐르는 조건에서 시험을 실시하였으며, 전압 및 주파수 변동에 의한 영향을 평가하기 위해 주파수 50 Hz, 40 Hz에서 정격전류의 100 %, 90 %, 80 %, 70 % 가 흐르는 조건에서도 시험을 실시하였다.

2.2.2 해석결과 및 평가

중첩전원에 의한 주요 손실 증가분은 철손으로 단일전원에 비해 70 %에서 130 %까지 변동되어 자속 포화에 의한 현상으로 해석된다. 그림 2.4는 시간에 따른 중첩전원에 의한 공극자속 변동곡선이다. 한편, 보조주파수 및 보조전압의 차이가 클수록 손실은 증대함을 확인하였다.

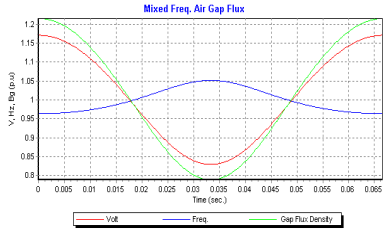

그림 2.4 중첩전원에 의한 공극자속 변동

2.2.2 손실 및 온도상승 분석

중첩전원에 의한 온도상승은 이론적 고찰을 통해 예측된 바와 같이 다음과 같은 특징을 갖고 있다.
1) 중첩 전원에 의한 온도상승은 실부하에 비해 증가하며, 주전원에 비해 보조전원 비율 및 보조 주파수 비율이 클수록 상승하며, 보조전원 비율은 전동기 용량 또는 중량 즉 회전자 관성에 따라 변동되며, 각각의 손실요인에 의해 온도상승에 미치는 영향이 분석된다.
2) 보조전원 관점에서 운전 영역은 그림2.1 의 검토결과와 같이 발전기로 운전되기 때문에 대부분의 전류는 보조전원 성분의 전류이다.

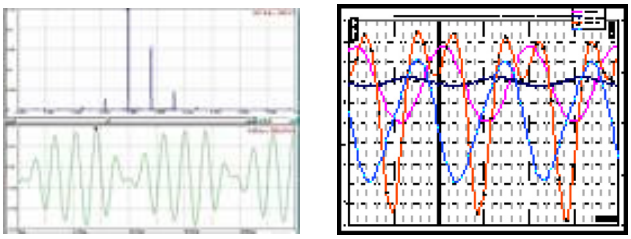

그림 2.5 등가부하 시험 파형 및 분석 결과

3. 결 론

본 논문에서는 중첩전원에 의한 온도상승이 실부하법 보다 높기 때문에 원인분석, 대책 수립을 통한 제품 및 고객만족을 위한 목적으로 진행되었으며, 중첩전원에 의한 등가부하법 원리, 시험규격 및 논문분석, 이론적 고찰을 통해 검증모델의 해석 및 시험을 실시하여 손실 및 온도상승 증가원인을 분석하였다.

중첩전원 기본원리에 따라, 주전원에 의한 전류는 무부하 전류 수준으로 흐르게 되고, 보조전원에 의한 전류가 정격전류의 대부분을 차지하는데, 실험을 통해 확인하였다. 중첩된 전원에 의해 실부하 없이도 정격전류를 흘릴 수 있으며, 이에 의한 손실증분은 T 등가회로에 의해 구해지며, 온도상승분과 비교, 적절한 손실증분 값으로 판단된다.
결국, 모터 입력전류를 같게 하여 모터에 입력시키므로, 동손은 같다고 판단되며, 손실증분은 중첩전원의 자속포화에 의한 철손 증가로 판단된다.
본 연구의 분석결과와 같이 보조 주파수 비율이 80 % 이상인 경우 중첩부하에 의한 온도상승 비율은 5 % 정도로 실부하와 유사한 수준으로 시험방법으로 적절하다. 주파수의 비율이 45 Hz로 80 % 미만인 경우는 실부하에 비해 온도 상승이 증가한다.

[참 고 문 헌]

[1] P. Radic, H. Strupp, "Measurement of temperature rise in induction motors using the continuously varied frequency method," Brown Boberi Rev. 8-76, pp517-520, 1976.
[2] H. E. Joardan, J. H. Cook, R. L. Smith, "Synthetic laod testing of induction machines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol, PAS-96, no. 4, pp1101-1194, July/August 1977.
[3] H. R. Schwenk, "Equivalent loading of induction machines for temperature tests," IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, no. 4, pp1126-1131, 1977.
[4] A. Meyer, H. W. Lorenzen, "Two-frequency heat run- a method of examination for three-phase induction motors," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, No. 6, pp2338-2347, 1979.
[5] C. Grantham, "Full load testing of three phase induction motors without the use of a dynamometer," Proceeding of ICEMA 14-16th Sep., pp147-152, Australia, 1993.
[6] Hamid M. B. Metwally, "Loadless full load temperature rise test for three phase induction motors," Energy Conversion and Management, vol. 42, pp519-528, 2001.
[7] I. Colak, G. Bal, C. Elmas, "Review of the Testing Methods for ful-Load Temperature Rise Testing of Induction Machines," EPE Jounal Vol. 6 no. 1, pp37-43, May 1996.
[8] JEC-2137-2000 INDUCTION MACHINES Standards of the Japanese electrotechnical committee, 2000.
[9] IEC 61986 INTERNATIONAL STANDARD Ratating electrical machines-Equivalent loading and super-position techniques-Indirect testing to determine temperature rise, IEC 2002.
[10] Garvey S., COLAK. and Wright M .T., "Aspects of mixed-frequency testing of induction machines, ICEM'94 September, pp. 623-628, Paris, France, 1994.