

## 삼상유도전동기 권선저항 측정이 효율 산출에 미치는 영향에 관한 연구

(A Study on the Measurement of the Winding Resistance Influences the Efficiency  
Evaluation of 3phase Induction Motors)

강병국\* · 김광민 · 이 주\*\*

(Byung-Guk Kang · Kwang-Min Kim · Ju Lee)

### Abstract

3phase induction motor consumes 40% of national electric power. so It is one of the most important electric device for the national power policy. The efficiency measurement is carried out by IEC standards. After the temperature rise test, It's difficult to measure the winding resistance immediately. because of inertia and power cut-off time. Therefore, IEC standards suggest the measurement time. But during the measurement time, the winding temperature cools down. It causes the value of winding resistance is variable. Several conditions which possibly occurred by the measurement time of IEC 60034-1 are suggested. and The efficiency evaluation of 3phase induction motors is carried out by IEC 60034-2-1 with the several conditions. As the results, we find out the winding resistance rapidly goes down within 15 sec. so It proves that the winding resistance should be measured within 15 sec. for the efficiency evaluating of 3phase induction motor.

Key Words : 3Phase Induction Motor, Efficiency, Winding Resistance, Evaluation, Test Method

### 1. 서 론

삼상유도전동기는 국가 전체 전력의 약 40%를 소비하는 전력 다소비 단일기기이다. 이에 삼상유도전동기의 최저소비효율(MEPS) 정책은 국가 에너지절약

의 가장 핵심적인 정책이라고 할 수 있다[1].

최저소비효율(MEPS : Minimum Energy Performance Standard)[2] 정책은 규정된 효율에 미달되는 제품을 생산, 판매를 금지하여 국가 에너지 절약에 이바지하는 강제적 에너지 효율제도를 말하며 위반 시에는 2천만원 이하의 벌금을 사업주에 부과하게 되어 있다[3].

이러한 이유로 제조사들은 최저비용으로 최대의 효율을 실현하기 위해 여러 가지 설계기술, 재료기술 등을 이용하여 0.01%라도 더 효율이 좋은 전동기를 생산하려고 연구를 하고 있다.

\* Main author : Doctor course, Electrical Engineering of Hanyang University  
\*\* Corresponding author : Professor, Electrical Engineering of Hanyang University  
Tel : 031-500-1461, Fax : 031-500-0465  
E-mail : popsew@empal.com  
Received : 2015. 11. 25.  
Accepted : 2016. 2. 25.

일반 전동기(IE1)에서 고효율 전동기(IE2)로, 고효율 전동기에서 프리미엄 전동기(IE3)[4-5]로 효율이 높아지면서 상대적으로 효율의 마진 즉, 달성효율에서 효율 100%까지 차이가 점점 줄어들게 되어 효율의 정밀 측정에 대한 연구도 점점 요구되어지고 있다.

삼상유도전동기의 효율측정에 있어 다이ना모미터로부터 바로 효율을 읽는 방법(Direct method)도 있으나 손실 분리법(Summation of losses, with loss test)이 직접법보다 정확성 및 재현성이 높아[6] IEC 60034-2-1의 손실분리법이 국내 및 국제적으로 널리 사용되고 있다[7].

이번 연구에서는 삼상유도전동기의 효율측정에 있어서 손실(동손, 회전자손, 철손, 풍손, 마찰손, 표류부하손)측정 시 요구되는 권선 저항 측정에 있어서 IEC 60034-1에 따라 측정을 하고 방법에 따라 전동기 효율에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 효율측정의 이론적 배경

삼상유도전동기의 측정방법은 IEC 60034-2-1[8](회전기기 - 제 2-1부 : 손실 및 효율을 측정하는 표준 시험방법)의 손실분리법에 의해 효율을 산출한다. 손실분리법은 그림 1, 그림 2와 같이 다이나모미터 라는 전동기 특성 측정 장치로 측정을 하게 된다. 효율측정은 초기권선저항 측정, 온도상승시험, 온도포화권선저항 측정, 부하시험, 무부하시험 순으로 진행되며, 측정 후 효율은 아래의 수식으로 계산된다.

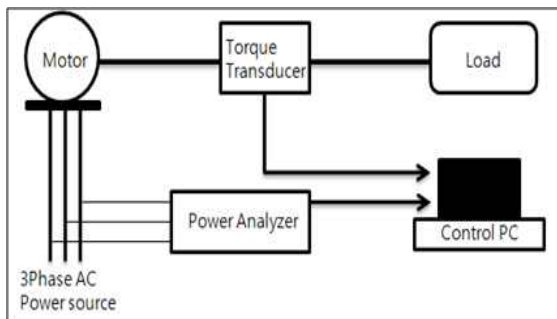


Fig. 1. Dynamometer diagram



Fig. 2. Dynamometer

부하시험은 정격부하의 25%~100% 이하에서 4포인트, 100% 초과~150% 이하에서 2포인트를 측정하는데 각각에서  $U, I, P_1, T, f, n, \theta_N, \theta_a$ 를 측정한다.

무부하시험은 시험용 전동기를 다이나모 메터에서 분리 후, 정격전압의 60%~125% 사이에서 4포인트, 20%~50% 사이에서 3포인트를 측정하는데 각각에서  $U_0, I_0, P_0, R_0$ 를 측정한다.

정손실은 마찰손, 풍손, 철손의 합으로 결정된다.

$$P_k = P_0 - (I^2 R)_0 = P_f + P_{FE} \quad (1)$$

$$(I^2 R)_0 = 1.5 I_0^2 R_0 \quad (2)$$

( $P_k$  : 정손실,  $P_f$  : 풍손 및 마찰손,  $P_{FE}$  : 철손실,  $I_0$  : 무부하 전류,  $R_0$  : 무부하 저항)

풍손 및 마찰손은 무부하 시험 중 정격 전압 50%이하에서 기록된 전압값 각각에 대하여 전압의 제곱값 ( $U_0$ )<sup>2</sup>에 대하여 식(1)  $P_k$ 에 구한 좌표에 기입한다. 영전압까지의 직선을 가정하였을 때 영전압 절편이 풍손 및 마찰손  $P_f$ 이다[9].

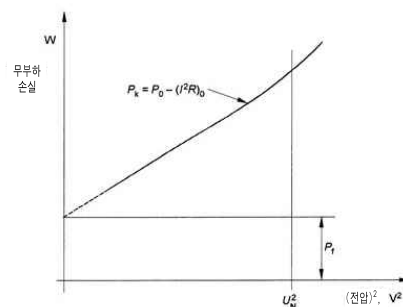


Fig. 3. Determination of windage & friction losses

철손은 초기 권선의 저항에서 전압이 떨어짐으로 인한 영향을 보완하기 위해 부하점 각각의 철손을 다음 수식으로 얻어지는 감소전압  $U_r$ 을 기준으로 한다.

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} IR \cos\phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} IR \sin\phi\right)^2} \quad (3)$$

$$\cos\phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI} \quad (4)$$

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi} \quad (5)$$

$$P_{FE} = P_k - P_f \quad (6)$$

( $P_1$  : 입력,  $U$  : 단자전압,  $I$  : 단자전류)

고정자권선 및 회전자권선에서 발생한 동손은 아래와 같다.

$$(\dot{I}^2 R)_s = 1.5 \dot{I}^2 R \quad (7)$$

$$(\dot{I}^2 R)_r = (P_1 - (\dot{I}^2 R)_s - P_{FE})s \quad (8)$$

$$s = 1 - \frac{np}{f} \quad (9)$$

( $s$  : 슬립,  $n$  : 동작속도,  $p$  : 극 수,  $f$  : 주파수)

출력은 아래와 같다.

$$P_2 = 2\pi T n \quad (10)$$

( $T$  : 토크)

잔류손실은 아래와 같다.

$$P_L = P_1 - P_2 - (\dot{I}^2 R)_s - P_{FE} - P_f - (\dot{I}^2 R)_r \quad (11)$$

선형회기 분석을 하기 위한 목적으로 잔류손실의 평활화를 실시한다. 선형 회기는 두 개의 변수가 선형적으로 관계가 있다는 전제로 하고, 쌍을 이루는 변수가 얼마나 직선에 가까운가는 보정계수  $\Upsilon$ 에 의해 알 수 있다.

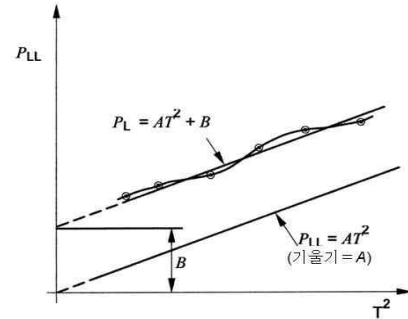


Fig. 4. Smoothing of residual loss data

잔류손실 데이터의 평활화는 아래와 같다.

$$P_L = AT^2 + B \quad (12)$$

$$A = \frac{i \times \Sigma[(P_L) \times (T^2)] - \Sigma P_L \times \Sigma T^2}{i \times \Sigma(T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2} \quad \text{기울기}$$

$$B = \frac{\Sigma P_L}{i} - A \times \frac{\Sigma T^2}{i} \quad \text{절편}$$

$i$  : 합산한 부하점의 개수

$$\Upsilon = \frac{i \Sigma[(P_L T^2)] - (\Sigma P_L)(\Sigma T^2)}{\sqrt{[i \Sigma(T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2][i \Sigma T_L^2 - (\Sigma P_L)^2]}} \quad (13)$$

보정계수  $\Upsilon$ 가 0.95 이상이 되어야 측정이 적합한 것으로 본다.

부가 부하손 결정은 아래와 같다.

$$P_{LL} = AT^2 \quad (14)$$

기준 냉각제 온도 25°C에 맞추어 보정된 고정자 동손은 아래와 같다.

$$(\dot{I}^2 R)_{ss} = 1.5 \dot{I}^2 R_s \quad (15)$$

$$R_s = R_N \frac{235 + \theta_N + 25 - \theta_a}{235 + \theta_N} \quad (16)$$

( $R_N$  : 온도상승 시험 후 고정자 저항,  $\theta_N$  : 정격 부하 상태의 고정자권선 온도,  $\theta_a$  : 주위 온도)

삼상유도전동기 권선저항 측정이 효율 산출에 미치는 영향에 관한 연구

기준 냉각제 온도 25°C에 맞추어 보정된 회전자 동손은 아래와 같다.

$$(I^2R)_{rs} = [P_1 - (I^2R)_{ss} - P_{FE}]S_s \quad (17)$$

$$S_s = s \left( \frac{R_s}{R_N} \right) \quad (18)$$

보정된 출력 아래와 같다.

$$P'_2 = P_1 - P_{LL} - (I^2R)_{ss} - P_{FE} - P_f - (I^2R)_{rs} \quad (19)$$

효율 결정은 아래 수식으로 한다.

$$\eta = \frac{P'_2}{P_1} \times 100 \quad (20)$$

## 2.2 권선 저항 측정

IEC 60034-1(회전기기 - 제1부 : 정격 및 성능)의 8절 온도상승 및 시험에 따르면 전동기가 정격 출력에서 동작하게 한 후, 전동기 권선 온도가 1시간동안 1°C 이상 변화하지 않을 때 정격 부하 열 시험을 멈추고 권선 저항을 측정한다. 전원 개로 후 측정까지 시간이 표 1에 규정된 시간 이내의 경우 그 값을 인정하고, 만약 규정된 시간 내에 저항 측정이 어렵다면 표 1에 규정된 시간의 2배 시간 이내에 가능한 빨리 측정해야 한다. 이때 측정된 값을 시간의 함수로써 구해 최초 정지시의 권선 저항값을 추세하여 산출한다[10].

Table 1. Measurement time

정격 출력(P) kW 또는 kVA	전원 개로 후 시간 간격 (s)
P ≤ 50	30
50 < P ≤ 200	90
200 < P ≤ 5 000	120
5 000 < P	협의에 따름

다이내모미터 테스트에서 회전 중인 전동기를 즉시 멈추고 저항을 측정하는 것이 기술상 어려움이 있어

측정시간에 대한 기준을 마련해두고 있지만, 삼상유도전동기는 온도포화 후 권선 저항 측정에 있어서 냉각시 저항값 곡선은 선형적으로 감소하는 것이 아니라 초기에 급격하게 감소 후 점점 기울기 곡선이 완만해지는 경향을 보인다. 75kW와 150kW 전동기의 경우, 표 1에 따라 90초 이내에 저항 측정을 하면 적합하다고 판단을 하나, 그림 5의 그래프를 보면 전원 개로 후 20초까지 권선 저항값은 급속하게 떨어지는 경향을 보인다.

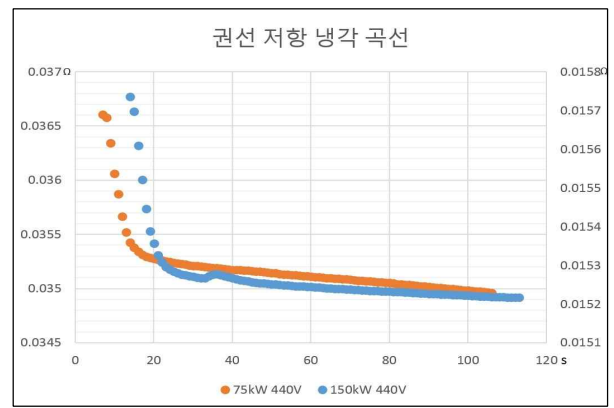


Fig. 5. Winding resistance cooling curve graph

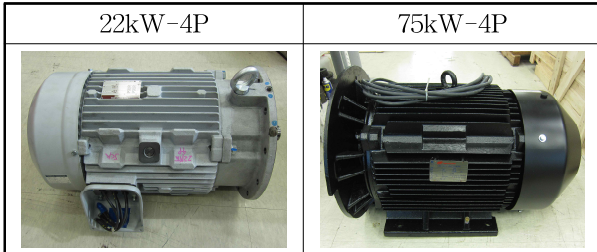
## 2.3 시험 및 결과

삼상유도전동기에 대한 효율측정 시험은 산업통상자원부 효율관리기자재 운용규정에서 요구하고 있는 방법인 IEC 60034-2-1 손실 분리법에 의해 효율시험을 실시하고, 온도상승 시험 및 저항측정은 IEC 60034-1에 따라 측정을 하였다. 각각의 삼상유도전동기에 대하여 효율 시험을 실시하고 저항은 최초측정값, 15초까지 측정한 데이터로 초기저항을 추정된 값, 규정에서 정해진 시간의 측정값, 규정에서 정해진 시간 이후의 데이터로 초기저항을 추정된 값으로 구분하여 같은 조건에서 저항값이 효율측정에 미치는 영향을 비교하였다.

시험 대상 모터는 표 2와 같이 22kW - 4P와 75kW - 4P로 하였다. 22kW - 4P 경우 50kW이하이기 때문에 전원 개로 후 규격에서 정한 시간은 30초 이내이다. 실제 전원 개로 후 권선 저항 측정에 있어 5초가

소요되었고 저항은 매 1초마다 측정하였다. 측정 데이터는 그림 6처럼 분포되었다.

Table 2. The test motors



포화 시, 저항을 추정하는데 있어서 표 3과 표 4의 15초 추정의 경우 최초 저항 측정부터 15초까지 기록하여 0초일 때의 저항값을 추정하였고, 30초 추정의 경우 30초 이후 측정값으로 0초일 때를 추정한 값이다. 모든 측정값이 IEC 60034-1에 적용되는 수치이다. 동손은 식 (15)에 의해 산출이 되었고, 효율은 식 (20)에 의해 산출이 되어 결과는 표 3과 같다.

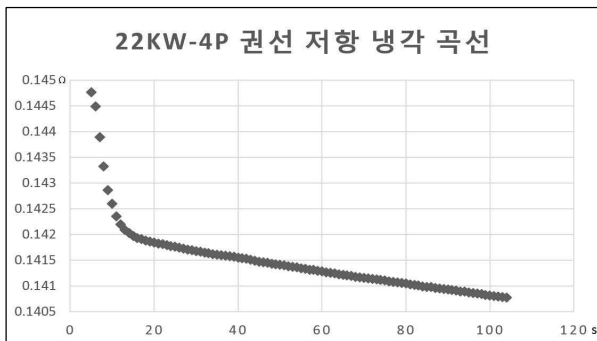


Fig. 6. Cooling curve graph of 22kW-4P

Table 3. Measurement of the motor rated 22kW-4P

	15초 (추정)	5초 (측정)	30초 (추정)	30초 (추정)
권선저항	0.1498Ω	0.1449Ω	0.1417Ω	0.1421Ω
권선온도	52.1℃			
주위온도	20.9℃			
동 손	385.7W	372.9W	364.9W	365.9W
효 율	95.15%	95.20%	95.24%	95.23%

시험 대상 모터 75kW-4P의 경우 50kW초과 200kW 이하이기 때문에 전원 개로 후 규격에서 정산 시간은 90초 이내이다. 실제 전원 개로 후 권선 저항 측정에 있어 9초가 소요되었고 저항은 22kW와 같은 방법으로 매 1초마다 측정하였다. 측정 데이터는 그림 7처럼 분포되었다.

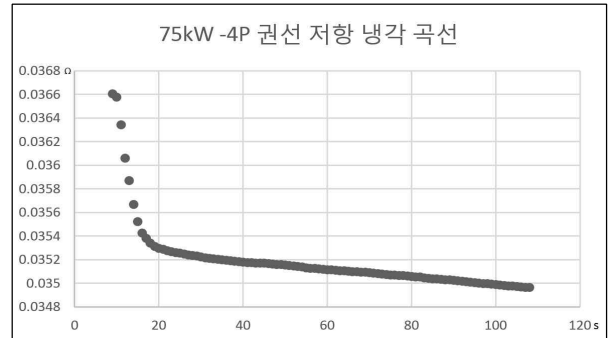


Fig. 7. Cooling curve graph of 75kW-4P

90초 추정의 경우 90초 이후 측정값으로 0초일 때를 추정한 값이고, 그 외의 모든 계산식은 22kW와 동일한 방법으로 진행되어 결과는 표 4와 같다.

Table 4. Measurement of the motor rated 75kW-4P

	15초 (추정)	9초 (측정)	90초 (추정)	90초 (추정)
권선저항	0.0382Ω	0.0366Ω	0.0350Ω	0.0353Ω
권선온도	80.8℃			
주위온도	26.8℃			
동 손	1,042W	1,002W	958.6W	966.8W
효 율	94.84%	94.89%	94.95%	94.94%

### 3. 결 론

본 연구는 삼상유도전동기 효율을 측정하는 과정에서 저항측정이 효율산출에 미치는 영향을 시험을 통해 비교·분석하였다. 시험의 조건에는 국제규격인 IEC 60034-1에서 허용하는 범위 내에서 권선 저항 측정 조건을 설정하였다. 권선 저항 측정 조건은 총 4가지로 설정했는데, 첫 번째는 가장 급격하게 저항이 떨

어지는 지점을 15초까지로 설정하고 15초까지 측정된 데이터로 0초에서의 저항값을 추정하였고, 두 번째는 가장 빨리 측정된 값을 조건으로 하였다. 세 번째는 규격에서 요구하는 시간에서의 저항값을 설정하였고, 마지막으로 네 번째는 규격에서 제시한 방법인 요구된 시간에 저항측정을 못하였을 경우 요구된 시간 이후의 데이터로 0초를 추정하여 조건의 값으로 설정하였다. 이와 같은 설정으로 단순 저항값만 비교해보면 22kW-4P의 경우 최대 저항값과 최소 저항값의 차이가 약 5.4% 발생하였고, 75kW-4P의 경우 최대 저항값과 최소 저항값의 차이가 약 8.4% 발생하였다. 이는 효율값에도 영향을 주어 22kW-4P는 0.09%, 75kW-4P는 0.11%의 효율의 차이를 나타내었다.

이와 같은 효율의 차이는 측정의 어려움 때문에 규격에서는 측정허용시간을 규정하였는데, 너무 긴 정지 시간을 규격에서 허용하여 실제 저항값보다 낮은 저항값을 효율값 계산에 이용된다. 이는 실제 발생하는 동손의 값보다 낮은 값으로 산정하게 되어 효율이 상대적으로 높게 나오는 결과를 도출하였다. 보다 정확한 권선저항 측정 및 효율 측정을 하기 위해서는 전원개로 후 측정시간을 가장 짧게 하거나, 저항 감소가 완만해지기 전 약 15초까지 측정을 여러 번하여 측정된 저항 데이터로 정지 시 저항값을 추정하는 방법이 가장 타당하다고 생각된다.

본 논문은 삼상유도전동기의 효율측정에 있어 정확한 권선 저항 측정 및 효율 측정에 활용이 될 수 있다. 또한 향후 연구에서 삼상유도전동기의 효율 측정뿐만 아니라 기타 전동기 및 변압기류에서의 권선 저항 측정에도 확장하여 정의한다면 효율 및 저항 측정에 대한 측정기술을 향상시킬 수 있을 것이다.

## References

[1] Korea's Energy Standards & Labeling, Kemco, pp.54-61. 2010.  
 [2] Marcos Gonzalez Alvarez, "European experience in motor and motor system MEPS", Motor summit '14.

[3] Regulation on Energy Efficiency Labeling and Standards, MTE's Notification 2015 - 184, Kemco, 2015.  
 [4] IEC 60034-30 Rotation electrical machines - Part 30 : Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage induction motors (IE-code), 2008.  
 [5] Martin Doppelbauer, "IEC Motor Efficiency classes", Motor summit '12.  
 [6] Conrad U. Brunner, Chris Evans, Rita Werle, "Standard Format for IEC standards - Learning from motor standards for other electric equipment", eemods '13.  
 [7] Conrad U. Brunner, "Efficiency electric motor systems : global developments", EMSA.  
 [8] IEC 60034-2-1 Rotation electrical machines - Part 2-1 : standard methods for determining losses and efficiency from tests. 2014.  
 [9] KSC IEC 61972 Method for determining losses and efficiency of three-phase cage induction motors, 2006.  
 [10] IEC 60034-1 Rotation electrical machines - Part 1 : Rating and performance, 2010.

## ◇ 저자소개 ◇



**강병국 (姜秉國)**

1978년 10월 20일생. 2005년 동국대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한양대학교 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005~2006년 대한전선 초고압케이ابل기술팀 근무. 2007년~현재 한국산업기술시험원 에너지시스템센터 선임연구원 근무. 2012년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



**김광민 (金光珉)**

1976년 10월 27일생. 1999년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~2009년 LG산전 시스템드라이브연구팀 선임연구원. 2009~2012년 현대자동차 전력변환설계팀 책임연구원. 2012년~현재 한국산업기술시험원 전기용품평가센터 선임연구원 근무. 2011년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



**이 주 (李 柱)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.