



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

인버터 구동 3상 유도전동기의
효율 불확도에 관한 연구



2018 年 2 月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

李 昊 炫

工學碩士 學位論文

인버터 구동 3상 유도전동기의 효율 불확도에 관한 연구

Study on the Efficiency Uncertainty for
a Inverter-fed Three-Phase Induction Motor

指導教授 禹 炅 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2018 年 2 月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

李 昊 炫

李昊炫의 工學碩士 學位論文을 認准함

2017 年 12 月



主 審	工學博士	朴 瀚 錫	Ⓜ
委 員	工學博士	文 相 弼	Ⓜ
委 員	工學博士	禹 炅 一	Ⓜ

목 차

목 차	i
기호 설명	iii
Abstract	v

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 내용 및 구성	3

제 2 장 유효요소법을 이용한 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율 계산

2.1 효율 계산 절차	4
2.2 회로 모델링	6
2.3 손실 분리 시험	8
2.4 추가적인 고조파 손실	17
2.5 효율 계산	20

제 3 장 측정 불확도 이론

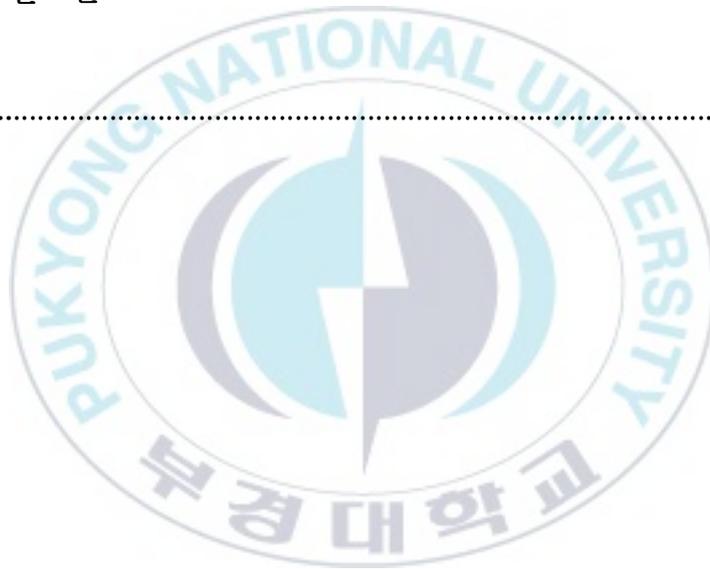
3.1 기본 개념	23
3.2 A/B형 표준 불확도	25
3.3 합성 표준 불확도	26
3.4 유효 자유도	26
3.5 확장 불확도	27

제 4 장 유한요소법을 이용한 인버터 구동 3상 유도전동기의
효율 불확도 평가

4.1 유한요소법에서의 측정 불확도 이론 적용 30
4.2 정현파 구동 유도전동기의 손실 불확도 34
4.3 추가적인 고조파 손실 불확도 39
4.4 효율 불확도 평가 41

제 5 장 결 론 44

참고문헌 45



기호 설명

P_1	입력전력(부하 시험 시) [W]
P_0	입력전력(무부하 시험 시) [W]
P_2	기계적 출력 [W]
V_1	전압(부하 시험 시) [V]
V_0	전압(무부하 시험 시) [V]
I	전류(부하 시험 시) [A]
I_0	전류(무부하 시험 시) [A]
R_0	초기 권선 저항 [Ω]
R_1	포화 온도에서의 권선 저항 [Ω]
T	토크 [Nm]
N	회전속도 [rpm]
θ_0	초기 대기 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
θ_{w1}	포화 온도에서의 권선 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
θ_1	대기 온도(포화 온도 시험 시) [$^{\circ}\text{C}$]
θ_w	권선 온도(부하 시험 시) [$^{\circ}\text{C}$]
θ_c	대기 온도(부하 시험 시) [$^{\circ}\text{C}$]
θ_{w0}	권선 온도(무부하 시험 시) [$^{\circ}\text{C}$]
K	온도 보정 계수(구리 : 234.5, 알루미늄 : 224.5)
$P_{HL, Load}$	추가적인 고조파 손실의 부하의존 부분 [W]
$P_{HL, No-Load}$	추가적인 고조파 손실의 일정 부분 [W]
P_{HL}	추가적인 고조파 손실 [W]
$P_{T, sin}$	정현파 공급 시 전동기 총 손실 [W]

$P_{T, inverter}$	인버터 구동시 전동기 총 손실 [W]
η	효율 [%]
$u_A(X_i)$	입력량 X_i 의 A형 표준 불확도
$u_B(X_i)$	입력량 X_i 의 B형 표준 불확도
ν_A	A형 자유도
ν_B	B형 자유도
$u_c(Y)$	모델식 Y 의 합성 표준 불확도
ν_{eff}	유효 자유도
U	확장 불확도
k	포함인자



Study on the Efficiency Uncertainty for a Inverter-fed Three-Phase Induction Motor

Ho-Hyun Lee

Department of Electrical Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This paper presented an evaluation method for the efficiency uncertainty of an inverter-fed three-phase induction motor using FEM. The motor efficiency in the FEM is calculated by the IEC 60034-2-3 as in the actual test. In the process of evaluating the efficiency uncertainty, the difference between the finite element method and the actual test is the method of calculating the type-A/B standard uncertainty of the input quantity to estimate the efficiency and each losses. For the input quantities which can confirm the instantaneous values with respect to time, the type-A standard uncertainty in the FEM is calculated from the RMS values or average values having separate periods in the steady state. And, the type-B standard uncertainty in the finite element method is assumed to be zero. Also, this paper compared and analyzed the efficiency uncertainty evaluated by the proposed method and the efficiency uncertainty through the actual test.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

전동기는 생산된 전기의 약 70[%]를 소비하는 것으로 알려져 있으며, 여러 종류의 전동기 중 3상 유도전동기는 국가 전체 전력 소비량의 40[%]를 차지하고 있다. 최근 환경규제가 높아짐에 따라, 세계의 각 정부들은 전동기 최저효율제를 도입하고 있다. 우리나라는 최초 시행된 2008년에 0.75~200[kW]급 전동기에 대해 IE2(고효율) 등급을 적용하였으며, 최근 2015년에는 37~200[kW]급 전동기에 대해 IE3(프리미엄) 등급을 적용하였다. 향후 2018년 이후에 37[kW]급 이하의 전동기에 대해서도 IE3 등급이 적용될 예정이다[1]. 또한, 0.75[kW]급 이상 375[kW]이하인 3상 유도전동기에 적용되는 효율관리기자재 운용규정에 따르면, KS C IEC 60034-2-1의 손실 분리 시험에 의하여 측정된 전부하효율을 최저효율의 기준으로 적용하고 있다[2].

효율 측정을 위해 전동기에 부하를 가하여 시험하는 경우, 입력 에너지를 포함한 다른 측정값들은 계측 장치의 정밀도, 시험 방법, 혹은 시험자의 숙련도에 따라 달라질 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 손실 분리 시험은 수차례에 거친 측정으로 얻은 샘플의 평균을 통해 효율을 계산한다[3]. 그러나 측정 단계에서 나타날 수 있는 측정값들의 변동이 효율에 모두 포함된다고 무한히 신뢰하기에는 다소 어려움이 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 측정 불확도 이론을 도입하여 효율 불확도를 평가함으로써 계산된 효율의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법이 제안되었다[4]. 측정 불확도 이론은 실제 시험 시 반복 측정에 의해 발생할 수 있는 불확실한 요인들을 수치화하여 측정 결과에 대한 신뢰구간을 명시하는 방법이다.

제안된 방법은 피시험 전동기의 손실 분리 시험을 위한 공급 전압으로 상용 전원을 이용하였다. 그러나 현재 대부분의 유도전동기는 속도 및 토크 제어를 위해 인버터로 구동된다. 인버터는 구성 소자의 스위칭 과정을 통해 직류 에너지를 교류 에너지로 변환시키는 전력변환장치이다. 유도전동기의 인버터 구동 시 철심의 포화를 방지하기 위해 스위칭 신호는 전압과 주파수를 일정 비율로 동시에 변화시킬 수 있는 SPWM 제어를 채택한다. 따라서 유도전동기를 인버터로 구동할 경우, 전동기에 공급되는 전압은 정현파가 아닌 고조파가 함유되어 있는 전압이므로 그에 따라 손실과 효율이 달라진다. 현재 인버터로 구동되는 유도전동기에서 발생하는 고조파 손실을 명시하기 위해 IEC 표준이 제정되었다[5]. 반면, 국내에서는 전동기의 설계, 해석 및 인버터 개발에만 연구가 진행 중이며, 고조파 손실 규명과 정확한 효율 측정에 관한 연구는 미비한 실정이다.

또한, 실제 시험으로 전동기의 효율을 평가하는 것이 가장 신뢰적이지만, 이를 위해서는 정확한 정밀도를 갖는 다양한 계측 장치가 요구되므로 비용적인 측면에서 부담이 될 수 있다. 또한, 별도의 안전 대책이 마련되지 않은 경우 시험 중인 전동기에 의해 사고 발생의 가능성이 있어 위험하다. 반면, 유한요소법은 실제 시험의 단점을 보완할 대안이 될 수 있으며, 실제 모델과 동일한 조건으로 해석할 경우 간단하고 정확한 해석이 가능하기 때문에, 유한요소법을 이용하여 유도전동기의 효율을 계산하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

1.2 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율 불확도를 실제 시험이 아닌, 유한요소법으로 평가하는 방법을 제시하고자 한다. 먼저, 유한요소법으로 인버터 구동 3상 유도전동기를 해석하고, 해석 결과를 이용하여 IEC 60034-2-3을 바탕으로 효율을 계산한다. 그 후, 측정 불확도 이론을 유한요소법에 적용하여 인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도를 평가한다. 또한, 본 논문에서 제시하는 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실제 시험으로 얻은 결과와 비교·검토한다.

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 각 내용은 다음과 같다.

1장은 서론으로 연구 배경 및 필요성과 연구내용을 담고 있다.

2장에서는 전자기 해석 프로그램인 Maxwell과 전력전자 해석 프로그램인 Simplorer를 이용하여 인버터 구동 3상 유도전동기를 해석하고, IEC 60034-2-3을 바탕으로 해석한 전동기의 효율을 계산하였다.

3장에서는 측정 불확도 이론에 대해 소개하였다.

4장에서는 유한요소법에 측정 불확도 이론을 적용하여 2장에서 해석한 인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도를 평가하였다.

5장은 결론으로 본 논문의 연구결과와 그에 대한 고찰, 그리고 앞으로의 과제를 나타내었다.

제 2 장 유한요소법을 이용한 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율 계산

현재 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율을 평가하는 국내 표준 시험방법은 아직 제정되지 않았으며, KS Q TS/IEC 60034-2-1의 손실 분리 시험으로 평가하고 있다. 국외에는 IEC로부터 인버터 구동 유도전동기의 효율을 측정하는 구체적인 표준 시험방법으로 IEC 60034-2-3이 제정되어, 각 국의 상황에 맞게 적용하고 있는 추세이다. 이 장에서는 IEC 표준을 바탕으로 유한요소법을 이용하여 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율을 계산한다.

2.1 효율 계산 절차

인버터는 구성 소자들의 스위칭을 통해 직류 에너지를 교류 에너지로 변환시키는 전력변환장치이며, 3상 유도전동기의 구동을 위한 스위칭 신호는 전압과 주파수가 동시에 변화시킬 수 있는 SPWM 제어가 이용된다[6]. SPWM 제어되는 인버터의 출력전압은 그림 1과 같다. 그림 1의 전압은 기본파에 대해 수많은 고차 고조파가 함유되어 있으므로, 전동기의 전원으로 이용할 경우 기본파 성분에 의한 손실 이외에 고조파 성분에 의한 손실이 추가적으로 발생한다. IEC 60034-2-3은 고조파 성분으로 인한 추가적인 손실을 명시하는 방법을 통해 인버터로 구동되는 3상 유도전동기의 효율을 계산한다.

IEC 60034-2-3에 따르면, 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율을 측정하기 위한 절차는 그림 2와 같다. 먼저 기본파 성분에 의한 손실을 파악하기 위해, 상용 전원으로 유도전동기를 구동하여 IEC 60034-2-1의 손실

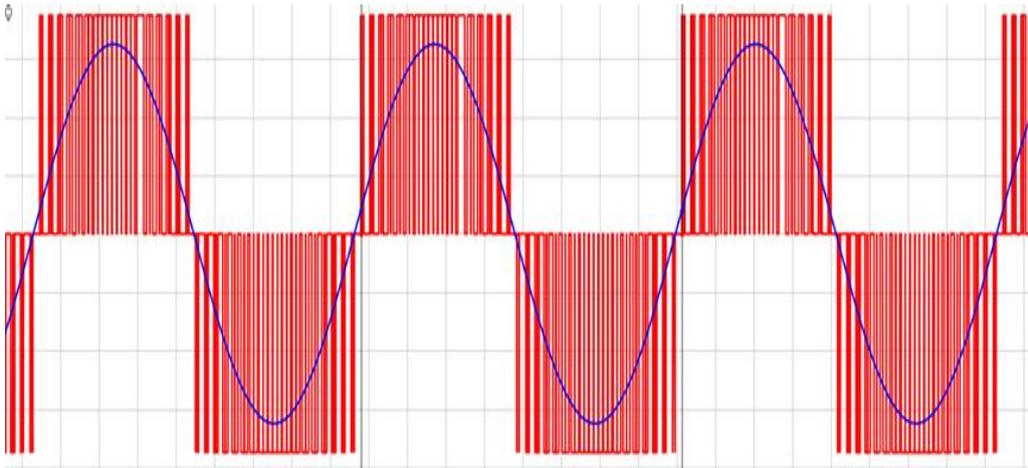


그림 1. SPWM 제어되는 인버터의 출력 선간전압

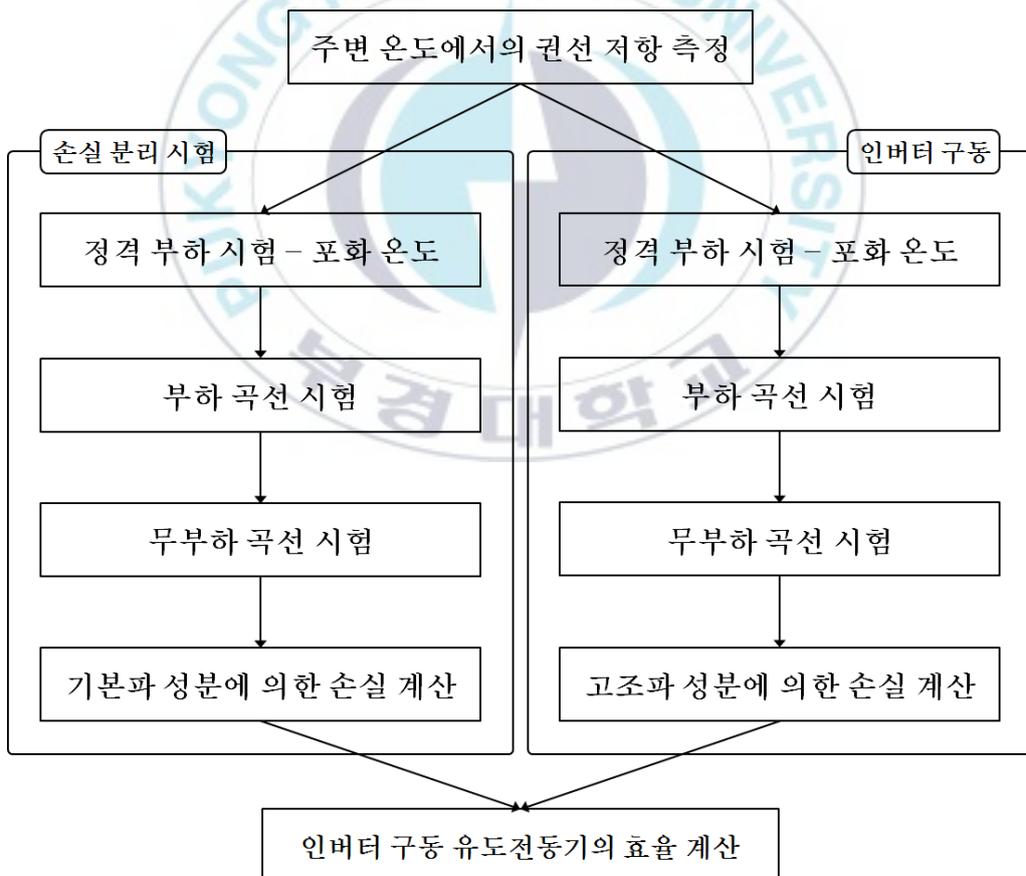


그림 2. 인버터 구동 유도전동기의 효율 측정 절차

분리 시험을 진행한다. 그 후, 유도전동기를 인버터로 구동한 상태에서 IEC 60034-2-1의 무부하 곡선 시험과 부하 곡선 시험을 시행하여 고조파 성분이 포함된 손실을 계산한다. 다음으로, 고조파 성분이 포함된 손실에서 기본파 성분에 의한 손실을 빼주어 고조파 성분에 의한 추가적인 손실을 계산하여 효율을 평가한다.

2.2 회로 모델링

그림 3은 본 논문의 효율 계산을 위해 선정된 0.86[kW]급 3상 유도전동기이며, 그 정격을 표 1에 나타내었다. 그림 4은 유한요소법을 이용한 효율 계산을 위해 그림 3의 인버터 구동회로를 단면도로 나타낸 것이다. 3상 유도전동기의 전자기적 해석은 Maxwell을 이용하였고, 이를 구동시키는 인버터 회로는 Simplorer를 이용하였다.

Maxwell을 이용한 유도전동기의 전자기적 해석은 2차원 및 3차원 모두 가능하나, 본 논문에서는 간단한 효율 계산을 위해 비교적 시간이 덜 소요되는 2차원 해석을 진행하였다.

본 논문에서 인버터 구동 유도전동기의 효율을 평가하는 규격은 IEC 60034-2-3이며, 이는 인버터 드라이브를 포함한 효율이 아닌 인버터로 구동되는 유도전동기만의 효율을 평가하는 절차이므로 그림 4와 같이 이상적인 인버터 회로를 설계하였다. 스위칭 소자인 IGBT와 다이오드의 전압강하는 0[V]로 설정하였으며, 설계된 인버터는 유도전동기의 포화를 방지하기 위해 전압과 주파수를 동시에 변화시킬 수 있는 SPWM 기법으로 제어된다.

표 1의 정격전압을 얻기 위해 직류 링크전압 V_{dc} 은 다음과 같이 결정하였다.



그림 3. 0.86[kW]급 3상 유도전동기

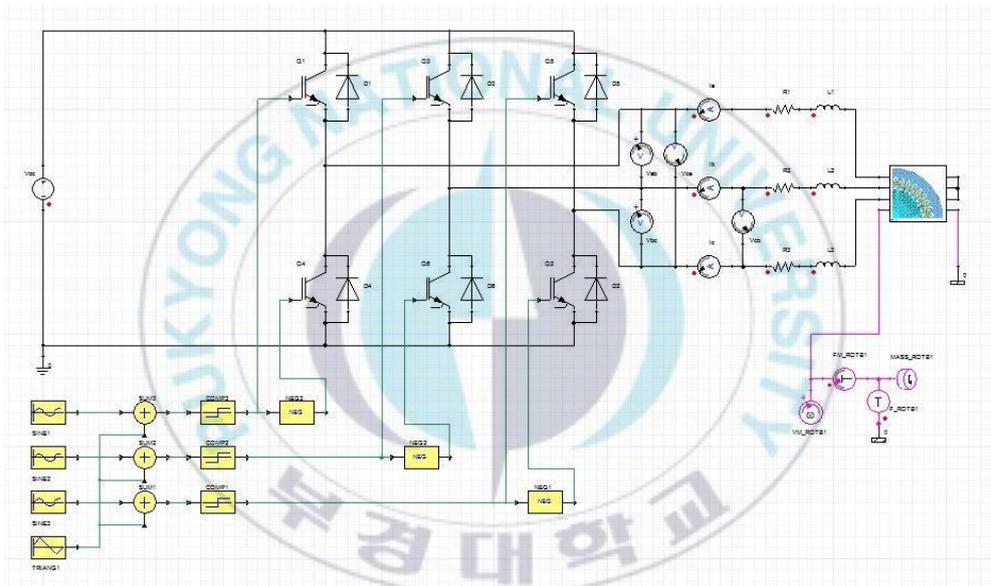


그림 4. 인버터 구동 유도전동기 회로도 (Maxwell & Simplorer)

표 1. 0.86[kW]급 3상 유도전동기 정격

항목 [단위]	정격
출력 [kW]	0.86
전압 [V]	460
극수	4
주파수 [Hz]	60

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{m_a\sqrt{3}} V_{line} \text{ [V]} \quad (1)$$

여기서, V_{line} 은 인버터의 출력 선간전압이며, m_a 는 인버터의 진폭 변조 지수이다.

2.3 손실 분리 시험

인버터 구동에서 발생하는 추가적인 고조파 손실을 계산하기 위해서, 먼저 상용 전원을 구동시킨 후 기본파 성분과 의해 발생하는 손실을 구하여야 한다. 상용전원으로 구동되는 유도전동기의 손실을 측정하기 위한 국내 표준 시험방법은 KS C IEC/TS 60034-2-1의 손실 분리 시험이다.

손실 분리 시험의 절차는 그림 2의 왼쪽 영역에 해당한다. 먼저 피시험 전동기를 상온에서 수 시간 이상 방치한 후, 고정자 권선 온도가 주변 대기 온도와 같을 때의 온도 θ_0 와 권선 저항 R_0 을 측정한다.

전동기를 장시간 운전할 경우, 온도 상승으로 인해 효율 값이 다소 달라질 수 있다. 손실 분리 시험은 포화 온도에서의 손실을 상온에 대해 보정하여 효율을 제공한다. 피시험 전동기에 정격 부하를 인가하여 고정자 권선 온도가 30분 내에 1[K] 이하의 변동률을 가질 때까지 운전하고, 이 시점에서의 권선 저항 R_1 , 권선 온도 θ_{w1} , 대기 온도 θ_1 을 측정한다.

피시험 전동기에 대한 부하 곡선 시험은 정격 부하 시험 직후 포화 온도를 유지한 상태에서, 정격부하에 대한 6개의 가변 부하 지점에서 토크 τ , 입력 P_1 , 전류 I , 속도 N , 권선 온도 θ_w , 대기 온도 θ_c , 전압 V_1 등을 측정한다. 정격부하에 대한 6개의 부하 지점은 125[%], 110[%], 100[%], 75[%], 50[%], 25[%] 이다.

무부하 곡선 시험은 피시험 전동기에서 부하 전동기를 제거한 상태에서,

정격 전압에 대한 9개의 가변 전압 지점에서 입력 P_1 , 전류 I_0 , 전압 V_0 , 권선 온도 θ_{w0} 등을 측정한다. 정격전압에 대한 9개의 전압 지점은 125[%], 110[%], 100[%], 90[%], 80[%], 60[%], 50[%], 35[%], 20[%] 이다.

본 논문에서는 간단한 유한요소 해석을 위해 열 및 유체역학을 포함한 Multi-Physics를 고려하지 않고, Maxwell을 이용하여 전자기장 해석만 진행하였다. 따라서 본 논문에서 운전 중인 전동기에서 발생하는 온도 상승 및 권선 저항 증가는 피시험 전동기를 실제로 시험한 데이터를 이용하였다. 온도와 권선 저항을 제외한 전동기의 토크, 입력, 전류, 속도, 전압은 유한요소법으로 해석할 수 있으며, 유도전동기에 정현파 전압을 인가하여 해석한 결과를 표 2에 나타내었다. 손실 분리 시험은 효율 계산 시 각 측정값의 변동을 고려하기 위해 n 회 측정으로 얻은 raw data의 산술평균을 이용한다. 표 2은 해석 결과의 raw data로 산술평균을 구하여 정리한 것이다.

2.3.1 풍·마찰손

유도전동기를 무부하로 운전시킬 경우, 슬립이 매우 작기 때문에 회전자 동손 및 표류 부하손은 거의 발생하지 않는다. 따라서 무부하 시험에서 얻을 수 있는 손실은 무부하 전류에 따른 고정자 동손, 철손, 그리고 풍·마찰손이며, 이 중 풍·마찰손은 회전자에 부착된 냉각팬, 베어링 등에서 발생하는 손실이다. 또한, 철손과 풍·마찰손의 합은 전동기의 속도 변화와 관계없이 일정한 추이를 따르므로 다음과 같이 일정손실로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_k &= P_{fw} + P_{fe} = P_0 - P_{s0} \\
 &= P_0 - 1.5 \times I_0^2 \times \left(R_0 \times \frac{\theta_{w0} + K}{\theta_0 + K} \right) [\text{W}]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

표 2. 유한요소 해석 결과 (정현과 구동)

1) 주변 온도에서의 권선 저항 측정 (실제 시험 값)

초기 권선 저항[Ω]	초기 온도[°c]	25[°c]로 보정된 초기 권선 저항[Ω]
12.37	24.70	12.38

2) 정격 부하 시험 - 포화 온도 (실제 시험 값)

권선 저항[Ω]	권선 온도[°c]	주위 온도[°c]
13.84	56.10	23.80
온도 상승	25[°c]로 보정된 권선 저항[Ω]	
31.40	12.36	

3) 부하 곡선 시험 - 부하에 따른 특성 (유한요소 해석 값)

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
토크[Nm]	6.08	5.30	4.79	3.54	2.33	1.15
입력[kW]	1285.13	1123.00	1017.87	766.08	526.59	297.18
전류[A]	2.05	1.88	1.77	1.54	1.37	1.26
속도[rpm]	1689.89	1705.35	1715.13	1738.30	1759.83	1780.02
권선 온도[°c]	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
주위 온도[°c]	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70
전압[V]	459.99	459.99	459.99	459.99	459.99	459.99

4) 무부하 곡선 시험 - 무부하 특성 (유한요소 해석 값)

전압변화율[%]	125	110	100	90	80	60
입력[kW]	202.20	108.35	77.61	58.31	46.38	28.69
전류[A]	2.26	1.52	1.23	1.03	0.88	0.64
전압[V]	574.99	505.99	459.99	413.99	367.99	275.90
권선 온도[°c]	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
	50	35	20			
입력[kW]	21.95	14.72	10.13			
전류[A]	0.54	0.38	0.23			
전압[V]	230.00	161.00	92.00			
권선 온도[°c]	40.00	40.00	40.00			

일정손실로부터 풍·마찰손은 다음과 같이 얻을 수 있다. 먼저 정격전압의 50~20[%] 사이 3개의 전압 지점에 대해 무부하 시험을 수행한다. 시험 측정값으로부터 그림 5과 같이 무부하 전압의 제곱(V_0^2 , x 축)에 대한 일정손실(P_k , y 축) 곡선을 작성한다.

그림 5로 작성된 일정손실 곡선은 $y = ax + b$ 로 표현할 수 있으며, 풍·마찰손은 작성된 곡선을 영전압까지 가정하여 직선을 연장했을 때의 y 절편 값이다. 표 3은 표 2를 바탕으로 계산한 풍·마찰손을 나타낸다.

2.3.2 철손

손실 분리 시험에서 철손을 계산하는 과정은 다음과 같다. 2.3.1에서 얻은 일정손실과 풍·마찰손으로부터 무부하 시험에서의 철손(P_{fe} , y 축)을 구하여, 그림 6과 같이 정격전압의 125~60[%] 사이의 6개의 전압 지점(V_0 , x 축)에 대한 곡선을 작성한다.

전동기가 무부하로 운전하는 경우 철손의 변화는 거의 없으나, 부하를 인가하여 운전시킬 경우 철손은 슬립에 따라 달라진다[7]. 따라서 부하가 인가된 전동기의 철손을 구하기 위해, 다음과 같이 가변부하 시험으로부터 고정자 권선에서의 저항성 전압 강하를 고려한 철손 전압 V_r 을 산정한다.

$$V_r = \sqrt{\left(V - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \times \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \times \sin \phi\right)^2} \quad [\text{V}] \quad (3)$$

여기서, $\cos \phi$ 와 $\sin \phi$ 는 각각 전동기의 유효율과 무효율이며, R 은 부하 시험 시의 권선 저항이다. 각각은 다음과 같이 구할 수 있다.

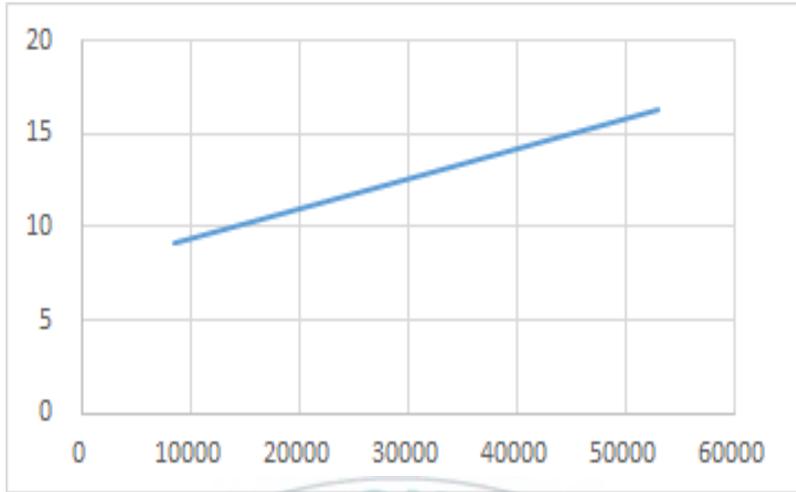


그림 5. 일정손실 곡선

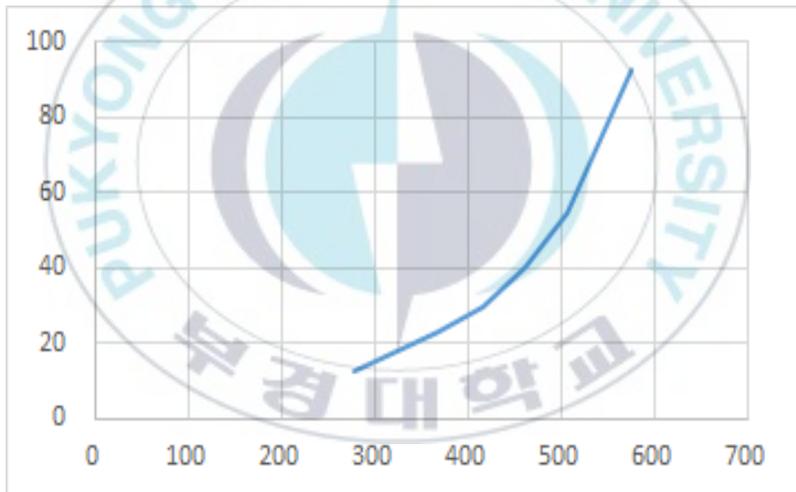


그림 6. 철손 곡선

표 3. 풍·마찰손 계산

전압변화율[%]	50	35	20
P_{s0} [W]	5.66	2.82	1.02
P_k [W]	16.29	11.89	9.11
P_{fw} [W]	7.73		

표 4. 철손 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
$\cos \phi$	0.79	0.75	0.72	0.62	0.48	0.30
$\sin \phi$	0.62	0.66	0.69	0.78	0.88	0.96
V_r [V]	440.95	443.38	444.95	448.72	452.31	455.76
P_{fe} [W]	34.73	35.27	35.62	36.49	37.36	38.21

$$\cos \phi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times V \times I} \quad (4)$$

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

$$R = R_0 \times \frac{\theta_w + K}{\theta_0 + K} \quad (6)$$

표 4는 그림 6의 철손 곡선에서 식 (3)~(6)으로 구한 철손 전압을 대입하여 계산한 각 부하 지점의 철손을 나타낸다.

2.3.3 표류부하손

표류부하손은 발생 위치 및 원인 등에 대해 많은 연구가 진행되었으나, 아직까지 정확하게 규명되지 않은 손실이다[8][9]. 하지만 표류부하손은 부하가 인가된 전동기에서 반드시 발생하는 손실이며, 손실 분리 시험에서 표류부하손을 계산하는 과정은 다음과 같다. 먼저 식 (7)을 이용하여 입력에서 기계적 출력, 고정자 동손, 철손, 회전자 동손, 풍·마찰손을 제외하여 잔류손실 P_{Lr} 을 구한다.

$$P_{Lr} = P_1 - (P_2 + P_s + P_{fe} + P_r + P_{fw}) \quad (7)$$

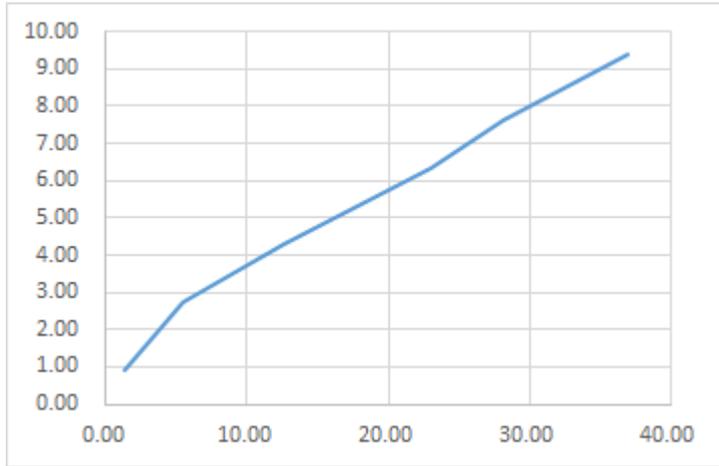


그림 7. 잔류손실 곡선

풍·마찰손과 철손은 2.3.1 ~ 2절에서 구한 값이며, 부하 시험 시 발생하는 고정자 동손, 회전자 동손 및 기계적 출력은 각각 다음을 이용하여 얻을 수 있다. 그 후, 그림 7과 같이 토크의 제곱(T^2 , x 축)에 대한 잔류손실(P_{Lr} , y 축)의 곡선을 작성한다.

$$P_s = 1.5 \times I^2 \times R_0 \times \left(\frac{\theta_w + K}{\theta_0 + K} \right) [\text{W}] \quad (8)$$

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times \left(\frac{N_s - N}{N_s} \right) [\text{W}] \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{2\pi}{60} \times T \times N \quad (10)$$

표류부하손은 작성된 곡선에서 다음과 같이 회귀분석을 통한 기울기 A 를 토크의 제곱과 곱하여 얻을 수 있다. 표 5는 상기 언급된 과정으로 계산한 표류부하손을 나타낸다.

표 5. 표류부하손 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
P_s [W]	87.01	72.91	64.85	49.14	38.65	32.79
P_r [W]	71.16	53.37	43.25	23.32	10.06	2.51
P_2 [W]	1075.12	946.10	860.09	645.07	430.05	215.02
P_{Lr} [W]	9.38	7.62	6.33	4.32	2.75	0.92
P_{LL} [W]	8.41	6.39	5.22	2.86	1.24	0.30

$$A = \frac{\{i \times \sum (P_{Lr} \times T^2)\} - (\sum P_{Lr} \times \sum T^2)}{\{i \times (\sum T^2)^2\} - (\sum T^2)^2} \quad (11)$$

$$P_{LL} = A \times T^2 \text{ [W]} \quad (12)$$

여기서, i 는 잔류손실과 토크의 합산에 사용된 부하 지점의 수이다.

2.3.4 온도보정 동손

전동기에 부하를 인가하여 운전시킬 경우 온도 상승은 필연적이며, 전동기 온도에 따라 효율 값이 변할 수 있다. 유도전동기에서 발생하는 손실 중 고정자 동손과 회전자 동손은 온도에 민감한 손실이다. 따라서 손실 분리 시험은 다음과 같이 포화 온도 지점에서 계산한 동손을 25[°C]로 보정하여 제공하며, 표 6에 나타내었다.

$$P_{s\theta} = 1.5 \times I^2 \times R_1 \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K} \right) \text{ [W]} \quad (13)$$

표 6. 25[°C]로 보정된 동손 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
$P_{s\theta}$ [W]	87.26	73.11	65.03	49.28	38.76	32.88
$P_{r\theta}$ [W]	71.23	53.41	43.29	23.34	10.06	2.51

$$\begin{aligned}
 P_{r\theta} &= (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times s_{\theta} & (14) \\
 &= (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times s \times \left(1 + \frac{25^{\circ}\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \\
 &= (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times \left(\frac{N_s - N}{N_s}\right) \times \left(1 + \frac{25^{\circ}\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) [\text{W}]
 \end{aligned}$$

2.3.5 정현파 구동에서의 효율

2.3.1 ~ 4절을 통해 정현파 전압으로 구동된 유도전동기에서 발생하는 모든 손실을 계산하였으므로, 표 2의 측정된 입력에 대해 다음과 같이 효율을 구할 수 있으며, 표 7에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100 & (15) \\
 &= \left(1 - \frac{P_{s\theta} + P_{fe} + P_{r\theta} + P_{fw} + P_{LL}}{P_1}\right) \times 100 [\%]
 \end{aligned}$$

표 7. 각 부하 지점에서의 효율 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
η [%]	83.71	84.34	84.59	84.37	81.93	72.53

2.4 추가적인 고조파 손실

인버터 구동 유도전동기의 효율을 계산하기 위해, 추가적인 고조파로 인한 손실을 파악해야 한다. 이를 위한 절차는 그림 2의 오른쪽 영역에 해당한다. 인버터로 구동되는 유도전동기의 정격 부하 시험, 무부하 및 부하 곡선 시험에 대한 유한요소 해석 결과를 표 8에 나타내었다.

상용 전원을 조건으로 해석한 표 8과 비교한 결과, 유도전동기를 인버터로 구동시키는 경우 기계적 출력은 일정한 반면, 전동기 입력과 권선 전류는 증가하였다. 이는 인버터 구동으로 발생하는 고조파 성분 때문이며, 고조파 성분은 유도전동기에서 발생하는 손실에 영향을 끼친다.

유도전동기의 철손과 풍·마찰손의 합은 부하 변화와 관계없이 일정한 추이를 보이므로 일정손실로 취급한다. 이와 관련하여, 인버터 구동에 의해 여러 손실이 변화하여도 부하와 무관하게 일정한 증가분이 있을 것으로 가정하여 계산한 손실이 추가적인 고조파 손실의 일정 부분이다.

추가적인 고조파 손실의 일정 부분은 다음과 같이 인버터 구동에서의 일정손실과 정현파 공급에서의 일정손실간의 차이로 계산할 수 있으며, 표 9에 나타내었다.

$$P_{HL, No-Load} = P_{kC} - P_k [W] \quad (16)$$

손실 분리 시험에서 표류부하손은 각 부하 지점에서 발생하는 잔류손실의 평활화를 통해 계산하며, 잔류손실은 측정된 입력에 대해 고정자 동손, 철손, 회전자 동손, 풍·마찰손 및 기계적 출력을 빼주어 계산한다. 이처럼 잔류손실의 계산은 부하에 따른 영향을 포함한다고 가정할 수 있으며, 부하 크기에 따라 변화하는 고조파 손실의 크기는 추가적인 고조파 손실의 부하 의존부분 $P_{HL, Load}$ 로 고려할 수 있다.

표 8. 유한요소 해석 결과 (인버터 구동)

1) 주변 온도에서의 권선 저항 측정 (실제 시험 값)

초기 권선 저항[Ω]	초기 온도[°c]	25[°c]로 보정된 초기 권선 저항[Ω]
12.37	24.70	12.38

2) 정격 부하 시험 - 포화 온도 (실제 시험 값)

권선 저항[Ω]	권선 온도[°c]	주위 온도[°c]
14.53	70.00	23.80
온도 상승	25[°c]로 보정된 권선 저항[Ω]	
45.30	12.38	

3) 정격전압 가변부하 시험 - 부하에 따른 특성

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
토크[Nm]	6.00	5.24	4.80	3.54	2.35	1.19
입력[kW]	1306.83	1142.52	1047.75	776.62	535.74	303.11
전류[A]	2.04	1.88	1.79	1.56	1.40	1.28
속도[rpm]	1689.11	1705.35	1715.58	1739.63	1761.78	1780.71
권선 온도[°c]	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
주위 온도[°c]	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70
전압[V]	557.10	557.44	557.73	557.37	557.55	540.72

4) 가변전압 무부하 시험 - 무부하 특성

전압변화율[%]	125	110	100	90	80	60
입력[kW]	210.12	115.17	84.36	64.22	51.84	33.22
전류[A]	2.30	1.56	1.25	1.05	0.89	0.66
전압[V]	696.91	603.24	557.62	501.90	446.05	334.60
권선 온도[°c]	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
	50	35	20			
입력[kW]	27.09	20.54	15.72			
전류[A]	0.54	0.38	0.24			
전압[V]	279.09	195.27	111.67			
권선 온도[°c]	35.00	35.00	35.00			

표 9. 추가적인 고조파의 일정손실 계산

전압변화율[%]	100
P_{kC} [W]	52.87
P_k [W]	47.50
$P_{HL, No-Load}$ [W]	5.37

인버터 구동 유도전동기의 잔류손실은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{LrC} = P_{1C} - (P_{2C} + P_s + P_{fe} + P_r + P_{fw}) \text{ [W]} \quad (17)$$

여기서, P_{1C} 와 P_{2C} 는 측정된 값이며, P_s , P_{fe} , P_r , P_{fw} 는 모두 정현파 공급에서 계산된 손실이다.

추가적인 고조파 손실의 부하 의존부분은 다음과 같이 인버터 구동에서의 표류부하손과 정현파 공급에서의 표류부하손간의 차이로 계산할 수 있으며, 표 10에 나타내었다.

$$P_{HL, Load} = P_{LLC} - P_{LL} \text{ [W]} \quad (18)$$

인버터 구동에 의해 발생하는 추가적인 고조파 손실은 다음과 같이 추가적인 고조파 손실의 일정손실 부분과 부하의존의 합으로 표현할 수 있으며, 표 11에 나타내었다.

$$P_{HL} = P_{HL, Load} + P_{HL, No-Load} \text{ [W]} \quad (19)$$

표 11에 따르면, 그림 4의 유도전동기를 인버터로 구동하였을 경우 전부

표 10. 추가적인 고조파 손실의 부하의존 부분 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
P_{LLC} [W]	47.70	36.47	30.59	16.59	7.34	1.87
P_{LL} [W]	8.41	6.39	5.22	2.86	1.24	0.30
$P_{HL, Load}$ [W]	39.29	30.08	25.37	13.73	6.10	1.56

표 11. 추가적인 고조파 손실 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
$P_{HL, Load}$ [W]	39.29	30.08	25.37	13.73	6.10	1.56
$P_{HL, No-Load}$ [W]	5.37					
P_{HL} [W]	44.66	35.45	30.74	19.10	11.47	6.94

하에서 정현파 구동에 비해 30.74[W]의 손실이 추가로 발생한 것을 알 수 있다.

2.5 효율 계산

인버터 구동 유도전동기에서 발생하는 총 손실 크기는 다음과 같이 정현파 구동에 의한 손실과 식 (19)로 계산한 추가적인 고조파 손실의 합으로 표현할 수 있으며, 표 12에 나타내었다.

$$P_{T, inverter} = P_{T, sin} + P_{HL} [W] \quad (20)$$

여기서, $P_{T, sin}$ 은 정현파 구동에서 발생하는 모든 손실의 합이다.

표 1로부터 인버터 구동에 의해 발생하는 총 손실이 주어졌으므로 다음과 같이 효율을 계산할 수 있고, 표 13에 나타내었다.

표 12. 인버터 구동 유도전동기의 총 손실 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
$P_{T, \sin}$ [W]	209.35	175.91	156.89	119.70	95.15	81.64
P_{HL} [W]	44.66	35.45	30.74	19.10	11.47	6.94
$P_{T, inverter}$ [W]	254.01	211.36	187.63	138.80	106.62	88.57

표 13. 인버터 구동 유도전동기의 효율 계산

부하율[%]	125	110	100	75	50	25
P_2 [W]	1075.12	947.08	860.98	646.38	431.44	215.54
$P_{T, inverter}$ [W]	254.01	211.36	187.63	138.80	106.62	88.57
η [%]	80.89	81.75	82.11	82.32	80.18	70.87

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{T, inverter}} \quad (21)$$

표 13에 따르면, 그림 4의 유도전동기를 인버터로 구동할 경우 효율이 2.48[%] 감소하는 것을 알 수 있다.

표 14는 유한요소법으로 계산한 효율과 실제 시험으로 얻은 효율을 비교한 것이다. 표 14에 따르면, 유한요소법으로 계산한 결과가 실제 시험 결과와 정확히 일치하지 않는다. 그러나 입력에 대해 각 손실 항목이 차지하는 비율이 비교적 같은 양상을 띄우는 것을 알 수 있다.

표 14. 효율 계산 결과 비교 (정격 조건)

기호[단위]	유한요소법	실제 시험
1) 정현파 구동		
P_1 [W]	1017.87	1059.38
$P_{s\theta}$ [W]	65.03	66.80
P_{fe} [W]	35.62	31.84
$P_{r\theta}$ [W]	43.29	47.19
P_{fw} [W]	7.73	7.13
P_{LL} [W]	5.22	9.26
$P_{T, \sin}$ [W]	156.89	162.21
P_2 [W]	860.98	860.54
2) 인버터 구동		
$P_{HL, No-Load}$ [W]	5.37	5.06
$P_{HL, Load}$ [W]	25.37	27.62
P_{HL} [W]	30.74	32.68
$P_{T, inverter}$ [W]	187.63	194.89
η	82.11	82.15

제 3 장 측정 불확도 이론

현재 3상 유도전동기의 효율을 평가하는 국내 표준 시험방법은 KS Q IEC/TS 60034-2-1에서 명시하는 손실 분리 시험이다. 손실 분리 시험은 전동기에 대한 부하 시험 및 무부하 시험에서 여러 계측 장치들로 측정된 값을 이용하여 손실 및 효율을 계산하는 방법이다. 하지만 전동기 효율은 시험마다 변동이 있을 수 있기 때문에, 한 번의 시험 결과는 신뢰성이 다소 부족하다. 계산된 효율 값의 신뢰성을 향상시키기 위해, 변동 구간을 반영한 척도를 나타낼 수 있는 파라미터가 필요하다. 측정 불확도 이론은 측정 결과에 대한 분산 특성을 통계적인 방법을 통해 나타내며, 이 장에서는 측정 불확도에 대한 전반적인 개념과 절차에 대해 설명하였다.

3.1 기본 개념

측정 불확도는 측정결과의 신뢰도를 나타내는 정량적인 지표로서 측정결과가 갖는 타당성에 대한 의심으로부터 시작되었다. 지금까지 측정결과의 신뢰성을 표현하기 위해 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었다. 1993년 국제 표준화 기구(ISO, International Organization for Standardization)에서 측정 불확도 표현 지침서(GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)를 발행한 후, 이 지침서에 따라 측정 불확도를 산출하고 표현하는 방법이 전 세계적으로 많은 분야에 확산되어 사용되고 있다[10].

측정 불확도의 정의에 대해 수차례 수정되어 왔고, 2007년 국제측정용어집(VIM, International Vocabulary Basic and General Terms in Metrology)에서 측정 불확도에 대해 ‘사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한

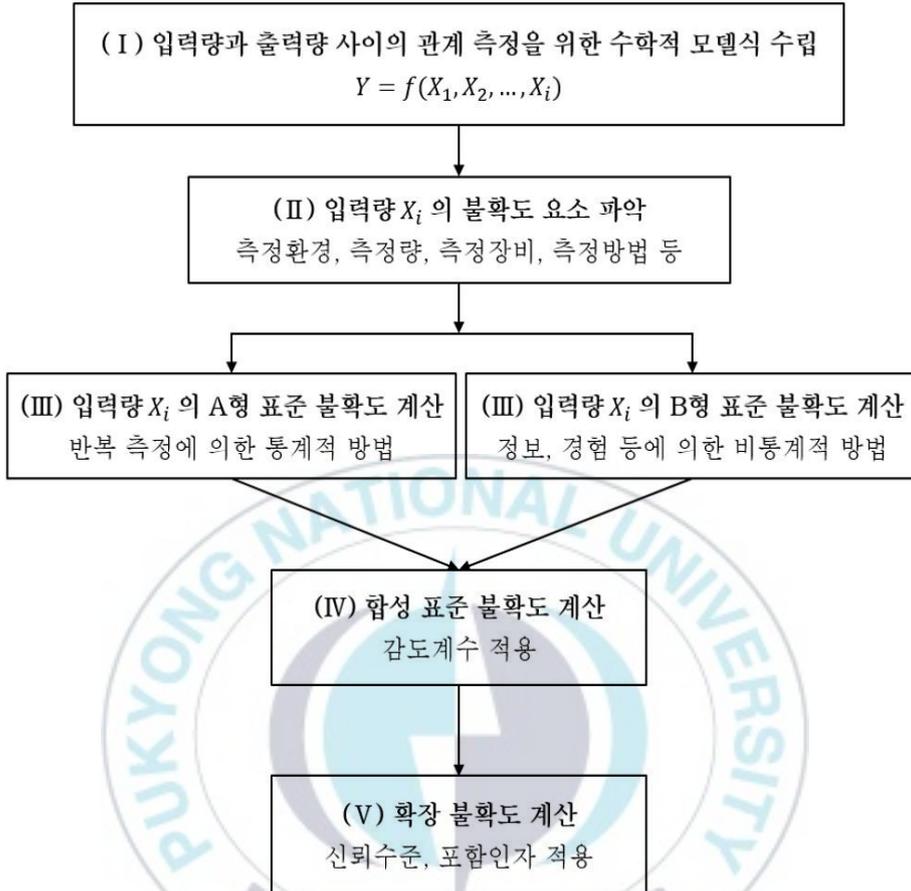


그림 8. 불확도 평가 절차

측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터'로 정의하였다.

국제적으로 인정된 GUM 지침서에서 따른 불확도 평가는 그림 8과 같이 시행된다. 불확도 평가를 위해 가장 먼저 해야 하는 것은 그림 8(I)과 같이 입력량 X_i 과 출력량 Y 사이의 관계를 측정하기 위한 수학적 모델식을 수립하는 것이다. 모델식을 수립한 이후 그림 8(II)와 같이 모델식의 출력량 Y 에 영향을 미치는 입력량 X_i 의 불확실성을 파악한다. 입력량 X_i 의 불확실성 요소는 측정값의 오차, 계측 장비의 분해능 및 정밀도, 시험 및 측정 환경, 측정 대상의 검·교정 성적서, 그리고 측정 방법 등이 있다.

입력량 X_i 의 불확실성 인자는 선정 방법에 따라 그림 8(Ⅲ)과 같이 A/B형 표준 불확도로 수치화되며, 이를 그림 8(Ⅳ)와 같이 하나의 표준 불확도로 표현한 것을 합성 표준 불확도라고 한다. 그 후, 최종적으로 그림 8(Ⅴ)와 같이 신뢰 수준 등을 고려하여 확장 불확도를 산출함으로써 결과량 Y 에 대한 측정 불확도를 평가한다.

3.2 A/B형 표준 불확도

여러 계측 장비를 이용하여 시험 결과를 측정할 때, 측정값에서 변동이 발생하는 대부분의 경우 n 회 측정으로 얻은 raw data의 산술평균을 결과량으로 결정한다. 하지만, 산술평균 단일 값이 기록한 샘플의 오차 범위를 모두 반영한다고 신뢰하기에는 어려움이 있다. 따라서 반복 측정에서 발생하는 오차는 입력량 X_i 의 불확도 인자가 되며, 이를 다음과 같이 표준 불확도로 표현한 것을 A형 표준 불확도라고 한다.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

여기서, s 는 반복 측정으로 얻은 raw data의 표준편차이며, n 은 반복 측정 횟수이다.

반면, 반복 측정으로 인한 오차에서 기인하는 것이 아닌, 입력량 X_i 의 정보나 경험 등의 비통계적 방법으로 산출하는 표준 불확도를 B형 표준 불확도라고 한다. B형 표준 불확도의 근거로는 계측 장비의 정밀도, 검·교정 성적서, 시험 환경, 시험 방법 등이 있으며, 검·교정 성적서에 표준 불확도가 명시되었다면 그 값을 B형 표준 불확도로 인용하되, 계측 장치의 정밀도가 주어진 경우 B형 표준 불확도는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

여기서, a 는 계측 장치가 갖는 정밀도의 반 범위이다.

3.3 합성 표준 불확도

측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때, 이 측정결과의 표준 불확도를 합성 표준 불확도라고 한다. 합성 표준 불확도는 다음과 같이 불확도 전파 법칙을 통해 산출할 수 있다.

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{C_i \times u(X_i)\}^2} \quad (24)$$

여기서, $u(X_i)$ 는 출력량 Y 를 결정하는 X_i 의 표준 불확도로서, A/B형 표준 불확도, 또는 합성 표준 불확도가 될 수 있다. C_i 는 입력량 X_i 에 $u(X_i)$ 만큼의 변화가 발생하였을 때, 이에 대응하여 출력량 Y 가 변화하는 정도를 나타내는 것으로 감도계수라고 하며, 다음과 같이 구해진다.

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (25)$$

3.4 유효 자유도

통계학에서 말하는 자유도란 주어진 조건에서 자유롭게 변화할 수 있는 범주의 수이다. 이와 관련하여, 측정 불확도 이론에서 유효 자유도는 표준

불확도가 출력량의 표준편차를 얼마나 잘 추정하는가를 나타내는 척도이다.

A/B형 표준 불확도의 자유도는 다음과 같이 결정된다.

$$\nu_A = n - 1 \quad (26)$$

$$\nu_B = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (27)$$

여기서, n 은 반복 측정 횟수이며, R 은 B형 표준 불확도의 상대 불확도라고 하며, 얻을 수 있는 정보를 근거로 한 과학적 판단에 의해 주관적으로 구할 수 있는 값이다. 상대 불확도는 백분율로 표현되며, 표준 불확도 또는 추정범위의 한계값이 측정값으로부터 $\pm R[\%]$ 까지 벗어날 수 있음을 의미한다. 즉, R 값이 작다는 것은 B형 표준 불확도의 신뢰성이 큰 것이다.

또한, 합성 표준 불확도의 자유도는 다음과 같이 Welch-Satterthwaite 식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{\{u_c(Y)\}^4}{\sum_{i=1}^N \frac{\{C_i \times u(X_i)\}^4}{\nu_i}} \quad (28)$$

3.5 확장 불확도

국제표준화기구(ISO)에서 발행한 측정 불확도 표현 지침서(GUM)의 기초가 된 불확도 표현 작업반의 권고안 INC-1(1980)과, 이를 승인하고 재확인해 준 국제도량형위원회(CIPM)의 권고안 1(CI-1981) 및 1(CI-1986)은 측정결과의 불확도를 정량적으로 표현하는 파라미터로서 합성 표준 불확도의 사용을 추천하였다[11].

하지만 상업이나 산업 분야의 특정한 경우, 또는 규제에 적용할 경우에는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의해 줄 수 있는 불확도의 척도가 필요하다. 이러한 요구조건을 충족시키는 불확도의 추가적인 척도를 확장 불확도라고 한다. 따라서 최종적인 불확도 평가는 확장 불확도를 다음과 같이 산출함으로써 가능하다.

$$U = k \times u_c(Y) \quad (29)$$

여기서, k 는 포함인자라고 하며, 표 1에 나타낸 정규 t-분포표에서 그 구간에 대해 요구되는 포함확률 또는 신뢰 수준에 따라 결과량에 대한 합성 표준 불확도의 유효 자유도를 통해 결정된다. 각 표준 불확도 구성요소의 자유도를 결합시킨 유효 자유도가 실제로 매우 작아 합성 표준 불확도 $u_c(Y)$ 의 표준편차가 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정할 경우, 포함인자 k 의 값을 2로 사용할 수 있다. 반면, 유효 자유도가 10 이상일 경우, 포함인자 k 를 찾기 위한 정규 t-분포표에서 유효 자유도를 ∞ 로 취급이 가능하다.

확장 불확도를 이용한 최종적인 불확도 평가는 다음과 같다.

$$\text{결과값} \pm \text{확장 불확도 (단, 신뢰수준 } \alpha[\%], k=\beta) \quad (30)$$

표 15. 정규 t-분포표

자유도 ν	신뢰수준 α [%]					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.70	3.20
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.6660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

제 4 장 유한요소법을 이용한 인버터 구동

3상 유도전동기의 효율 불확도 평가

3장에서는 측정 불확도 평가 절차에 대해 소개하였다. 이를 효율 불확도 평가에 적용할 경우 가장 먼저 고려해야하는 것은 손실과 효율을 계산하기 위한 수학적 모델식을 수립하는 것으로 2장에서 이용된 식 (2)~(21)에 해당한다. 다음으로 고려해야하는 것은 모델식 각각에 대한 입력량 X_i 를 선정하고, 이에 대한 불확실성 요소를 파악하여 A형 및 B형 표준 불확도를 산출해야한다. 입력량 X_i 의 A형 및 B형 표준 불확도가 산출된 이후에는 각 손실에 대해 합성 표준 불확도를 계산하고, 마지막으로 효율에 대해서 확장 불확도를 도출함으로써 효율 불확도를 평가한다.

그러나 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 인버터 구동 유도전동기의 효율을 계산하였으므로 실제 시험과는 다른 방법으로 A형 및 B형 표준 불확도를 산출하여야 한다. 이 장에서는 유한요소법에서 입력량 X_i 의 표준 불확도를 산출하는 방법을 제시하고 그에 따른 효율 불확도를 평가한다.

4.1 유한요소법에서의 측정 불확도 이론 적용

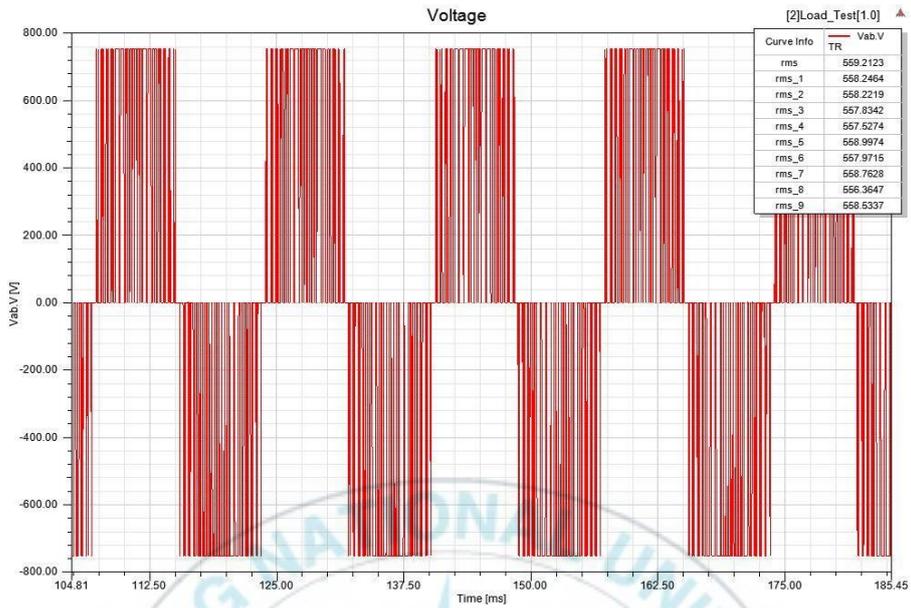
본 논문에서는 인버터로 구동되는 유도전동기의 효율을 유한요소법을 이용하여 실제 시험과 동일한 절차를 바탕으로 계산하였다. 실제 시험에서는 n 회의 반복 측정을 통해 A형 표준 불확도, 측정 장비의 정밀도 등을 통해서 B형 표준 불확도를 계산하고 주어진 모델식을 바탕으로 합성 표준 불확도를 산출하였다. 즉, 임의의 모델식에 대한 표준 불확도를 산출하기 위해서는 A/B형 표준 불확도를 반드시 얻어야만 한다. 이와 관련하여, 유한요소법에서도 실제 시험과 같이 입력량의 불확실성만 얻을 수 있다면, 각 손

실에 대한 합성 표준 불확도의 산출과 확장 불확도를 이용한 효율 불확도 평가가 가능하다.

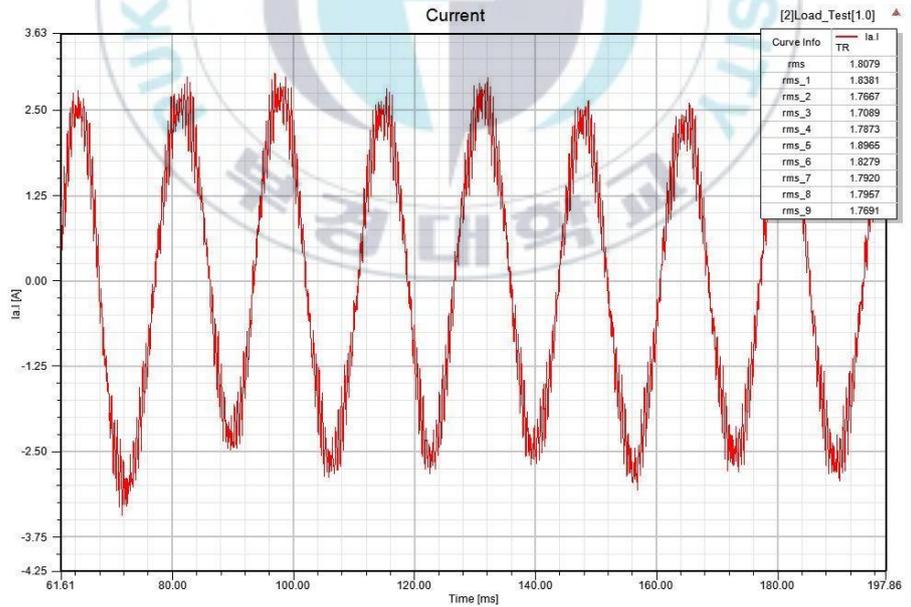
실제 시험을 통한 효율 불확도 평가와 유한요소법을 이용한 효율 불확도 평가의 차이는 효율 및 각 손실의 입력량 X_i 에 대한 A/B형 표준 불확도의 산출 방법이다. 실제 시험에서 토크, 입력, 전류, 속도 등의 A형 표준 불확도는 각 계측 장비를 사용하여 n 회의 반복 측정으로 얻은 raw data의 표준편차로부터 계산하며, B형 표준 불확도는 계측 장비의 정밀도로부터 구할 수 있다. 그러나 유한요소법의 경우, 계측 장비를 사용하는 것이 아니므로 실제 시험과 다른 방법으로 A/B형 표준 불확도를 산출해야 한다.

그림 9은 인버터 구동 유도전동기의 유한요소 해석으로 얻은 전압 및 전류 파형이다. 유한요소법에서의 A형 표준 불확도는 그림 9의 파형에서 서로 다른 임의의 n 개의 주기를 지정하여 실효값 또는 평균값을 계산하여 얻은 raw data로부터 산출할 수 있다. 표 16와 표 17은 각각 정현파 구동과 인버터 구동에서 해석한 결과의 raw data에 대한 각 입력량의 A형 표준 불확도이다. 표 16, 17과 같이 토크, 입력, 전류, 속도, 전압 등에 대한 A형 표준 불확도는 산출할 수 있으나, 온도 및 저항은 해석 전에 설정되는 값이므로 일정한 상수로 고려하였다. 반면, 유한요소법은 설계된 파라미터를 기반으로 정확한 계산에 의해 수행된다. 따라서 유한요소법에서의 B형 표준 불확도는 0으로 간주할 수 있다.

인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도 평가는 그림 2의 절차와 동일하게 진행된다. 표 16으로부터 정현파 구동에서 발생하는 손실의 표준 불확도를 계산하고, 표 17로부터 인버터 구동에서 발생하는 추가적인 고조파 손실의 표준 불확도를 계산하여 최종적으로 인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도를 평가한다.



(a) Voltage



(b) Current

그림 9. 인버터 구동 유도전동기의 유한요소 해석 결과 파형

표 16. 각 입력량의 A형 표준 불확도 (정현과 구동)

기호[단위]	평균값	표준편차	A형 표준 불확도	자유도
1) 부하 곡선 시험				
T [Nm]	4.79	0.0003	0.0001	9
P_1 [W]	1017.87	0.9483	0.2999	9
I [A]	1.77	0.0011	0.0004	9
N [rpm]	1715.13	0.1061	0.0335	9
V_1 [V]	459.99	0.0022	0.0007	9
2) 무부하 곡선 시험				
V_0 [V]	459.99	0.0022	0.0007	9
I_0 [A]	1.23	0.0004	0.0001	9
P_0 [W]	77.61	0.4143	0.1310	9
3) 저항, 온도 등은 상수로 취급.				

표 17. 각 입력량의 A형 표준 불확도 (인버터 구동)

기호[단위]	평균값	표준편차	A형 표준 불확도	자유도
1) 부하 곡선 시험				
T [Nm]	4.80	0.1551	0.0491	9
P_1 [W]	1047.75	32.0461	3.1623	9
I [A]	1.79	0.0204	0.0065	9
N [rpm]	1715.58	3.4154	1.0800	9
V_1 [V]	557.73	0.6811	0.2154	9
2) 무부하 곡선 시험				
V_0 [V]	557.62	0.7103	0.2246	9
I_0 [A]	1.25	0.0285	0.0090	9
P_0 [W]	84.36	0.0000	0.0000	9
3) 저항, 온도 등은 상수로 취급.				

4.2 정현파 구동 유도전동기의 손실 불확도

4.2.1 풍·마찰손과 철손의 불확도

풍·마찰손은 무부하 시험으로 얻은 일정손실 곡선으로부터 계산한다. 식 (2)로부터 다음과 같이 일정손실의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 표 18에 일정손실의 불확도 총괄표를 나타내었다.

$$u_c(P_k) = \sqrt{\{C_{P_0}u_c(P_0)\}^2 + \{C_{I_0}u_c(I_0)\}^2} \quad (31)$$

$$(i) C_{P_0} = \frac{\partial(P_k)}{\partial P_0} = -3 \times I_0^2 \times R_0 \times \left(\frac{\theta_{w0} + K}{\theta_0 + K} \right) \quad (31.1)$$

$$(ii) C_{I_0} = \frac{\partial(P_k)}{\partial I_0} = -6 \times I_0 \times R_0 \times \left(\frac{\theta_{w0} + K}{\theta_0 + K} \right) \quad (31.2)$$

2.3.1절에서 풍·마찰손은 일정손실 곡선의 선형회귀 분석으로 계산하였다. 따라서 풍·마찰손의 표준 불확도는 수학적 모델식에 의한 합성 표준 불확도가 아닌, 다음과 같이 최소 제곱선 이론을 적용하여 산출할 수 있다.

표 18. 일정손실의 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_0 [W]	77.61	0.1310	1.0000	9
I_0 [A]	1.23	0.0001	-49.0913	9
P_k [W]	47.50	0.1311		9

$$u_c(Y) = s \times \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{S_{xx}}} \quad (32)$$

여기서, s 는 추정치의 표준오차이며, S_{xx} 는 모집단의 분산, \bar{X} 는 X_i 의 산술평균, 그리고 n 은 시험 지점 개수이다.

$$(i) \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - (aX_i + b)^2}{n-2}} \quad (32.1)$$

$$(ii) \quad S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (32.2)$$

$$(iii) \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (32.3)$$

풍·마찰손은 일정손실 곡선에서 영전압까지 직선을 연장하여 도달한 y 절편 값이므로, 다음과 같이 식 (32)에서 X_i 에 0을 대입하여 풍·마찰손의 표준 불확도를 추정할 수 있다.

$$u_c(P_{fw}) = s \times \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(0 - \bar{X})^2}{S_{xx}}} = 0.0319 \quad (33)$$

풍·마찰손의 표준 불확도가 구해지면 다음과 같이 철손의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있다.

$$u_c(P_{fe}) = \sqrt{u_c(P_k)^2 - u_c(P_{fw})^2} = 0.1272 \quad (34)$$

또한, 일정손실은 풍·마찰손과 철손의 합이므로, 풍·마찰손과 철손의 유효 자유도는 일정손실의 유효 자유도와 같다.

4.2.2 표류부하손의 불확도

2.3.3절에서 표류부하손은 잔류손실의 평활화로부터 계산하였다. 따라서 표류부하손의 표준 불확도는 잔류손실의 표준 불확도와 같다고 가정할 수 있다. 식 (7)로부터 다음과 같이 잔류손실의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있고, 표 19에 잔류손실의 불확도 총괄표를 나타내었다.

$$u_c(P_{Lr}) = \sqrt{\frac{\{C_{P_1}u_c(P_1)\}^2 + \{C_{P_2}u_c(P_2)\}^2 + \{C_{P_s}u_c(P_s)\}^2}{+ \{C_{P_{fe}}u_c(P_{fe})\}^2 + \{C_{P_r}u_c(P_r)\}^2 + \{C_{P_{fw}}u_c(P_{fw})\}^2}} \quad (35)$$

표 19. 잔류손실의 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_1 [W]	1017.87	0.2999	1	9.00
P_2 [W]	860.09	0.0235	-1	17.99
P_s [W]	64.85	0.0260	-1	9.00
P_{fe} [W]	35.62	0.1272	-1	9.03
P_r [W]	43.25	0.0230	-1	19.93
P_{fw} [W]	7.73	0.0319	-1	9.03
P_{Lr} [W]	6.33	0.3300		12.78

$$(i) C_{P_1} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_1} = 1 \quad (35.1)$$

$$(ii) C_{P_2} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_2} = -1 \quad (35.2)$$

$$(iii) C_{P_s} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_s} = -1 \quad (35.3)$$

$$(iv) C_{P_{fe}} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_{fe}} = -1 \quad (35.4)$$

$$(v) C_{P_r} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_r} = -1 \quad (35.5)$$

$$(vi) C_{P_{fw}} = \frac{\partial(P_{Lr})}{\partial P_{fw}} = -1 \quad (35.6)$$

4.2.3 온도보정 동손의 불확도

식 (13)로부터 다음과 같이 25[°c]로 보정된 고정자 동손의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 20에 나타내었다.

$$u_c(P_{s\theta}) = \sqrt{\{C_I u_c(I)\}^2} \quad (36)$$

$$(i) C_I = \frac{\partial(P_{s\theta})}{\partial I} = 6 \times I \times R_1 \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \quad (36.1)$$

또한, 식 (14)로부터 다음과 같이 25[°C]로 보정된 회전자 동손의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 21에 나타내었다.

$$u_c(P_{r\theta}) = \sqrt{\{C_{P_1}u_c(P_1)\}^2 + \{C_{P_{s\theta}}u_c(P_{s\theta})\}^2 + \{C_{P_{fe}}u_c(P_{fe})\}^2 + \{C_Nu_c(N)\}^2} \quad (37)$$

$$(i) C_{P_1} = \frac{\partial(P_{r\theta})}{\partial P_1} = \left(\frac{N_s - N}{N_s}\right) \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \quad (37.1)$$

$$(ii) C_{P_{s\theta}} = \frac{\partial(P_{r\theta})}{\partial P_{s\theta}} = -\left(\frac{N_s - N}{N_s}\right) \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \quad (37.2)$$

$$(iii) C_{P_{fe}} = \frac{\partial(P_{r\theta})}{\partial P_{fe}} = -\left(\frac{N_s - N}{N_s}\right) \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \quad (37.3)$$

$$(iv) C_N = \frac{\partial(P_{r\theta})}{\partial P_{fe}} = -\frac{1}{N_s} \times (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times \left(1 + \frac{25^\circ\text{C} - \theta_c}{\theta_w + K}\right) \quad (37.4)$$

표 20. 25[°C]로 보정된 고정자 동손의 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
I [A]	1.77	0.0004	73.1863	9
R_1 [Ω]	13.78	0.0021	4.6984	9
$P_{s\theta}$ [W]	65.03	0.0278		11.64

표 21. 25[°c]로 보정된 회전자 동손의 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_1 [W]	1017.87	0.2999	0.0472	9
$P_{s\theta}$ [W]	65.03	0.0278	-0.0472	11.64
P_{fe} [W]	35.62	0.1272	-0.0472	9
N [rpm]	1715.13	0.0335	-0.5101	9
$P_{r\theta}$ [W]	43.29	0.0230		19.95

따라서, 정현과 구동 유도전동기에서 기본과 성분에 의해 발생하는 총 손실의 표준 불확도는 다음과 같이 구해진다.

$$u_c(P_{T, \sin}) = \sqrt{\{C_{P_{s\theta}} u_c(P_{s\theta})\}^2 + \{C_{P_{fe}} u_c(P_{fe})\}^2 + \{C_{P_{r\theta}} u_c(P_{r\theta})\}^2 + \{C_{P_{fw}} u_c(P_{fw})\}^2 + \{C_{P_{LL}} u_c(P_{LL})\}^2} \quad (38)$$

4.3 추가적인 고조파 손실 불확도

2.4절에 따르면, 인버터 구동으로 발생하는 추가적인 고조파 손실은 일정 부분과 부하의존 부분으로 나눌 수 있으며, 각각은 무부하 시험에서의 일정 손실과 부하시험에서의 표류부하손으로부터 구할 수 있다.

인버터 구동에서 발생하는 일정손실의 불확도는 4.2.1절과 동일한 절차로 구해진다. 또한, 식 (16)으로부터 다음과 같이 추가적인 고조파 손실의 일정 부분에 대한 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 22에 나타내었다.

$$u_c(P_{HL, No-Load}) = \sqrt{\{C_{P_{kC}} u_c(P_{kC})\}^2 + \{C_{P_k} u_c(P_k)\}^2} \quad (39)$$

표 22. 추가적인 고조파 손실의 일정 부분에 대한 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_{kC}	52.87	0.4523	1	9
P_k	47.50	0.1311	-1	9
$P_{HL, No-Load}$	5.37	0.4709		10.50

$$(i) C_{P_{kC}} = \frac{\partial(P_{HL, No-Load})}{\partial P_{kC}} = 1 \quad (39.1)$$

$$(ii) C_{P_k} = \frac{\partial(P_{HL, No-Load})}{\partial P_k} = -1 \quad (39.1)$$

인버터 구동에서 발생하는 표류부하손의 불확도는 4.2.2절과 동일한 절차로 구해진다. 또한, 식 (17)로부터 다음과 같이 추가적인 고조파 손실의 부하의존 부분에 대한 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 23에 나타내었다.

$$u_c(P_{HL, Load}) = \sqrt{\{C_{P_{LLC}} u_c(P_{LLC})\}^2 + \{C_{P_{LL}} u_c(P_{LL})\}^2} \quad (40)$$

$$(i) C_{P_{LLC}} = \frac{\partial(P_{HL, Load})}{\partial P_{LLC}} = 1 \quad (40.1)$$

$$(ii) C_{P_{LL}} = \frac{\partial(P_{HL, Load})}{\partial P_{LL}} = -1 \quad (40.1)$$

표 23. 추가적인 고조파 손실의 부하의존 부분에 대한 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_{LLC}	30.59	9.3799	1	11.36
P_{LL}	5.22	0.3300	-1	12.78
$P_{HL, Load}$	25.37	9.3858		11.39

표 24. 추가적인 고조파 손실의 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
$P_{HL, No-Load}$	5.37	0.4709	0.4709	10.50
$P_{HL, Load}$	25.37	9.3858	9.3858	11.39
P_{HL}	30.74	9.3976		11.45

추가적인 고조파 손실의 합성 표준 불확도는 식 (19)로부터 다음과 같이 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 24에 나타내었다.

$$u_c(P_{HL}) = \sqrt{\{C_{P_{HL, No-Load}} u_c(P_{HL, No-Load})\}^2 + \{C_{P_{HL, Load}} u_c(P_{HL, Load})\}^2} \quad (41)$$

$$(i) C_{P_{HL, No-Load}} = \frac{\partial(P_{HL})}{\partial P_{HL, No-Load}} = 1 \quad (41.1)$$

$$(ii) C_{P_{HL, Load}} = \frac{\partial(P_{HL})}{\partial P_{HL, Load}} = 1 \quad (41.1)$$

4.4 효율 불확도 평가

식(20)로부터 다음과 같이 인버터 구동 유도전동기에서 발생하는 총 손실 크기의 합성 표준 불확도를 산출할 수 있으며, 이에 대한 불확도 총괄표를 표 25에 나타내었다.

표 25. 인버터 구동 유도전동기의 총 손실 크기에 대한 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
$P_{T, \sin}$ [W]	156.89	0.001	1	0.00
P_{HL} [W]	30.74	9.398	1	11.45
$P_{T, inverter}$ [W]	187.63	9.398		11.45

$$u_c(P_{T, inverter}) = \sqrt{\{C_{P_{T, \sin}} u_c(P_{T, \sin})\}^2 + \{C_{P_{HL}} u_c(P_{HL})\}^2} \quad (42)$$

$$(i) C_{P_{T, \sin}} = \frac{\partial(P_{T, inverter})}{\partial P_{T, \sin}} = 1 \quad (42.1)$$

$$(ii) C_{P_{HL}} = \frac{\partial(P_{T, inverter})}{\partial P_{HL}} = 1 \quad (42.1)$$

마지막으로, 인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도는 식 (21)로부터 다음과 같이 산출할 수 있으며, 표 26에 불확도 총괄표를 나타내었다.

$$u_c(\eta) = \sqrt{\{C_{P_2} u_c(P_2)\}^2 + \{C_{P_{T, inverter}} u_c(P_{T, inverter})\}^2} \quad (43)$$

$$(i) C_{P_2} = \frac{\partial(\eta)}{\partial P_2} = \frac{P_{T, inverter}}{(P_2 + P_{T, inverter})^2} \quad (43.1)$$

$$(ii) C_{P_{T, inverter}} = \frac{\partial(\eta)}{\partial P_{T, inverter}} = -\frac{P_2}{(P_2 + P_{T, inverter})^2} \quad (43.1)$$

표 26. 인버터 구동 유도전동기의 효율 불확도 총괄표

항목	추정값	합성 표준 불확도	감도계수	자유도
P_2 [W]	862.63	0.0235	0.0008	9.07
$P_{T, inverter}$ [W]	187.63	9.3976	-0.0008	11.45
η [%]	82.11	0.0073		11.45

측정결과는 반드시 확장 불확도가 함께 명시되어야 한다. 효율의 유효 자유도가 11.45 이므로 ∞ 로 취급하여 표 15에서 신뢰수준 95[%]에 대한 포함인자를 2로 찾을 수 있다. 따라서 효율의 확장 불확도는 다음과 같이 추정된다.

$$U = 2 \times u_c(\eta) = 0.0146 \quad (44)$$

본 논문에서 계산한 효율은 82.11[%]이고, 확장 불확도는 0.01[%]이므로 최종 효율을 다음과 같이 표현할 수 있다. 이는 효율 계산을 위해 100번 반복 해석했을 때, 95번의 결과가 82.10~82.12[%] 사이에 존재한다는 의미이다.

$$\eta = 82.11 \pm 0.01 \quad (\text{단, 신뢰수준 } 95\%, k=2) \quad (45)$$

제 5 장 결 론

본 논문에서는 인버터 구동 3상 유도전동기의 효율 불확도를 유한요소법으로 간단하게 평가하는 방법을 제시하였다. 3상 유도전동기 1대를 선정하여 유한요소법으로 이를 해석하고, 해석 결과를 바탕으로 IEC 60034-2-3에 따라 효율을 계산하였다. 그 후, 측정 불확도 이론을 적용하여 계산된 효율의 불확도를 평가하였다.

평가 결과, 정현파 구동과 인버터 구동 각각의 효율 불확도를 $\pm 0.07\%$, $\pm 0.01\%$ 로 평가하였다. 정현파 구동에 비해 인버터 구동에서 입력량들의 표준 불확도가 더 크에도 불구하고, 최종적인 효율 불확도는 더 낮게 평가되었다. 이는 효율을 계산하는 모델식의 차이로 보인다. IEC 60034-2-1에 따르면, 정현파 구동 시의 효율은 측정된 입력에서 손실을 빼서 효율을 계산한다. 반면, IEC 60034-2-3에서 인버터 구동 시의 최종 효율은 기계적 출력에서 손실을 더해서 효율을 계산한다. 손실이 모델식의 분모에 존재하여 효율에 대한 손실의 감도계수가 낮아지고, 그에 따라 효율의 합성 표준 불확도가 낮게 계산되었다.

본 논문에서 제시한 방법으로 유한요소법을 이용한 불확도 평가가 가능하였으며, 이를 통해 전동기 설계 및 제작 과정에서 더욱 신뢰적인 평가 지표로 활용될 가능성을 확인하였다.

본 논문에서 B형 표준 불확도는 0으로 간주하였다. 그러나, B형 표준 불확도는 분명히 존재하는 값이며 본 논문의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 이를 적용하기 위한 방법을 고려할 필요가 있다. 또한, Multi-Physics 해석을 통해 평가 과정에서 상수로 취급되었던 저항과 온도에 대한 A/B형 표준 불확도의 산출 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] ABB, Global MEPS: Energy efficiency regulations for low voltage motors around the world.
- [2] 산업통상자원부고시, “제2015-28호, 효율관리기자재 운용규정”, 2015.
- [3] KS C IEC/TS 60034-2-1, “회전기기 - 제2-1부: 손실 및 효율을 측정하는 표준 시험방법 (건인용 모터 제외), 2014.
- [4] 전희득, 박한석, 김대경, 우경일, “0.75[kW]급 삼상유도전동기 효율의 불확도 평가에 관한 연구”, 전기학회논문지, 64(4), pp. 653-659, 2015.
- [5] IEC/TS 60034-2-3, “Rotating electrical machines - Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors, 2013.
- [6] 정광우, “유도형 AC 모터 제어기술 및 구동장치에 관한 연구”, 철도전문대학교 논문집, Vol. 15, 1999.
- [7] 전차승, 김병택, 권병일, 박승찬, “사구효과를 고려한 삼상 농형유도전동기의 손실분포 및 온도상승해석”, 전기학회논문지, Vol. 47, No. 10, pp. 1611-1618, 1998.
- [8] 박준석, “고효율 유도전동기의 효율평가를 위한 손실측정방법에 관한

연구”, 중앙대학교, 2010.

[9] Paul W. Franklin, “Advanced theory and design of rotating electrical machinery”, University of Missouri, 1976.

[10] ISO, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)”, 1995.

[11] 한국표준과학연구원, “측정불확도 표현 지침”, 2010.



감 사 의 글

짧지만 길었던 학·석사 연계과정을 마무리하며, 지금의 제가 있기까지 그동안 도움을 주셨던 분들에게 고마움을 전하고자 합니다. 먼저 욕심만 앞서고 많이 부족했던 제자가 석사과정까지 무사히 마칠 수 있도록 물심양면으로 지도해주신 우경일 교수님께 깊은 감사드립니다. 교수님께서 무엇보다 강조하신 지성인으로서의 자세를 항상 마음 깊이 새기며 살겠습니다.

바쁘신 와중에도 논문 심사를 해주신 박한석 교수님과 문상필 교수님께 감사드립니다. 그리고 제게 가르침을 아끼지 않으셨던 전기공학과 여러 교수님들께도 감사드립니다. 또한, 연구 활동에 많은 도움을 주신 전희득 선배님과 대학원 생활동안 제게 큰 힘이 되어주신 장용해 선배님께 감사드립니다.

제가 연구실 생활에 적응할 수 있도록 많은 도움을 주신 전기기기-에너지 변환 연구실 선배님들과 대학원 생활동안 제가 기쁠 때나 슬플 때나 함께 해주던 지세진 선배님과 선재, 그리고 많이 신경 써주지 못 해 미안한 후배들 정욱, 기영, 유나, 정수, 부연, 언재, 하영에게 고마움을 전합니다. 여러분들이 있어 외로운 대학원 생활을 보람차게 보낼 수 있었습니다. 여러분의 무궁무진한 잠재력을 보여줄 날이 얼마 남지 않음을 믿어 의심치 않습니다.

또한, 10년이 넘는 세월을 함께 지내온 나의 친구 윤수와 철없는 막내를 새내기 때부터 지켜봐 온 현승이 형, 광용이 형, 원정이 누나, 우술이 형, 경현이 형, 하은 모두에게 감사드립니다. 하나뿐인 내 동생 호주에게 앞으로도 좋은 일만 있기를 빌겠습니다.

끝으로 욕심만 많은 장남을 항상 걱정하시고 뒷바라지 해주시는 부모님께 정말 죄송하고 감사드립니다. 살면서 그동안 받은 은혜 다 갚지 못할까봐 걱정입니다. 앞으로도 부모님의 무한한 사랑에 보답할 수 있도록 열심히 살겠습니다.

2017년 12월
이 호 현 올림