

## 플랜트에서 운전 중인 유도전동기의 효율 계산

\*박형준° \*정찬수 \*\*이해수 \*\*\*이상철  
\*숭실대학교 \*\*경기공과대 \*\*\*동서서울대

### Efficiency Calculation of Operating Induction Motors in Plant

Park Hyung-joon, Chung Chan-soo, Lee Hae-soo, Lee Sang-chul  
Soong-sil Univ., Kyonggi Institute of Technology, Dong seoul college

**Abstract** - This paper is about the energy efficiency calculation of operating electric motors in production facilities. The most important 1st step to efficient operation of plants is the evaluation of the energy efficiency of the production facilities in that plant. Through this procedure, we can decide that which facilities i.e. induction motors, in this paper, should do maintenance or not. There are mainly 2 types of energy which are used in production facilities, the one is electric energy and the other is heat energy but in order to make calculation simple, in this paper, we are only focusing on electric energy, efficiency and energy loss of the electric motors under operation conditions. As a case study, we chose electric motors in a certain process in a production facilities, and calculated efficiency and loss by using measured data.

다르다. 즉, 운전 시에는 각 조건에 따라서 정격과는 다른 전압, 전류, 용량으로 운전하게 되므로 반드시 전동기의 운전 중에 전압, 전류, 역률 등을 측정하여 해당 전동기의 운전시의 용량과 설비이용률 등을 바탕으로 운전효율을 계산해야한다. 설비이용률을 통상 부하율이라고 부르기도 하며 효율특성곡선의 예를 <그림 1>에서 보인다. 이와 같은 효율특성곡선은 전동기의 용량별, 정격 효율별로 약간의 차이가 있으나 유사한 모양을 갖는다.

## 1. 서 론

초고유가시대를 맞이하여 에너지 자원에 대한 관심은 산업계의 중요한 화두 중 하나이다. 이에 따라 최근 들어 신재생에너지와 고효율기기 등 비화석연료와 에너지 절감방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이런 제반 에너지관련 화두 중 가장 기본이라고 할 수 있는 현재 상태의 에너지효율 계산에 대하여 논한다. 즉, 에너지의 주요 수요처에서는 사용하고 있는 기기의 효율을 정확히 모른 채 사용하는 경우가 빈번히 존재한다. 따라서 현재 사용 중인 설비의 효율을 파악한다면 설비의 유지, 보수, 교체 시에 유용한 정보로 사용할 수 있을 것이다. 특히 본 논문에서는 에너지 다소비 분야인 제조업의 생산설비 중에서 가장 빈번히 사용되는 전기기기인 전동기의 에너지효율을 설비이용률을 중심으로 산정하여 이를 적용하였다.

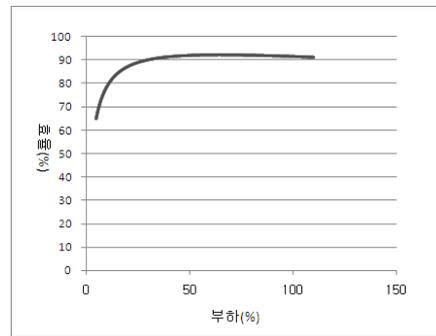
## 2. 본 론

### 2.1 유도전동기의 효율

에너지효율을 계산하기 위해서 우선, 대상 플랜트 또는 대상설비가 필요한 화두 중 하나이다. 이에 따라 최근 들어 신재생에너지와 고효율기기 등 비화석연료와 에너지 절감방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이런 제반 에너지관련 화두 중 가장 기본이라고 할 수 있는 현재 상태의 에너지효율 계산에 대하여 논한다. 즉, 에너지의 주요 수요처에서는 사용하고 있는 기기의 효율을 정확히 모른 채 사용하는 경우가 빈번히 존재한다. 따라서 현재 사용 중인 설비의 효율을 파악한다면 설비의 유지, 보수, 교체 시에 유용한 정보로 사용할 수 있을 것이다. 특히 본 논문에서는 에너지 다소비 분야인 제조업의 생산설비 중에서 가장 빈번히 사용되는 전기기기인 전동기의 에너지효율을 설비이용률을 중심으로 산정하여 이를 적용하였다.

에너지효율을 계산하기 위해서 우선, 대상 플랜트 또는 대상설비가 필요한 화두 중 하나이다. 이에 따라 최근 들어 신재생에너지와 고효율기기 등 비화석연료와 에너지 절감방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이런 제반 에너지관련 화두 중 가장 기본이라고 할 수 있는 현재 상태의 에너지효율 계산에 대하여 논한다. 즉, 에너지의 주요 수요처에서는 사용하고 있는 기기의 효율을 정확히 모른 채 사용하는 경우가 빈번히 존재한다. 따라서 현재 사용 중인 설비의 효율을 파악한다면 설비의 유지, 보수, 교체 시에 유용한 정보로 사용할 수 있을 것이다. 특히 본 논문에서는 에너지 다소비 분야인 제조업의 생산설비 중에서 가장 빈번히 사용되는 전기기기인 전동기의 에너지효율을 설비이용률을 중심으로 산정하여 이를 적용하였다.

전동기의 효율은 다양한 방법으로 측정이 가능하다. 정격 전압, 전류, 용량으로 계산이 가능한데, 이는 전동기의 효율운전여부와 관계없이 전동기의 정격을 파악함으로써 가능하다. 그러나, 실제 운전시의 효율은



<그림 1> 전동기 효율특성곡선의 예

일반적인 생산설비에서는 생산품이 변경되지 않는 한 전동기는 비교적 장시간 일정한 속도로 연속 운전을 한다. 따라서 정상 운전 상태에서 해당 전동기에는 일정한 전압, 전류가 유지된다고 볼 수 있다. 그런데, 전동기의 효율은 전동기가 자기용량대비 운전용량에 따라 크게 다르므로 이에 대한 고려가 필요하다. 이를 설비이용률 또는 부하율이라고 부른다. 다음 식 (1)에서 그 정의를 보인다.

$$\text{설비이용률} = \frac{\text{실제사용용량}}{\text{정격용량}} \times 100 \quad (1)$$

전동기는 일반적으로 전(Full)부하의 70~80[%]에서 최대 효율은 갖는 것으로 알려져 있는데 설비이용률 즉 부하율이 약 70[%]이하 일 때 설비이용률이 작으면 작을수록 효율은 저하되며 부하율 50[%]이하에서 효율이 저하되는 특성을 갖는다. 또한 제작 사양에 따라서 다소 다른 경우도 있지만, 전부하 일 때의 효율은 최대효율 일 때보다 약간 작은 경향이 있다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 전부하일 때의 효율을 전동기 운전현장 또는 관리 데이터에 의해 파악하고, 이를 바탕으로 다시 각 전동기의 실제 운전 부하용량일 때의 효율과 손실전력을 계산하였다.

효율계산을 위해서는 전압불평형률이 함께 고려될 수도 있다. 왜냐하면, 전동기의 온도와 손실의 증가율은 전압불평형률의 자승에 비례하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 따라서 현장 전압 전류 측정 데이터로 전동기의 전압불평형률을 계산하여 부하율에 따른 효율과 함께 고려하여 주어야한다. 전압불평형률은 여러 가지로 정의되는데 대표적으로는 정상 전압에 대한 역상전압의 비율로 정의된다. 간단하게는 평균 상전압(또는 선간전압)에 대한 최대 전압편차로 정의되기도 한다. 이를 식으로 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\text{전압불평형률} = \quad (2)$$

$$\frac{\text{평균 상(선간)전압으로부터 최대 전압편차}}{\text{평균 상(선간)전압}} \times 100$$

이와 유사하게 전류불평형률은 다음 식 (3)으로 표현된다.

$$\text{전류 불평형률} = \frac{\text{평균 상전류로부터 최대 전압편차}}{\text{평균 상전류}} \times 100 \quad (3)$$

NEMA 등의 규격에서 전압불평형률은 1[%]를 넘지 않는 것이 권고되며, 5[%]이상일 때는 전동기를 사용하지 말 것을 권고하고 있다. 또한 전압불평형률이 1[%]이상 일 때는 설비보전 등을 통해서 그 값을 저감시키는 것을 추천하고 있다. 또한, 식(2)와 유사하게 측정된 3상전류 값을 적용하여 식(3)과 같이 전류불평형률을 계산할 수 있다. 일반적으로 전류불평형률은 전압불평형률에 비해 6에서 10배 정도 큰 것으로 알려져 있다. 이미 언급한바와 같이 전압불평형률에 의한 손실증가는 전압불평형률의 자승에 비례하는 것으로 알려져 있는데 간략하게 다음 식 (4)로 표현 할 수 있다.

$$LI = K(VUF)^2 \quad (4)$$

LI : 손실증가[%]  
K : 계수  
VUF : 전압불평형률[%]

예를 들어 K=2이고, 전압불평형률이 2[%]인 경우 퍼센트 손실증가는 8[%]가 된다. 즉, 이 경우에 이미 부하율에 따른 기존의 손실에 추가적으로 전압불평형에 의한 8[%]의 손실증가효과가 있는 것으로 판단 할 수 있다. 그러나, 전압불평형률이 4, 5[%]이상으로 커지는 경우에는 잘 맞지 않으며 계수 K를 작은 값으로 바꾸어 주어야한다. 물론 이와같이 전압불평형률이 수[%]정도로 큰 경우는 전력품질이 매우 양호한 경우이며 전력설비 전반에 걸쳐 점검, 진단과 보전이 반드시 필요하다.

## 2.2 효율 계산 사례

이상에서처럼 본 논문은 운전 중인 생산설비의 전력에너지의 효율에 초점을 맞추고 있으므로 에너지효율을 계산할 때 운전 중인 전동기만을 계측하여 계산한다. 효율의 계산에는 설비이용률에 따른 손실과 전압불평형률에 따른 손실이 함께 고려되어 효율을 계산하였다. 다음의 표 1은 어떤 한 생산설비의 공정에서 운전 중인 전동기들의 정격, 측정값과 계산 값을 보여준다. 다수의 전동기가 설치되어 있으나 측정시점에서 실제 운전 중인 전동기만을 측정하였고, 편의상 소용량 전동기는 전체 효율에 미치는 효과가 미미하여 제외하였다.

〈표 1〉 전동기의 측정값 및 계산값

| 번호 | 정 격        |           |           |                  | 측정값<br>(3상평균) |           | 계 산 값             |                   |                  |                  |                 |
|----|------------|-----------|-----------|------------------|---------------|-----------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
|    | 용량<br>[kW] | 전압<br>[V] | 전류<br>[A] | 전부하<br>효율<br>[%] | 전압<br>[V]     | 전류<br>[A] | 전압<br>불평형<br>율[%] | 전류<br>불평형<br>율[%] | 부하<br>용량<br>[kW] | 설비<br>이용률<br>[%] | 운전<br>효율<br>[%] |
| 1  | 37         | 440       | 61.0      | 91.7             | 337.0         | 29.0      | 0.83              | 0.69              | 10.83            | 29.3             | 86.9            |
| 2  | 37         | 440       | 61.8      | 91.7             | 349.1         | 29.6      | 0.08              | 11.05             | 11.62            | 31.4             | 87.6            |
| 3  | 45         | 440       | 76.0      | 91.7             | 327.9         | 48.4      | 0.32              | 1.45              | 20.89            | 46.6             | 91.2            |
| 4  | 132        | 440       | 232.0     | 93.0             | 356.5         | 86.6      | 0.22              | 1.35              | 39.59            | 30.0             | 91.7            |
| 5  | 150        | 440       | 250.1     | 93.0             | 354.0         | 87.7      | 0.39              | 1.03              | 39.26            | 26.2             | 90.9            |
| 6  | 150        | 440       | 238.0     | 93.0             | 342.6         | 93.0      | 0.30              | 1.33              | 35.86            | 23.9             | 90.4            |
| 계  | 551        |           | 918.9     |                  |               | 374.3     |                   |                   | 158.05           | 28.7             | 89.5            |

위 표에서 측정값 항목에는 편의상 3상 평균 전압, 전류만을 표기하였지만, 실 측정값은 각각 3상전류와 전압이다. 즉, 3상전압, 전류 측정값을 바탕으로 운전 중인 부하용량을 계산하고, 이를 전동기의 정격용량과 비교함으로써 각 전동기마다 식 (1)의 설비이용률이 계산된다. 이때의 효율과 손실을 계산하기위하여 각 개별전동기의 정격값인 전부하효율 등을 사용하여 개별 전동기마다 <그림 1>과 같은 효율특성곡선을 파악한다. 이 효율특성곡선으로부터 해당 전동기의 해당 설비이용률에서의 효율을 파악 할 수 있게 된다. 따라서 각 전동기의 운전 중의 손실과 효율을 계산할 수 있다.

이에 더하여 전압불평형률이 공급 전력에 존재할 수 있는데, 이 전압 불평형률은 전동기의 운전손실에 더하여 추가적인 손실과 온도상승을 야기하므로 손실과 효율계산에 추가하여야한다. 일반적으로 전압불평형률이 추가적인 손실과 불평형을 판단하는 기준이 되지만, 전류불평형률도 해당기기 또는 선로의 설비보전여부를 판단하는 전압불평형의 보완

요소 역할을 하기도 한다. 예를 들어, 표 1에서 전동기 2번은 전압불평형률이 매우 작아 문제가 없는 것처럼 보이지만, 3상전류의 측정 및 계산 결과 전류불평형률이 매우 크다는 것을 알 수 있으며 이 상태는 결국 기기에 손상을 가져오므로 이 번호 2번 전동기는 설비보전이 반드시 필요하다고 판단할 수 있다.

이 공정에서의 전체 전동기용량은 551[kW]인데 실제 운전 중인 전동기의 용량은 약 158[kW]로서 전체 설비이용률은 28.7[%]이다. 이때의 손실전력량은 각각의 전동기의 설비이용률에 따른 효율과 전압불평형률에 의한 손실을 함께 고려하여 구할 수 있고 6대의 전동기에서 이를 합하면 약 16.6[kWh]이다. 이 경우 전압불평형률은 모두 1[%]미만이다. 따라서 전압불평형률에 의한 퍼센트 손실 증가는 효율특성곡선에서 구한 손실에 더하여 추가적인 2[%]미만정도의 손실증가를 가져온다. 이 값은 매우 작은 값이며, 전압불평형률에 의해 손실은 증가했지만 전체적인 효율감소에 큰 영향은 끼치지 못하였다. 이상을 정리하여 종합하면, 이 공정에서 운전 중인 전동기들의 전체 운전용량과 전체 손실로부터 계산한 전체 효율은 89.5[%]이다.

본 논문에서 계산한 전동기들은 설비이용률이 적음에도 불구하고 비교적 큰 운전효율을 갖는 것을 알 수 있다. 그 이유 중 하나는 전동기의 용량이 증대됨에 따라 전부하 효율 등 부하율에 따른 효율이 다소 커지는 특성이 있기 때문이며, 중대형 전동기의 경우에는 설비이용률이 다소 적다고 하더라도 소형 전동기에 비하여 효율의 감소가 적다고 볼 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 운전 중인 생산설비에서 에너지효율 계산에 대하여 논하였다. 에너지효율을 계산하기 위하여 다양한 전기기기 중 생산설비에서 가장 널리 사용되고 있는 3상 유도전동기의 운전 상태와 공급 전압의 품질에 따른 효율을 계산하여 생산설비의 한 공정에서의 사용되고 있는 전동기들의 개별 및 전체 에너지효율과 손실을 계산하였다. 이와 같은 전동기의 효율과 손실에 대한 정보는 생산플랜트 현장에서 전동기의 유지보수 및 점검 시, 개별 전동기의 교체여부를 결정하는 중요지표로 사용될 수 있을 것이다. 또한 생산설비에는 매우 많은 종류의 다양한 설비들이 존재하므로 더욱 자세한 에너지 효율을 산출하기 위해서는 전동기이외에 기타 전력설비들과 선로의 손실, 생산설비의 손실 등을 함께 산정해야 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 박형준, 정찬수 외, "플랜트의 에너지 효율산정에 관한 연구", 한국조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 329-pp. 333, 2006.
- [2] P. Pillay, M. Manjag, "Definitions of Voltage Unbalance", IEEE Power Engineering Review, May 2001.
- [3] U.S. Department of Energy, Energy Tips, "Eliminate Voltage Unbalance", Motor system tip sheet #7, Sep. 2005.
- [4] U.S. Department of Energy, Fact sheet, "Determining Electric Motor Load and Efficiency"
- [5] U.S. Department of Energy, Energy Tips, "Estimating Motor Efficiency in Field" Sep. 2005
- [6] Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, "Energy Management for Motor Driven Systems"