

IEEE 112 등가회로 시험법의 고찰

이인우, 류동완, 변경봉, 최우근  
(주)효성

A study on the equivalent circuit test method using Std. IEEE 112

I.W. Lee, D.W. Ryu, K.B. Byun, U.K. Choi  
HYOSUNG Corp.

**Abstract.** - In the case of the large motors which can't direct load tests, IEEE 112 equivalent circuit test was selected instead of the circle diagram method in the newly KEPIC's code. According to the change of code, Hyosung established an equivalent circuit test method based on Standard IEEE 112.

In this paper, we compared the test results between IEEE 112 and other standards, CSA C-390, JEC2137 for the large motors.

1. 서 론

대용량으로서 직접 부하를 사용하여 시험을 할 수 없는 3상 유도전동기에 대한 특성산정법으로서 오래전부터 원선도법이 사용되고 있다. 원선도법은 간단한 시험과 비교적 간단한 작도를 통해 특성을 산정하는 방법으로서 유도전동기 전 기중에 대하여 폭넓게 사용되어왔다. 그러나 간략화를 위하여 경험을 토대로 하는 가정이 포함되어있고 전동기의 종류에 따라 특성산정 결과에 상당한 오차를 발생하고 있다. 이러한 문제점 등으로 인하여 2001년 7월에 개정된 전력산업기술기준 2000년판에는 직접 부하를 사용하여 시험 할 수 없는 3상 유도전동기에 대한 시험법으로서, 기존 KS규격에서 제시하고 있는 원선도법은 폐지하고 IEEE 112 규격의 등가회로시험법을 채택하고 있다.

이러한 경향에 발맞추어 당사에서는 국제규격인 IEEE 112 규격에 의한 등가회로법을 고찰하여 특성산정 및 세부 시험절차를 확립하고 시험을 통하여 그 결과를 비교하여 보았다.

2. 본 론

2.1 원선도 시험법 및 문제점

원선도법은 다상 유도전동기의 1상이 L형 또는 T형 등가회로로 표시되는 경우에 복소평면상에서의 전류 궤적이 슬립  $s$ 의 변화에 대하여 원으로 되는 것을 이용하여 특성을 구하는 방식이다.

특성은 무부하시험과 회전자 구속시험으로부터 산정할 수 있다. 기준 권선온도에서의 구속임피던스는 정격주파수와 정격의 1/2주파수 구속시험으로부터 결정된다. 저항 및 리액턴스의 주파수에 대한 변화는 그래프로 도식화하여 정격주파수의 1/5지점까지 작도에 의해 선형으로 구해지며, 이때의 저항 및 누설리액턴스의 값을 이용하여 전체 임피던스를 계산한다. 그러나 전동기의 정격주파수가 60Hz일 경우, 구하고자하는 임피던스는 12Hz로서 정격운전시의 회전자 주파수와는 상당한 차이가 있다.

특성 산정 시 1차, 2차의 합성저항을 동일하게 가정하고 있으며, B중 절연 전동기의 경우 구속시의 온도와 기

준온도를 동일하게 가정한다. 이것은 구속시험 시 입력에 다소의 철손과 높은 2차주파수로 인한 표류동손 등 운전 시에는 포함되지 않는 손실을 포함하고 있기 때문이다. 이 방법을 적용할 경우 기준온도와 실제 구속시험시의 온도와는 상당한 차이를 나타내고 있으며, 이로 인한 2차 저항 및 리액턴스 차이는 무시할 수 없는 수준으로서, 슬립의 불일치 등의 문제점을 내포하고 있다.[5]

또한 회로정수의 분리가 곤란한 문제를 안고 있으며 전동기의 종류, 특히 회전자 형상에 의한 표피효과로 인하여 특성산정 결과에 상당한 오차를 발생하는 등의 문제점으로, 이론적으로는 정밀성이 결여되어 있지만 실용상 큰 차이가 없으므로 특성산정법으로서 지속적으로 사용되어왔다.

일본의 경우 JEC 37 규격을 대신하여 새로 개정된 JEC 2137에서는 원선도법을 폐기하고 등가회로법만을 표준 시험방법으로 제시하고 있다.

2.2 IEEE 112 등가회로법

2.2.1 IEEE 112 등가회로법의 개요

IEEE 112 방식의 등가회로법은 T형 등가회로를 기초로 각 등가회로의 정수를 산정 한 후 특성을 구하는 방식으로서, 원선도법이 정격주파수 및 정격의 1/2주파수에서 구속시험을 실시하고 그 결과로부터 운전시의 임피던스를 구하는 반면, 본 규격에서는 3가지 주파수 점에서 구속시험을 함으로써 요구되는 운전 주파수에서의 임피던스를 보다 정밀하게 산정할 수 있다.

효율의 평가는 등가회로의 임피던스 값을 기초로 한다. 특성산정을 하기 위해서는 운전시의 슬립주파수와 같은 2차 전압을 2차 회로에 공급하고 2차 회로의 리액턴스 및 저항을 측정해야한다. 이는 작은 슬립에 상당하는 회전자의 실질적인 저항과 누설 임피던스가 정상 주파수에서의 값과는 달리 누설자속의 분포가 주파수에 따라 변하기 때문이다. 여기에 1차의 정격주파수에 대한 리액턴스와 저항을 결합하여 등가회로를 만들고 이로부터 특성을 산정하고 있다.

운전 시의 회로정수는 전동기의 구속시험을 정격주파수와 1/2주파수 그리고 1/4주파수의 3점에서 실시함으로써 얻을 수 있다. 각각의 주파수에서는 서로 상이한 3가지 이상의 전류에서 시험을 하고, 그때의 전압에 대한 전류와 손실을 그래프상에 도식화하여 요구되는 전류값에서의 총 리액턴스와 회전자 저항을 결정하기 위해 전압과 손실을 구함으로써, 시험결과의 오류를 사전에 방지하고 계산의 정확도를 높이고 있다.

임피던스는 구속시험에 의해 결정되며 구속시험은 1차와 2차 누설 리액턴스( $x_1$ 과  $x_2$ )를 결정하는데 사용한다. 원선도에서는 1차와 2차 누설 리액턴스를 동일한 값으로 가정하는 반면, 본 규격에서는 설계 데이터를 이용하던가 아니면 NEMA Design에 따라 1차와 2차 누설 리액턴스의 비율을 가정하여 전개함으로써, 누설리액턴스의

분리에 의한 특성의 정확도를 피하고 있다.  $x_1/x_2$ 의 비율은 NEMA Design B 전동기의 경우 0.67로 가정하고 있다.

$x_1/x_2$ 의 값을 이용하여 자화 인덕턴스( $x_M$ )와 구속시의 고정자 누설 리액턴스( $x_{1L}$ ) 그리고 1차 누설리액턴스를 아래의 계산절차에 따라 구한다.[2]

$$VAR_L = \sqrt{(m V_{1L} I_{1L})^2 - W_L^2}$$

$$x_M = \frac{m V_0^2}{VAR_0 - m I_{10}^2 x_1} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_M}} \right)^2 \quad (1)$$

$$x_{1L} = \frac{VAR_L}{m I_{1L}^2 \cdot \left( 1 + \frac{x_1}{x_2} + \frac{x_1}{x_M} \right)} \cdot \left( \frac{x_1}{x_2} + \frac{x_1}{x_M} \right) \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{f}{f_L} \cdot x_{1L} \quad (3)$$

- ①  $x_1/x_M$ ,  $x_1$ 을 가정하여 식(1)을 계산한다.
- ② 식(1)의  $x_1/x_M$  값을 이용하여 식(2)를 계산한다.
- ③  $x_1$ 에 대하여 식(3)을 계산한다.
- ④ ③의  $x_1$ 과 ①과 ③으로부터 얻은  $x_1/x_M$  비율을 이용하여  $x_M$ 에 대해 식(1)을 다시 계산한다.
- ⑤  $x_1$  및  $x_M$ 의 계산 전후 비교 값이 0.1% 이내가 될 때까지 반복하여 계산한다.

계산결과로부터 얻어진 회로정수를 이용하여 구속시의 2차 저항을 산정한다.

상기 계산절차에 따라 각 주파수에 대한 2차 저항, 철손저항, 누설 리액턴스 및 자화리액턴스를 산정한 후 이를 그래프 상에 도식화하고 그 추이에 따라 요구되는 슬립주파수에서의 값을 추정함으로써, 정격 운전시의 등가 회로를 구성할 수 있다.

원선도법에 대한 등가회로법의 장단점을 정리하면 다음과 같다.[4]

- ① 여자 리액턴스의 불포화치를 측정하고 이것을 이용하여 구속 임피던스 중의 2차 임피던스를 정확히 구한다.
- ② 저주파 구속시험을 정격의 약 1/4주파수에서 시험하고 2차 임피던스의 주파수에 의한 변화의 이론식을 이용하여 슬립이 작아지는 운전주파수에서의 2차 임피던스를 정확히 구할 수 있다.
- ③ 철손과 기계손을 분리하여 취급한다.
- ④ 부하의 크기별로 표류부하손을 고려하여 계산한다.
- ⑤ 권선저항의 온도보정을 함으로써 시험결과의 신뢰도가 높다.
- ⑥ 등가회로정수의 분리가 가능하다.
- ⑦ 각 손실의 분리가 가능하므로 특성항상에 활용할 수 있다.
- ⑧ 시험방법이 까다롭고 시험시간이 길다.

### 2.2.2 등가회로 시험법의 확립

시험 및 특성산정 절차는 정격전압 무부하시험 → 저전압 무부하시험 → 임피던스시험 → 각 주파수에서의 회로정수의 산정 → 요구되는 주파수에서의 회로정수 산정 → 부하특성산정 → 기동특성 및 최대토크산정 순서로 구성된다.

구속시험결과를 이용하여 계산된 각 주파수점에서의 회로정수를 그래프상에서 도식화하여 추이를 분석한 결과 상관계수 0.95 이상의 직선성을 이루고 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 이용하여 정격운전 시의 회로정수를 산정하기 위하여 선형회귀분석으로 슬립주파수에서의 값을 추정하고 그 결과를 이용하여 등가회로를 구성함으로써 특성을 산정하였다.

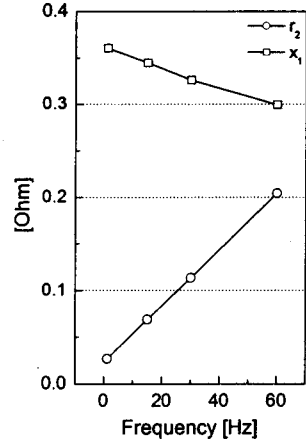


그림 1. 정격전류에서의 주파수에 대한 임피던스의 변화

등가회로법에서는 무부하 및 구속시험 시의 온도를 측정하여 2차 저항의 산정에 적용하고 있다. 2차 저항은 슬립에 직접 관여하여 정격운전 주파수 및 특성을 결정하므로 구속시험 시의 온도측정은 매우 중요하다. 권선저항 측정에 의한 온도 추정에서 실제온도와 차이가 날 경우, 등가회로법에 의한 회전자 온도계산에 직접적으로 영향을 미치며 특성계산 결과에 큰 영향을 미치므로 온도측정은 매우 신중해야 한다. 이러한 오차를 최소화하기 위하여 당사에서는 고압전동기 전용의 권선저항 측정설비를 보완하였으며 실제 시험결과 매우 유용한 것을 확인하였다.

또한 회전자 바의 재질 및 형상, NEMA Design 그리고 온도상승치 등을 특성 계산시 반영함으로써 산정결과의 정밀도를 피하고 있다.

### 2.3 시험결과

당사에서 제작되고 있는 150kW 전폐의선형 전동기에 대하여 등가회로방식을 비롯하여 각종 방식에 따라 시험을 수행하고 그 결과를 도출하여 비교하였다.

구속시험 결과, 정격전류 하에서 3가지 구속주파수점에 대한 구속전압과 각각의 회로정수는 상관계수 0.95 이상의 양호한 선형성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

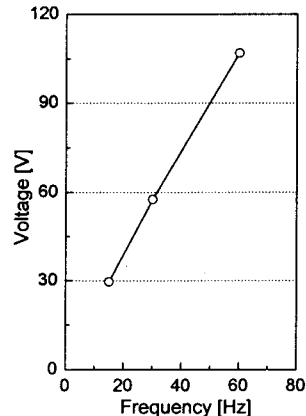


그림 2. 정격전류하에서 구속주파수에 대한 구속전압 관계

시험용 전동기는 특성비교를 위하여 원선도법, IEEE 112 등가회로법, JEC 2137 등가회로법 그리고 동력계에

의한 실부하법으로서 CSA C-390 규격에 의한 시험을 수행하여 비교하였으며 그 결과에 대한 효율과 역률을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 CSA C-390의 효율이 가장 낮게 나타났으며 원선도법이 가장 높게 나타난 것을 알 수 있다. 원선도에서는 마찰손실과 풍손 등의 기계적인 손실과 표류부하손이 고려되지 않음으로써 효율이 타 방식에 비해 높게 나타나는 것을 알 수 있다. IEEE 112 등가회로법과 JEC 2137 등가회로법과의 효율비교는 표류부하손의 가정치 차이가 가장 크게 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 정격부하에서의 회전수는 IEEE 112 방식이 타 방식에 비하여 실부하 시험결과에 근접한 결과를 얻었다.

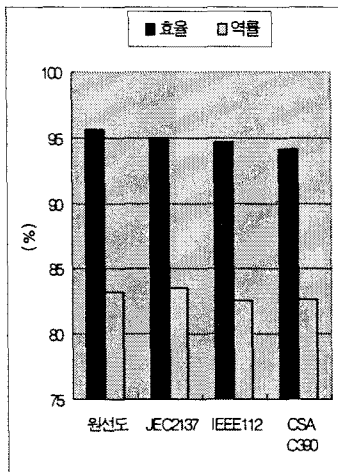


그림 3. 시험방식에 따른 효율/역률 비교

### 3. 결 론

IEEE 112 등가회로방식은 회로정수를 산정함으로써 부하변동에 의한 특성의 안정이 용이하고, 최근 산업계에서 사용이 증대하고 있는 벡터 인버터용 전동기의 속도 토크 조정에 이용할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 점차 확대될 추세이다.

IEEE 112 규격은 기존의 원선도법이나 JEC 2137 규격과 달리 계산방법이 명확하지 않은 단점이 있으나 이러한 규격상의 의미를 이론적으로 해석하여 특성안정 및 상제 시험절차를 확립하였으며, 당사 생산품 전동기를 대상으로 시험한 결과 신뢰성 높은 결과를 얻었다.

본 연구를 통한 성과는 전력산업기술기준이 적용되는 원자력 및 수화력전동기 뿐만 아니라 해외 수출용 전동기에 적용됨으로써 국제적인 경쟁력에 도움이 될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 에너지 관리공단에서 지원하는 “철강압연 기용 고효율 유도전동기 및 제어시스템 개발” 과제의 일부로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] KSC 4201-1997, “3상 유도 전동기의 특성 시험 방법”
- [2] IEEE Std 112-1996, “IEEE Standard Test Procedure for

Polyphase Induction Motors and Generators”.

[3] CSA C-390 “Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors”

[4] JEC-2137-2000 電氣學會 電氣規格調査會標準規格 “誘導機”

[5] “F種およびH種絶縁誘導機の 円線図法について” 電氣學會 技術報告 1部 第51号

[6] “誘導電動機の 負荷特性算定法” 電氣學會技術報告 1部 第130号