

커패시터 구동형 단상 유도전동기의 손실분리 연구

김광수, 김기찬, 이상훈, 이주  
 한양대학교 전기공학과 에너지변환연구실

Study of Losses segregation for Capacitor-Run Single phase Induction Motor

Kwangsoo Kim, Ki Chan Kim, Sang-hoon Lee, Ju Lee  
 Dept. of Electrical Engineering at Hanyang Univ

**Abstract** - Several methods are proposed in the literature for losses segregation of single phase induction motor. Generally we could divide two methods for experimental determination of losses segregation for single phase induction motor. The one is relatively complicated method based on parameter estimation of single phase induction motor. The other is simple method based on IEEE Standard 114. Segregation of losses in single phase induction motor is more complicated than that in three phase induction motor, because of the backward magnetic field component in the motor and multiplicity of different single phase type. In this paper, therefore, we studied losses segregation of capacitor-run single phase induction motor.

타내고 있다. 그림 1은 시험에 사용된 시험 장비를 나타내고 있다.

표1. 전동기 사양

항목	값	단위
전압	220	V
주파수	60	Hz
정격속도	1600	rpm
용량	57	W
극수	4	pole
커패시터	2.5	uF
강판	S60. 0.5T	

1. 서 론

국내에서도 세계적 기술동향에 부응하여 국제경쟁력을 확보하기 위해 에너지변환기기 중 유도전동기를 시작으로 고효율을 통한 생산, 판매를 의무화하는 최저 효율제를 2008년 강제 시행을 결정하였다. 이에 따라 국내뿐만 아니라 국제적인 최저 효율 규격에 맞는 단상 유도 전동기 설계가 요구된다. 고효율 전동기 설계를 위해서는 손실과 효율을 정확하게 측정할 필요가 있다.

단상 유도전동기의 손실은 기계손, 고정자 동손, 회전자 동손, 철손, 표류 부하손으로 나눌 수 있다. 커패시터 구동형의 경우 고정자 동손에 커패시터 손실도 포함한다.

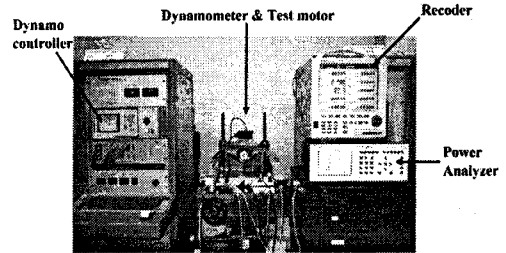
손실을 계산하는 방법으로는 크게 수치해석적인 방법과 시험을 통한 손실분리로 나눌 수 있다. 수치해석적인 방법은 정상분과 역상분의 자계, 코어의 자기포화, 슬롯으로 공간 고조파, 슬롯 스큐, 회전자의 표피효과 등이 존재하기 때문에 매우 복잡한 문제가 될 수 있으며, 또한 3D-FEM을 통하여 손실들을 계산할 수 있으나 많은 시간과 노력이 요구된다.

이 논문에서는 오직 실험적인 손실분리 방법에 대해서 살펴보겠다. 특히 IEEE Std. 114와 각 파라미터들을 계산하여 각 손실을 분리하는 회로정수법을 비교하여 각 특징에 대해 살펴보고 회로정수법과 IEEE Std 114에 대한 비교, 분석을 통해 커패시터 구동형 단상유도전동기에 적합한 손실분리 시험에 대하여 연구하였다.

2. 손실분리시험

단상 유도전동기의 손실분리 시험의 경우 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 회로정수 시험과 IEEE Std. 114를 이용한 시험이다. 먼저 손실분리 시험의 두 방법에 대해서 살펴보자. 표1은 본 논문에서 해석 및 시험을 수행할 57W급의 커패시터 구동형 단상유도 전동기의 사양을 나

그림1.



2.1 IEEE Standard 114를 이용한 손실분리 시험

IEEE Std 114는 IEEE에서 제안하는 단상유도전동기 시험 규격으로 2001년 개정되어 다상유도전동기 시험 규격인 IEEE Std 112를 기반으로 하여 유도전동기 시험법과 시험 절차 및 손실 측정에 관해 나타내고 있다. 먼저 고정자 동손을 다음과 같이 정의 한다.

$$P_{st} = \frac{I^2}{2} R$$

여기서  $I$ 는 고정자입력 전류,  $R$ 은 dc측정 저항이다. 회전자 동손은 삼상 유도 전동기와 같이 2차측 입력과 슬립을 통하여 다음과 같이 계산한다.

$$P_{rt} = (P_o - P_{st} - P_{cl} - P_m) s$$

여기서  $P_o$ 는 고정자 입력 전력,  $P_{st}$ 은 고정자 동손,  $P_{cl}$ 은 철손,  $P_m$ 은 기계손,  $s$ 는 슬립이다. 철손의 경우도 삼상 유도전동기 시험법과 같이 무부하 시험을 통하여 계산 할 수 있다. 무부하시의 손실은 고정자 동손, 회전자 동손, 철손, 기계적손으로 분류할 수 있다. 여기서 무부하시 슬립은  $s \approx 0$ 으로 간주할 수 있기 때문에 회전자

동손은 0이라고 할 수 있다.

$$P_{cl} = P_{noload} - P_{sl-noload} - P_m$$

여기서  $P_{noload}$ 는 무부하시 입력전력,  $P_{sl-noload}$ 는 무부하시 고정자 동손이다. 기계손의 경우는 정격전압의 120%부터 전압을 서서히 줄여가며, 고정자 전류가 상승하기 전까지 측정하여 무부하 포화 곡선을 그려 추정한다. 이때 1/2구속시험을 수행하여 무부하시 발생하는 동손을 빼준다. 여기서 동손은 고정자에서 일어나는 동손뿐 아니라 회전자에서 일어나는 동손도 고려하여 계산한다.

$$P_l = \frac{I_s^2}{2} \left( R_t + \frac{P_l}{I_l^2} \right)$$

여기서  $I_s$ 는 무부하 시험시 고정자 입력전류,  $R_t$ 는 구속시험시 측정 저항,  $P_l$ 은 구속시험시 입력전력,  $I_l$ 은 구속시험시 입력전류이다.

표류 부하손실은 전체 손실의 부분에서 앞에서 계산한 고정자 동손, 회전자 동손, 철손, 기계손의 합에서 고려되지 않은 부분이다. 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{stray} = (P_o - P_{out}) - (P_{sl} + P_{rl} + P_{cl} + P_m)$$

여기서  $P_{out}$ 은 토크와 속도로 계산한 기계적 출력이 다.

IEEE Std. 114는 단상 유도전동기의 측정에 대한 기준은 제시해주고 있지만 각 전동기 타입에 대한 시험방법을 나타내고 있지는 않다. 이와 같은 방법으로는 커패시터 구동형 단상유도전동기의 손실을 제대로 측정할 수 없다.

표2. IEEE Standard 114를 이용한 시험결과

항목	IEEE Std. 114
고정자 동손[W]	13.39
회전자 동손[W]	5.95
철손[W]	20.304
기계손[W]	1.1
표류부하손[W]	-11.4
총손실[W]	30.89
효율[%]	64.7

표2는 IEEE Std. 114의 방법에 따른 손실분리 시험 결과를 나타내고 있다. 철손이 매우 크게 측정되어 측정된 총손실이 실제 손실(입력-출력)보다 크게 나타나 표류 부하손의 경우 음의 값을 가지는 오류가 존재한다. 보편적으로 사용되고 있는 회로정수 시험을 이용하여 원인을 연구하였다.

### 2.2 회로정수법을 이용한 손실분리 시험

회로정수법을 이용한 손실분리 시험도 무부하시험, 구속 시험 등에 의해 수행되며, 이들 절차는 문헌에 많이 설명되어있다.[3],[4] 회로정수법은 단상유도전동기의 등가회로를 근사화하여 권선비 시험, 구속시험, 무부하시험, 정격부하시험을 통하여 등가회로의 파라미터를 측정하고, 각 손실들을 계산한다. 본 논문에서는 Veinott의 시험 방법을 이용하여 시험을 수행하였다. 회로정수법의 몇 가지 가정이 존재한다. 다음은 회로정수법을 이용한 손실분리 시험시 가정을 나타낸다.

1) 무부하시 회전자 저항을 무시하지 않는다.

- 2) 회전자 저항은 부하조건에서 삼상유도전동기에서처럼 슬립과 출력으로부터 직접 구할 수 없다.
- 3) 1차측 누설 리액턴스와 2차측 누설 리액턴스가 같다.
- 4) 커패시터 구동형 단상유도전동기의 경우 커패시터에 서의 손실도 존재하게 된다.

본 논문에서 그림 2의 등가회로를 이용하여 회로정수법을 수행하였다.

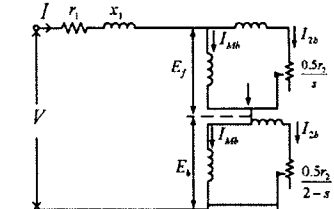


그림 2. 단상유도전동기의 등가회로

먼저 주권선 또는 보조권선만으로 무부하 운전하여 다른 권선에 발생하는 역기전력은 측정하는 권선비 시험을 실시하여 주권선과 보조권선의 권선비를 계산한다. 권선비  $a$ 를 이용하여 주권선과 보조권선이 상호 영향을 고려한다.

$$a = \sqrt{\frac{E_a \times E_a'}{E_m \times E_m'}}$$

여기서  $E_m$ 은 주권선 시험시 주권선에 인가한 정격전압,  $E_a'$ 은 주권선 시험시 보조권선에 발생하는 역기전력,  $E_a$ 은 보조권선 시험시 보조권선에 인가하는 전압( $E_a \times 1.18$ ) 그리고,  $E_m'$ 은 보조권선 시험시 주권선에 발생하는 역기전력이다.

회로정수법의 경우 대부분의 문헌에서 무부하 시험시 보조권선을 개방하고 주권선만 고려하여 파라미터를 계산한다. 그림2에서 등가회로와 같이 무부하 시험시  $s \approx 0$  이더라도, 역상분 성분으로 인하여 회전자의 무부하 손실이 존재한다. 따라서 회전자의 무부하 동손의 고려한 철손은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{cl} = P_{noload} - (P_{sl} + P_{rl} + P_m)$$

$P_{sl}$ ,  $P_{rl}$ 은 각 고정자와 회전자의 동손으로, 무부하시 총저항 다음과 같다.

$$r_o = R_{sm} + \frac{1}{2} R_{rm}$$

$P_m$ 은 기계손으로 IEEE Std. 114와 같은 방식으로 구할 수 있다. IEEE 표준과 다르게 회전자 동손의 경우 슬립으로 계산하지 않고 등가회로에서의 회전자 파라미터를 계산하여 손실을 구한다. 회전자 저항과 누설리액턴스는 주권선과 보조권선에 각각 구속시험을 수행하여 계산할 수 있다.

먼저 주권선 구속시험의 경우(보조권선 개방)의 경우는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{sm} + R_{rm} \approx \frac{P_{sc}}{I_{msc}^2}$$

$$|Z_{sc}| = \frac{V_s}{I_{msc}}$$

$$X_{sm} + X_{r_m} = \sqrt{\left(\frac{V_{sm}}{I_{m,sc}}\right)^2 - (R_{sm} + R_{r_m})^2}$$

여기서,  $P_{sc}$ ,  $V_{sm}$ ,  $I_{m,sc}$ 는 구축시 입력전력, 전압, 전류이다. 보조권선 구축시험(주권선 개방)의 경우도 주권선과 같은 방법으로 구할 수 있다.

정격 부하시험을 수행하여, 효율, 손실, 출력을 계산한다. 이 때 회전자와 정자분 저항과 전류, 역상분 저항과 전류를 계산하여 정격 부하시의 전체 회전자 동손을 계산할 수 있다. 커패시터의 손실의 경우 커패시터에서 소비되는 전력과 흐르는 전류를 측정하여 등가저항을 알 수 있으며, 이를 통하여 손실을 계산할 수 있다.

$$P_{loss} = P_{sl} + P_{rl} + P_{cl} + P_m + P_c$$

표류 부하손실의 경우, IEEE 표준과 같이 실제 손실에서 측정 손실의 합을 뺀 나머지 값으로 나타낼 수 있다. 표3는 회로정수 시험을 통한 손실분리 시험의 결과와 자기 등가 회로법을 이용한 특성해석 결과를 나타내고 있다. 해석값과 약간의 차이는 존재하지만 제작상의 오차를 고려할 때 결과가 일치한다고 할 수 있다. 해석을 통한 표류부하손의 계산이 불가능하기 때문에 효율에도 약간의 차이가 존재한다.

표3. 회로정수법을 이용한 시험결과

항목	회로정수법	등가회로법 [해석치]
고정자 동손[W]	13.44	11.01
회전자 동손[W]	7.767	12.26
철손[W]	5.737	3.11
기계손[W]	2.2	0.83
커패시터손실[W]	0.143	0.147
표류부하손[W]	1.343	-
총손실[W]	30.6	27.357
효율[%]	64.97	66.92

### 2.3 IEEE Std. 114와 회로정수법의 비교

회로정수법을 이용한 손실분리의 경우 해석결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었지만, IEEE Standard 114의 경우 단상유도전동기 시험법을 적용하여 단상유도전동기의 특징을 고려하지 못하는 부분이 존재하였다. 무부하시 회전자 동손이 존재하지 않는다고 가정하여 철손 계산에 오류가 존재하였으며, 일반적인 단상유도전동기 시험법을 제시하다보니 커패시터 구동형 단상유도전동기에 적용하기도 쉽지 않았다. 회로정수법의 경우도 복잡한 파라미터 계산과정에서 근사화로 인한 오차가 존재할 수 있고, 보조권선을 개방하고 손실분리 시험을 수행하여 어느 정도의 오차가 존재할 가능성이 있다. 추후 이 두 방법의 장점을 결합하여 하나의 손실분리 시험법을 정립할 필요가 있다.

회로정수법의 경우 각 파라미터의 계산이 복잡하고 시간이 걸리는 단점이 존재하기 때문에 간단한 측정을 통하여 손실을 계산할 수 있는 IEEE 표준을 기준으로 시험법을 수정하였다. 우선 고정자 동손의 경우 주권선과 보조권선의 전류를 각각 측정하여 각 권선의 동손을 계산하였다.

$$P_{sl} = I_m^2 R_m + I_a^2 R_a$$

여기서  $I_m$ ,  $I_a$ 는 각 주권선과 보조권선의 전류이고,  $R_m$ ,  $R_a$ 는 주권선과 보조권선의 DC측정 저항이다. 또한, IEEE에서 철손 계산시 고려하지 않았던 무부하 회전자

동손을 고려하였다.

$$P_{sl} + P_{rl} = \frac{I_m^2}{2} \left( R_{ml} + \frac{P_{m1}}{I_{m1}^2} \right) + \frac{I_a^2}{2} \left( R_{al} + \frac{P_{a1}}{I_{a1}^2} \right)$$

또한 커패시터의 손실도 고려하여 계산하였다. 표 4는 수정된 IEEE Std. 114를 통한 손실분리 결과를 나타내고 있다.

표 4. 수정된 IEEE Std. 114를 이용한 시험결과

항목	수정 IEEE Std. 114
고정자 동손[W]	13.39
회전자 동손[W]	5.95
철손[W]	4.67
기계손[W]	1.1
커패시터손실[W]	0.14
표류부하손[W]	4.08
총손실[W]	31.03
효율[%]	64.7

회로정수법에서의 복잡한 계산이 존재하지 않으므로, 간단히 단상유도전동기의 손실을 분리할 수 있으며, 보조권선을 개방하지 않으므로 보조권선과 주권선의 상호영향을 고려한 손실을 측정할 수 있다.

### 3. 결 론

커패시터 단상 유도전동기의 손실분리 시험에 대한 두 가지 방법을 살펴보았다. 보편적으로 사용되는 회로정수의 경우 IEEE Std. 114보다 정확한 시험을 수행할 수 있지만 모든 파라미터를 계산을 해야 하는 단점이 존재하였다. 따라서 회로정수 시험을 바탕으로 IEEE Std. 114를 수정하여 단점을 보완하여 보다 간단한 시험을 수행할 수 있게 되었다. 추후 회로정수법과 이 수정된 시험방법의 정확도를 검증하기 위해 다른 용량의 단상유도전동기에 대한 시험, 연구가 수행되어야 한다.

#### 감사의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 프리미엄급 고효율 단상 유도전동기 설계/해석 사업으로 수행되었음. 과제번호(2005-01-0031-3-010)

#### [참 고 문 헌]

- [1] "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.", Standard 112-2004, Sponsored by the Rotating Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2004
- [2] "IEEE standard test procedure for single-phase induction motors.", Standard 114-2002, Sponsored by the Rotating Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2002
- [3] Cyril G. Veinott ; "Theory and design of small induction motors", McGraw-Hill Book Company, 1959
- [4] Ion Boldea, Syed A. Nasar " The induction machine handbook", CRC Press, 2001