

## 멀티테스터를 이용한 3상유도전동기 고정자 권선의 극성 판별법에 관한 연구

최 순 만<sup>†</sup>

(Received September 15, 2014 ; Revised October 2, 2014 ; Accepted October 8, 2014)

### A study on how to discriminate the polarities of stator windings for 3 phase induction motors by using general purpose multi-testers

Soon-man Choi<sup>†</sup>

**요약:** 선박의 전동기에 고장이 발생하면 대개 육상에서 수리 후 본선에 다시 재설치 되고 있으나 연결 단자의 기호 표시가 지워지거나 분명치 않을 때는 결선과정에서 전동기 권선의 극성 구별이 어려워진다. 이로 인해 Y- $\Delta$  기동의 전동기에서 한 권선의 극성을 반대로 잘못 연결하는 경우 전원 투입과 동시에 과도한 전류가 흐르면서 재차 2차 고장으로 이어질 위험이 있다. 이러한 문제와 관련하여 본 논문은 고정자의 1상 권선에 미소 직류전류를 흘릴 때 나머지 권선들에서 유도되는 과도 기전력의 특성을 토대로 아날로그 멀티테스터를 이용한 고정자 권선의 극성 판별법을 제시하고 관련 특성을 분석한다. 또한, 이 같은 방식을 실제 전동기에 적용하여 단계적인 측정과정을 통해 단자연결의 이상여부를 현장에서 용이하게 판별할 수 있는지를 확인해 보기로 한다.

**주제어:** 극성판별, 3상유도전동기, 고정자 권선, 멀티테스터

**Abstract:** Faulty electric motors onboard vessels with anomalies in windings or poor insulation are usually repaired at land based workshops and reinstalled in place by crew hands after receiving the repaired motors. Especially for 3 phase induction motors which need Y- $\Delta$  starters with 6 lead wires, it would happen that the polarities of stator windings cannot be well distinguished if the original tags of these wires are erased or not visible clearly, resulting in subsequent damage to the repaired motor due to extreme current flow when the power is given to the motor the stator windings of which are wrongly connected in the polarity. This study proposes an easy way to make correct connection in winding polarities without failures based on the electro-magnetically induced voltages on windings when a slight DC current is supplied to a winding coil by using an analog multi-tester. The proposed method is applied to actual motors and delves into the applicability for polarity discrimination through a few measurements onboard vessels.

**Keywords:** Polarity discrimination, Three phase induction motor, Stator windings, Analog multi-tester

## 1. 서 론

3상유도전동기의 고장상황을 감시하고 진단하는 방법에는 다양한 연구들이 있으나 대부분 운전중인 때를 전제로 하고 있다. 여기에는 부하전류의 크기나 벡터 맵핑에 의한 전류의 평형관계를 분석함으로써 고정자 권선의 이상상태를 검출하는 방식을 비롯하여<sup>[1-4]</sup> 주파수 특성을 토대로 베어링을 포함한 전동기의 상태를 진단하는 방식<sup>[5-6]</sup> 등이 있으나 권선 극성의 이상 연결여부 및 극성의 판별방식에 대해 직접적으로 연구한 예는 찾아보기 힘들다. 극성이 반대로 연결되는 상황이란 주로 고장 전동기를 취외 수리 후 기동반에 재결선하는 과정에서 단자 표시의 훼손으로 불분명할 때 발생한다. 이러한 오결선 상태에서 전원이 투입되

면 기동 실패와 함께 큰 전류가 계속 흘러 전동기는 과열로 재차 소손될 수 있다. 특히 Y- $\Delta$  기동에서와 같이 3상유도전동기의 리드선이 6개인 경우 극성 구별을 위한 별도의 측정기가 있는 것이 아니므로 오결선 여부의 확인이 어렵다.

본 연구는 이러한 점에서 범용의 멀티테스터를 이용하여 유도전동기 권선의 극성을 간단히 판별할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 3상유도전동기에서 각상 고정자 권선은 일정 위상차의 자기적인 결합을 가지므로 한 상에서의 전류변화는 결합자속에 의해 나머지 권선에 유도기전력을 일으킨다. 여기에서는 아날로그 멀티테스터의 저항 측정 시 측정대상에 주어지는 미소 직류전류를

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8795-7443>): Department of Education & Research, Korea Institute of Maritime & Fisheries Technology, 367 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: [panamo@hanmail.net](mailto:panamo@hanmail.net), Tel: 051-620-5850

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 논문은 2014 한국마린엔지니어링학회/한국해양항만학회 공동학술대회에서 “멀티테스터를 이용한 3상유도전동기 고정자 권선의 극성 판별법에 관한 연구”의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것입니다.

이용하여 여자전류를 공급하여 이로 인해 발생하는 유도전압의 특성을 분석함으로써 이들 관계를 극성 판단에 적용할 수 있는지를 살펴본다.

## 2. 고정자에서의 상호유도

### 2.1 권선 극성의 연결오류

Figure 1은 3상유도전동기의 U, V, W 권선 중 V상 권선이 반대로 연결되었을 때의 전류를 페이지로 나타낸다. 정상 연결일 때 V의 상전류  $I_V$ 는 점선 표시로 되지만 극성이 반대로 되면 전류는  $I_V'$ 가 되면서 정상적인 회전자계가 발생하지 못한다. 따라서 전원 투입시 기동이 되지 않는 상태에서 회전자에는 슬립 0일 때의 회전자 전압이 그대로 작용하여 많은 전류가 흐르면서 전동기는 과열된다.

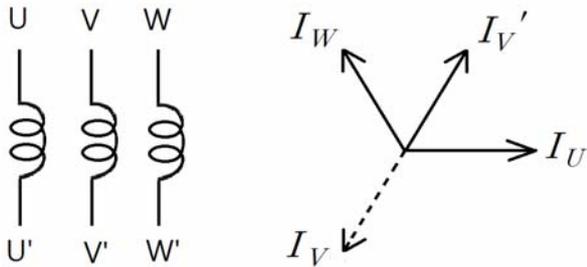


Figure 1: Relation of phase currents with V winding connected reversely

### 2.2 직류전류에 의한 상호유도

정지중인 3상유도전동기에서 3개 고정자 권선 중 하나에 아날로그 멀티테스터의 저항 측정에 의한 전류를 외부에서 여자전류로 흘려주는 경우 Figure 2의 등가회로에서와 같이 W상 권선에는 유도기전력  $e_3$ 가 발생한다.

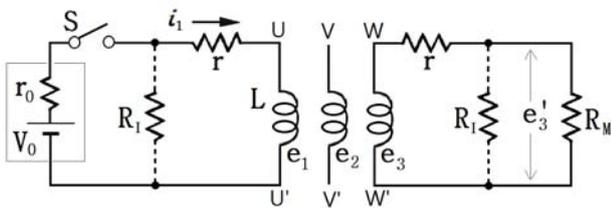


Figure 2: Circuit diagram to measure induced voltage at W-W' winding when DC current is given at U-U'

$r_0$ 는 저항 측정인 경우 리드봉 양단에서 보았을 때 아날로그 멀티테스터의 내부저항이다. 또한,  $R_1$ ,  $r$ 과  $R_M$ 는 전동기의 절연저항, 고정자 권선의 직류저항 및 전압 측정시의 테스터 내부저항이며  $V_0$ 와  $L$ 은 테스터의 내부전지

전압과 고정자 권선의 자기인덕턴스이다. 여기에서 절연저항  $R_I$ 은 매우 크므로 이로 인한 영향을 제외한다면 저항 측정으로 U상 권선에 흐르는 전류  $i_1$ 은 식 (1)의 전압 식으로부터

$$V_0 = L \frac{di_1}{dt} + (r_0 + r) i_1 \quad (1)$$

$i_1$ 은 다음과 같아진다.

$$i_1 = \frac{V_0}{r_0 + r} \left( 1 - e^{-\frac{r_0 + r}{L} t} \right) \quad (2)$$

또한,  $i_1$ 에 의해 W상에서 유도되는 전압  $e_3$ 는 상호유도인덕턴스가  $M$ 이고 자기결합계수가  $k$ 이면

$$e_3 = M \frac{di_1}{dt} = kL \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

가 된다. 식에서  $k$ 는 권선 간 위상차가 기하적으로  $\theta$ 일 때  $\cos\theta$ 에 비례하는 값이다. 여기서  $\theta$ 가 0인 동일 위상이거나 또는  $\pi$ 의 역상관계일 때의 자기결합계수가  $k_0$ 라고 하면 위상차  $2\pi/3$ 인 3상유도전동기에서  $k$ 는  $k_0$ 의 1/2배가 된다. 또한, Figure 2로부터 테스터에서의 측정전압  $e_3'$ 는 다음과 같다.

$$e_3' = \frac{k V_0 R_M}{r + R_M} e^{-\frac{r_0 + r}{L} t} \quad (4)$$

$e_3'$ 의 크기는 주어진 멀티테스터에서 자기결합계수와 전동기 권선의 직류저항에 영향을 받는다. 권선 저항  $r$ 은 용량이 클수록 작으므로 대형 전동기에서  $e_3'$ 는 더 큰 값을 나타낸다.

### 2.3 유도전압과 극성판별

3상유도전동기 고정자의 권선 단자가 U-U', V-V' 및 W-W'이면 회전자를 제거한 Figure 3의 전동기 단면에서 여자전류와 이로 인한 상호유도 기전력의 방향 관계를 나타낼 수 있다. Figure 3의 왼쪽은 U 단자에 전류가 들어가서 U' 단자로 나오는 방향으로  $i_1$ 이 흐를 때이고 U-U' 권선은  $\phi_{UU'}$ 의 자속을 발생시킨다.  $\phi_{UU'}$ 가 발생하면 이에 대해 V-V'와 W-W' 권선이 일으키는 역기전력은 그림에서와 같이 서로 동일 방향을 가리키는 관계가 된다.

따라서 자속  $\phi_{UU'}$ 가 증가할 때 V 및 W의 권선에서 V'와 W' 단자 쪽이 (+) 방향의 유도전압을 발생시킨다. 이에 대해 Figure 3의 우측은  $i_1$ 이 U'에서 U 단자로 흐르는 경우로서 기전력은 V와 W 단자 쪽이 (+) 방향임을 나타낸다. 즉,  $2\pi/3$ 의 위상차를 갖는 V-V' 권선에 직교성분으로 작용

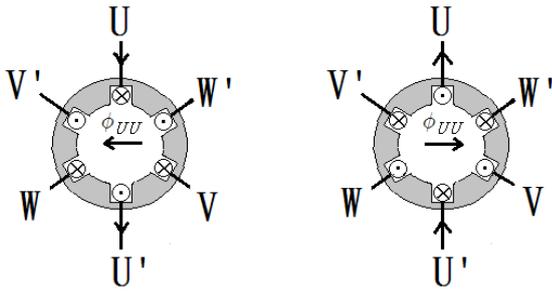


Figure 3: Induced voltages due to  $\phi_{UU'}$  generation by increasing U-U' DC currents

하는 자속은  $\phi_{UU'}$ 의  $Re(e^{-j\frac{2\pi}{3}})$  만큼 더 작은 값이 되므로 V-V'에서의 유도 전압  $e_2$  는

$$e_2 = -n \frac{d}{dt} [\phi_{UU'} \cdot Re(e^{-j\frac{2\pi}{3}})] \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} M \frac{di_1}{dt}$$

이고 또한, W-W' 권선에서의 전압  $e_3$  는

$$e_3 = -n \frac{d}{dt} [\phi_{UU'} \cdot Re(e^{-j\frac{4\pi}{3}})] \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} M \frac{di_1}{dt}$$

이므로  $i_1$  에 의한  $\phi_{UU'}$  발생은 V와 W에서 항상 동일 크기와 방향의 기전력을 서로 일으킨다.

### 3. 실험과 분석

#### 3.1 실험 방법

용량이 큰 전동기일수록 응답 신호가 커진다는 점에서 작은 용량에서 극성 판별을 위한 신호가 멀티테스터에서 충분히 나타나는지를 확인할 필요가 있으므로 6개의 연결 단자가 있는 소용량의 0.75kW, 4극 농형 3상유도전동기를 대상으로 실험하였다. 권선으로의 DC 여자전류 공급에는 범용의 아날로그테스터가 사용되었으며 나머지 권선에서의 유도전압도 같은 종류의 멀티테스터로 측정하였다. 여자전류 공급을 위한 테스터의 저항 선택 스위치는 전류 출력력이 가장 큰 Rx1의 범위를 선택하였고 이때 영점조정을 위한 리드봉 단락 시의 전류는 150mA이다. 여기서 리드봉을 개방할 때의 양단 전압인 Figure 2의  $V_0$  는 3.15V로 측정되므로 Figure 2의 테스터 내부저항  $r_0$  는 21.0Ω로 계산된다. 또한, 대상 전동기에서 측정된 직류 저항  $r$  은 13.5Ω이다. 한편, 측정될 유도전압  $e_3'$ 의 크기는 미소 전압이므

로 테스터에서 DC 0~0.5V 범위의 선택으로 측정하였다. 이때 테스터에 표시되는 전류의 흐름은  $50\mu A$ 이므로 Figure 2의  $R_M$ 은 10kΩ이 된다.

#### 3.2 응답파형에 의한 극성확인

Figure 4는 아날로그 테스터로 저항 측정 시 리드봉에서의 전류방향을 고려하여 U 단자에는 테스터의 적색 리드봉을 그리고 U' 단자에는 흑색 리드봉을 연결한 상태이다. 여기에서 (R)과 (B)는 각각 연결한 테스터의 적색 리드봉과 흑색 리드봉을 표시하며 리드봉의 접촉에 의해 전류는 아래쪽 U' 단자로 들어가서 U 단자로 전류가 나오는 관계가 된다. 또한, U-U'에 여자전류가 주어지는 순간 V, W 권선에서의 유도기전력(EMF)은 V, W 단자가 (+)로 되고 V', W' 단자가 (-)를 나타내면 극성 연결은 정상으로 판단할 수 있다.

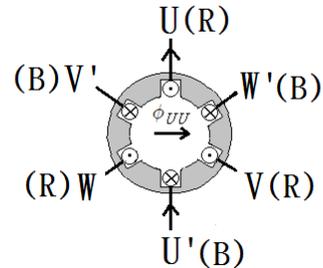


Figure 4: Connection of multi-tester leads for exciting current to U-U' and EMF polarities at remaining windings

Figure 5는 U 상에 흐르는 전류  $i_1$  과 이로 인해 W 상에 나타나는  $e_3'$ 의 관계를 데이터측정 장치를 이용하여 출력한 것이다.

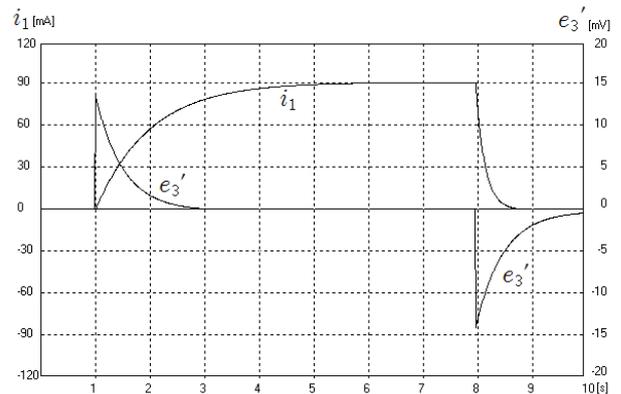


Figure 5: Result of  $e_3'$  when two windings are in the same polarity

시간 1초일 때 테스터가 연결되면 U 상의 전류  $i_1$  의 모양은 식 (2)에 의한 1차지연 형태를 나타내며 정상 상태에

서 전류 측정치는 91mA이므로 식 (2)이 나타내는 값과 거의 일치하고 있다. 여기서  $e_3'$  곡선은 1초 시점의 전류 상승에 대해 (+) 방향의 미분파형을 나타내므로 U 권선과 W 권선의 극성은 서로 일치하는 관계임이 응답을 통해 확인된다. 또한, 시간 8초 시점에서 여자전류를 끊을 때의  $e_3'$  응답은 (-)의 반대방향 펄스파를 보인다.

이에 대해 Figure 6은 W 권선의 단자를 정상일 때와 반대로 연결해 놓은 경우의 파형 결과이다. 여기에서 시간 1초 시점에 U 권선에 흘린 여자전류의 상승에 대해  $e_3'$  응답은 (-) 방향의 미분파형을 나타내므로 이 같은 응답을 통해 U권선과 W권선의 극성은 서로 일치하지 않는 관계임을 알 수 있다.

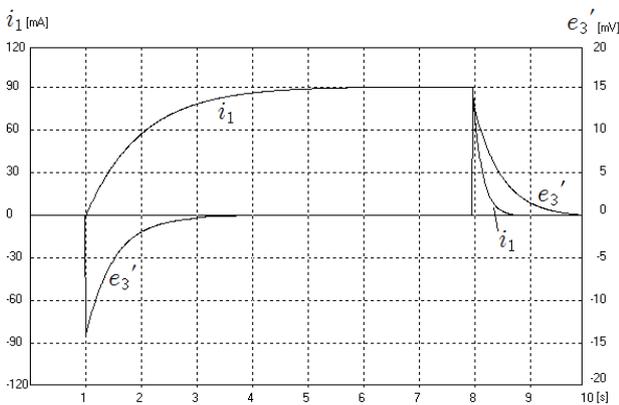


Figure 6: Result of  $e_3'$  when two windings are not in the same polarity

같은 방식으로 정상 연결 상태에서 V 권선의 응답을 확인하면 W 권선과 동일한 (+) 미분 파형을 보였다. 따라서 3개 권선은 Figure 4의 극성 관계에 있으므로 권선 모두는 동일 극성 관계임을 알 수 있다. 이와 반대로 V와 W 권선의 극성 연결에 오류가 있는 상태에서는  $i_1$ 의 흐름에 대해 V와 W에서의 응답은 테스트 지침 상에서 서로 반대 방향을 가리키므로 극성은 서로 일치되지 않는 관계로 판별되었다.

#### 4. 결론

3상유도전동기의 설치 시 연결 단자에서 극성 표시의 불분명으로 오접속이 있게 되면 2차 고장으로 이어진다는 점에서 멀티테스터를 이용한 극성 판별법이 제시되었다. 이와 함께 권선 간 상호유도 특성에 의해 3상유도전동기의 한 권선에 주어지는 전류변화는 나머지 권선 모두에 동일한 크기와 방향의 기전력을 일으키는 관계를 해석하였다. 실험에서 여자전류 공급은 아날로그 멀티테스터의 저항 측정 시 주어지는 전류를 이용하였으며 이로 인해 나머지 권선에서 발생하는 유도전압을 멀티테스터의 DC 전압

으로 측정된 결과 미분형 파형이 (+) 혹은 (-) 방향인가의 여부를 통해 각 권선의 극성 판별이 가능하였다. 또한, 여자전류 공급을 위한 저항 측정 시의 테스트 리드봉과 유도전압 측정을 위한 DC 전압 측정 시의 리드봉 색깔을 토대로 극성 판별의 관계가 정리될 수 있었다. 즉, 전류공급을 위한 저항 측정 리드봉을 갖다대는 순간 또 다른 권선에 연결해 놓은 테스트의 DC 측정에서 (+) 방향 펄스 파형이 나타난다면 현재 접촉시킨 적색 리드봉 쪽이 서로 동일 극성의 관계에 있는 것으로 판별 되었다. 또한, 주입되는 전류에 대해 반응하는 유도전압은 멀티테스터에서 극성 판단에 충분한 크기를 나타낸다는 것을 확인하였다.

#### References

- [1] A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz, and D. S. B. Fonseca, "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no.3, pp. 595-598, 1999.
- [2] M. Zagirnyak, D. Mamchur, A. Kalinov, and A. S. Al-Mashakbeh, "Induction motors faults detection based on instantaneous power spectrum analysis with elimination of the supply mains influence," American Council for an Energy-Efficient Economy International Journal on Electrical and Power Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 7-17, 2013.
- [3] N. Mehala and R. Dahiya, "Detection of bearing faults on induction motor using Park's vector approach," International Journal of Engineering and Technology, vol. 1, no. 3, pp. 90-99, 2010.
- [4] H. Nejari and M. E. H. Benbouzid, "Condition monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a Park's vector pattern learning approach," Institute of Electrical and Electronics Engineers Transaction on Industrial Application, vol. 36, no. 3, pp. 730-735, 2000.
- [5] N. Mehala and R. Dahiya, "Rotor fault detection in induction motor by wavelet analysis," International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 1, no. 3, pp. 90-99, 2008.
- [6] H. Douglas, P. Pillay, and A. Ziarani, "Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis," Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC '03), vol. 2, pp. 923-928, 2003.