

유도기전력의 차동신호를 이용한 3상유도전동기 고정자 권선의 극성판별

최 순 만[†]

(Received September 19, 2014 ; Revised October 14, 2014 ; Accepted October 31, 2014)

Polarity discrimination of stator windings for 3 phase induction motors by using DC differential signals between mutual inductive voltages

Soon-man Choi[†]

요약: 3상유도전동기의 고정자 권선에 이상이 발생하면 직류 여자로 인한 권선 간 상호유도 응답에도 변화를 일으키므로 해당 특성을 전동기의 상태진단에 활용하는 것이 가능하다. 3상 평형 관계에 있는 고정자 권선 하나에 직류 전류를 흘릴 때 나머지 권선에서 유도되는 기전력은 항상 일치된 형태로 나타나며 이들 응답의 불일치 정도는 역으로 전동기의 이상 상태를 나타내는 척도가 된다. 과도 시 유도 기전력 간 불평형은 3상권선의 극성 결선에 오류가 있을 때 특히 크므로 기전력의 차동신호는 권선의 극성 판단 방법으로 활용하기에 적합하다. 본 연구에서는 직류 여자 신호와 이로 인한 나머지 권선에서의 유도전압 간 응답 관계를 전달함수로 나타내는 한편, 응답의 불일치 정도를 가리키는 차동 신호 전압을 멀티테스터로 측정하는 실험을 통해 권선 극성의 이상여부를 현장에서 용이하게 판단할 수 있는지를 확인하는 한편 교류여자의 경우도 함께 살펴보기로 한다.

주제어: 극성판별, 3상유도전동기, 상호유도, 차동출력

Abstract: When the stator windings of 3 phase induction motors are in wrong condition, the mutual inductive responses between windings can be utilized for the purpose of diagnosing motors in that fault windings affect even the responses by DC excitation. Three phase induction motors are supposed to generate consistent inductive voltages at the remaining windings when exciting DC current is given to one of 3 windings, while the inconsistency of their voltages indicates the existence of disorder at electric motors. This study describes how the exciting current to one of three windings cause the other windings to create induced voltages, analyzing responses by transfer functions, and discloses whether or not the balance relation at two windings is normal in the way of measuring the differential voltage of their outputs. For experiment, common analog multi-testers is used for applying exciting current and measuring the output signal to confirm whether the proposed method is useful enough to be able to discriminate wrong polarities of windings onboard vessels including also the case of exciting current by AC.

Keywords: Polarity discrimination, Three phase induction motor, Mutual induction, Differential output

1. 서론

3상 농형 유도전동기에서 고정자 권선에서의 층간 단락이나 상간 단락 및 권선 극성 연결의 오류 등은 회전자계의 형태를 왜곡시키고 선전류의 불평형을 증가시킨다^[1-3]. 이 같은 불평형 관계를 분석하여 전동기의 고장상태를 진단하는 방법에는 주로 전류와 자계의 변이를 분석하는 방식이 주류가 되어왔다^[4,5]. 한편, 고정자에서의 이상은 직류 여자전류에 의한 상호유도 특성에 비대칭적인 변화를 가져온다는 점에서 권선 중 하나에 직류 전류를 흘릴 때 나머지 권선들에서 나타나는 상호유도 전압의 응답특성을 권선 상태의 진단에 이용할 수 있다. 한 권선의 여자전류에 대한

나머지 권선에서의 기전력 응답은 건전한 전동기의 경우 시간적 변화가 서로 동일해야 한다. 따라서 과도 시 이들 기전력 간의 차동신호는 항상 0을 가리키는 반면 차동 신호가 상대적으로 크다는 것은 해당 고정자 권선이 정상적이지 않음을 반증해 준다. 특히, 극성 연결에 오류가 있는 상태이면 권선 간 직렬연결에서 나타나는 기전력의 차동 전압의 크기가 최대로 된다는 점에서 관련된 특성을 극성 연결의 오류 판별에 적용할 수 있는지를 분석해 보도록 한다.

2. 실험회로의 구성

[†] 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, Tel: 051-620-5850

2.1 직류 여자에서의 상호유도

U, V, W 고정자 권선 중 U상인 U-U' 단자에 직류 여자전류를 흘릴 때의 자속 발생 관계를 회전자를 제외한 전동기 단면에서 나타내면 **Figure 1**과 같다. 이 중 왼쪽 그림은 U단자로 전류가 들어가서 U' 단자로 나오는 경우로서 이때 고정자 내부 공간에서는 왼쪽 방향의 자속 ϕ 가 발생한다. 이 같은 자속 ϕ 의 생성은 V, W 권선에 역기전력 e_2 와 e_3 를 일으키고 권선 수 n 이면 $e_2 = e_3 = -n \frac{d}{dt} \phi(t)$ 이 된다. 또한 V, W 권선이 $2\pi/3$ 위상차를 가지므로 V'와 W'의 단자 측이 지면 밖으로 향하게 되는 동일 크기의 기전력을 발생시킨다.

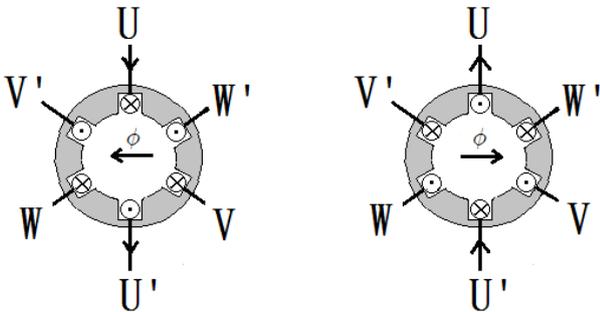


Figure 1: Induced voltages due to $\phi_{UU'}$ generation by increasing U-U' DC currents

한편, **Figure 1**의 우측 그림과 같이 U'에서 U로 여자전류가 흐른다면 자속 ϕ 는 오른쪽 방향이 되므로 V, W 상 권선에서의 기전력도 함께 역방향이 되어 여자전류의 방향에 관계없이 V, W 권선에서의 기전력 방향은 항상 일치되어 나타난다.

2.2 차동신호 출력회로

Figure 2는 전동기(IM) 고정자 권선의 U상 권선에 아날로그 멀티테스터의 저항 측정으로 여자전류 i_1 을 흘릴 때 V, W 상에서 발생하는 상호 유도 기전력 e_2 와 e_3 로부터 출력 e_0 얻기 위한 회로의 구성을 나타낸다.

V, W 단자를 연결하고 V'와 W' 단자 사이에서 전압 e_0 를 측정함으로써 e_2 와 e_3 의 차동신호가 얻어진다. r_T 는 저항 측정인 경우 리드봉 양단에서 보았을 때 아날로그 멀티테스터의 내부저항이고 r 과 R_M 는 고정자 권선의 직류저항 및 전압 측정 시의 테스터 내부저항을 나타낸다. 또한, V_T, L, M 은 테스터의 전원 전압과 고정자 권선의 자기인덕턴스 및 권선 간 상호유도인덕턴스에 해당한다. 여기에서 U, V 및 U, W 간의 상호인덕턴스를 $M_{12},$

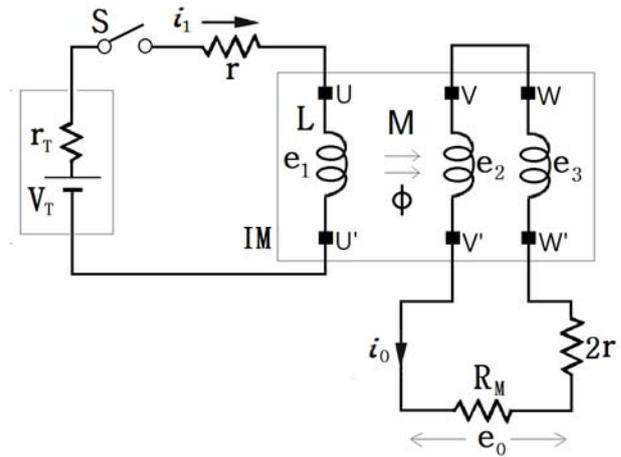


Figure 2: Circuit diagram to acquire the differential output e_0 for V and W windings

M_{13} 로 구별하면 **Figure 2** 회로에서의 전압식은 다음과 같다.

$$V_T = L \frac{di_1}{dt} + (r_T + r)i_1 + (M_{12} \mp M_{13}) \frac{di_0}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서 M_{13} 의 기호는 W 상에서 권선의 극성이 정상 연결일 때 (-) 부호이고 극성이 반대로 잘못 연결되면 (+) 부호로 작용한다. 위 식에서 $R_M \gg r, r_T$ 이고 $i_1 \gg i_0$ 이므로 우변 3번째 항의 전압을 생략하면 i_1 은 식 (2)와 같이 구해진다.

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

한편, V와 W 상의 단자 전압 e_2 와 e_3 는 **Figure 2**와 식 (2)로부터 식 (3), (4)가 된다.

$$e_2 = \mp M_{12} \frac{di_1}{dt} = \mp \frac{M_{12} V_T}{L} e^{-\frac{r_T + r}{L}t} \quad (3)$$

$$e_3 = \mp M_{13} \frac{di_1}{dt} = \mp \frac{M_{13} V_T}{L} e^{-\frac{r_T + r}{L}t} \quad (4)$$

i_1 의 전류에 대해 극성연결이 정상이면 식(3), (4)의 e_2 와 e_3 의 부호는 모두 (-)가 되므로 V', W' 측의 단자들이 (+) 방향으로 유도된다. 또한, 정상과 반대 극성으로 연결된 권선의 경우는 해당 권선의 기전력이 역방향이 되므로 부호가 반대로 작용한다.

2.3 블록선도

Figure 2의 차동신호 출력 계통에서 작용하는 입출력 관

계를 블록선도로 나타내면 **Figure 3**과 같다. 스위치 S를 투입함으로써 멀티테스터의 직류 전압이 계통에 작용할 때의 여자전류 i_1 는 식 (2)와 같으므로 정상이득 K와 시정수 T는 각각 $K=1/(r_T+r)$ 과 $T=L/(r_T+r)$ 가 된다. 또한, **Figure 2**의 관계에서 k_M 은 $R_M/(R_M+2r)$ 이다.

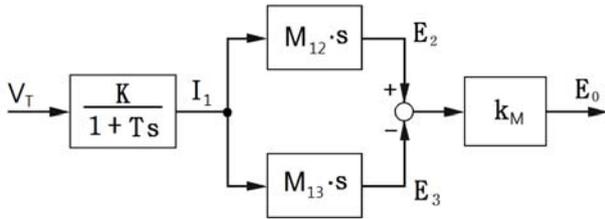


Figure 3: Block diagram for differential output

Figure 3의 블록선도에서 입출력 전달함수는 식(5)가 된다.

$$\frac{E_o(s)}{V_T(s)} = \frac{K \cdot k_M}{1 + Ts} (M_{12} \mp M_{13}) s \quad (5)$$

여기에서 올바른 극성의 연결 상태에서는 M_{12} , M_{13} 가 같은 크기로 부호가 반대이므로 상호유도계수의 부분은 서로 상쇄되어 전달함수는 0이 된다. 그러나 V와 W 권선 극성이 잘못 인식되어 역방향 관계로 연결되면 M_{12} , M_{13} 은 (+) 혹은 (-) 쪽으로 같은 부호가 되므로 스텝입력 형태로 V_T 가 주어질 때 미분형 출력신호를 발생시킨다. 또한, 전동기 용량이 클수록 권선 저항 r 은 작아지므로 K와 k_M 이 상승하여 응답 출력이 커진다는 것을 알 수 있다.

2.3 교류 여자에 의한 경우

차동신호의 출력 특성을 고려할 때 여자전류를 **Figure 2**에서의 아날로그 멀티테스터에 내장된 직류 전원을 이용하는 대신 일반 교류전원을 공급하여도 출력신호는 극성연결의 이상 여부에 따라 큰 차이를 보일 것이 유추되며 **Figure 4**는 이러한 방식의 여자전류 공급을 위한 회로를 나타낸다. 여기서 점선의 사각형은 **Figure 4**의 회로 중 여자전류 회로 외의 부분에 해당하고 리액터 X는 교류전원이 220V인 경우 전동기 권선에 흐르는 여자전류 크기를 극성판별의 목적에 적합하게 제한하기 위한 것이다.

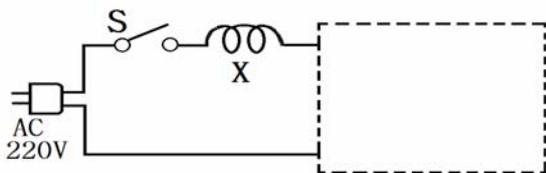


Figure 4: Circuit diagram for AC exciting current

3. 실험과 분석

3.1 실험 방법

실험을 위해 0.75kW, 4극 농형 3상유도전동기의 6개 단자를 **Figure 2**와 같이 연결하였으며 아날로그 멀티테스터로 U 상 권선에 여자 전류를 흘릴 때 V, W 상에 나타나는 과도 시 차동 전압을 계측함으로써 V, W 상의 극성 일치 여부를 구별하였다. 또한, 같은 방식으로 V 상에 여자전류를 흘릴 때 나타나는 U와 W 권선 간의 극성 일치 여부를 구별하여 3상 권선의 모두의 극성 일치 여부를 확인하였다. 여자용 아날로그 테스터의 저항 범위는 가장 많은 전류를 흘릴 수 있는 Rx1을 선택하였다. **Figure 2**로부터 V_T 는 멀티테스터 단자의 개방 전압이므로 이를 측정하면 3.25V가 되고 또한, 테스터의 영점조정 시 단락 전류가 150mA이므로 r_T 는 21.7Ω로 계산된다. 차동 출력전압 측정에는 아날로그 테스터에서 0~0.5V의 직류 전압범위를 사용하였으며 이때 지침의 최대 전류가 50μA이므로 R_M 은 10kΩ이 된다. 대상 전동기의 권선저항 r 은 13.5Ω의 값으로 측정되었다.

또한, 교류여자에 의한 응답 실험에서는 220V의 전원을 공급하였으며 **Figure 4**의 리액터 X로는 보통의 전자접촉기에 내장된 여자코일을 사용하였으며 이를 통해 전동기 고정자의 한 상 권선이 갖고 있는 임피던스 보다 훨씬 큰 값이 직렬 연결되도록 하였다.

3.2 결과와 분석

전동기 고정자 권선을 **Figure 2**와 같이 V, W 상의 단자를 연결하고 U 권선의 U 단자에 테스터의 적색 봉을 그리고 U' 단자에 흑색 봉을 접속시킨 상태에서 흐르는 여자전류 i_1 과 또한, 이로 인한 V'와 W' 간의 차동출력 신호 e_o 의 변화를 측정하면 **Figure 5**와 같다.

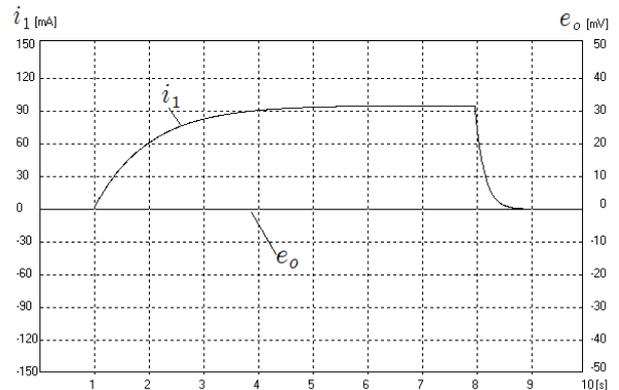


Figure 5: Result of i_1 and e_o when two windings(V and W) are in the same polarity

시간 1초 지점에서 테스터로부터 여자전류를 흘리면 전류 i_1 은 식 (2)에 의한 1차지연 형태로 정상치인 93mA까

지 상승하다가 이후 8초 지점에서 테스터와 연결을 끊을 때 다시 하강하고 있다. 이 경우 V'-W' 간에서 측정된 e_o 출력신호는 여자전류의 상승 및 하강에 관계없이 모든 구역에서 0을 가리키고 있음을 보인다. 이에 대해 Figure 6은 W 상 권선의 W 단자와 W' 단자의 연결을 반대로 연결하여 극성이 일치하지 않도록 한 상태에서의 측정 결과이다. 여자전류 i_1 의 상승 시 차동출력 e_o 는 미분파형으로 나타나고 있으며 과도 시 최대전압은 31mV를 가리킨다. 또한, 여자전류가 소멸되는 8초 시점에서는 (-)인 반대 방향의 미분파형을 발생시킨다.

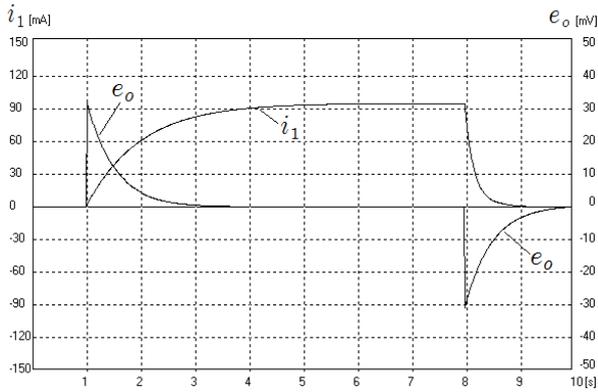


Figure 6: Result of i_1 and e_o when the polarity of W winding was reversed

미분파형이 발생할 때 아날로그 멀티테스터(DC 0~0.5V 범위)의 지침은 정상 연결과 이상 연결 상황을 구별하기에 충분한 크기의 움직임을 보였다. 따라서 이 같은 차동전압 출력 신호가 테스터에서 펄스형태로 나타나는지의 여부로 V와 W 상의 극성 일치 여부가 판단되었다.

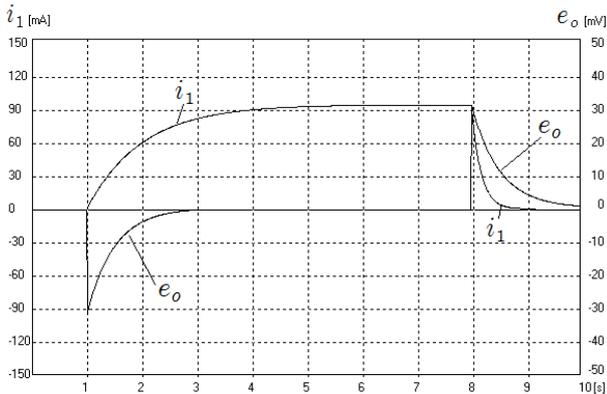


Figure 7: Results of i_1 and e_o when the polarity of V winding was reversed

또한, V 상의 권선에서 V와 V' 단자가 반대로 연결된 상태에서 차동신호를 측정하면 Figure 7과 같이 크기와 형태

는 동일하지만 파형 방향은 Figure 6의 경우와 반대로 나타났으며 이 같은 결과는 식(5)에서 M_{12} 와 M_{13} 이 앞의 경우와 반대로 작용하였음을 보인다. 마찬가지로 여자 권선을 U상에서 V상으로 바꾼 실험의 경우에서 U, W 상의 극성 일치여부가 또한 구별이 됨에 따라 모든 권선에서의 극성 연결 이상 여부가 확인될 수 있었다. 또한, 멀티테스터에 의한 여자 대신 Figure 8은 AC 220V에 의해 U 권선을 여자시킬 때 나머지 권선에서 발생하는 차동신호 응답곡선 결과로서 교류 여자전류가 0.04초 시점에서 주어지고 있다.

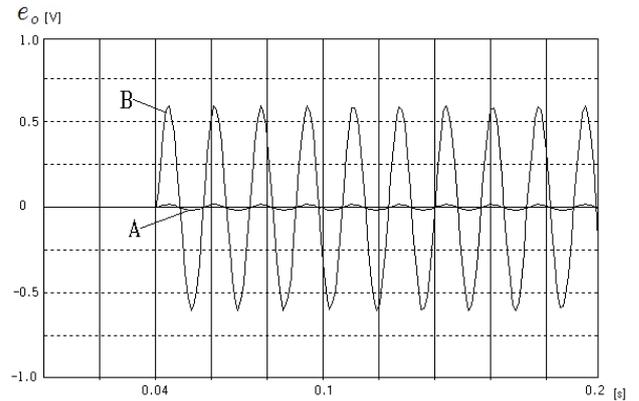


Figure 8: Responses when AC exciting current is applied

여기서 곡선 A는 권선 극성이 정상적으로 인식된 상태에서 얻어진 차동신호 측정치이고 크기가 거의 0에 가까운 신호를 나타내는 반면, 곡선 B는 그 반대의 경우로서 두 권선의 정현파 유도기전력은 서로 합성되어 상대적으로 큰 출력이 되고 있으며 디지털 멀티테스터로는 약 0.42V의 실효치 측정치를 나타내었다.

4. 결론

3상유도전동기에서 고정자 권선의 한 상에 멀티테스터로부터 여자전류를 흘릴 때 나머지 권선들에는 동일한 유도전압이 발생하는 관계를 분석하였으며 또한, 여자신호와 유도전압의 차동 출력신호 관계를 전달함수로 측정 계통의 특성을 나타내었다. 응답 특성 실험에서 이들 유도전압의 차동신호가 나타내는 신호는 정상 극성 연결 상태에서는 모두 0을 가리킨 반면 대칭적 평형 관계가 가장 크게 왜곡되는 역상 연결 상태에서는 펄스형의 큰 출력신호를 발생시켰다. 따라서 차동신호에서의 펄스형 파형 존재의 여부를 통해 극성 연결의 오류를 판별하는 것이 가능하였으며 또한 교류 여자에 의한 차동 출력에서도 마찬가지로 형태로 극성 단자의 표시가 정상인지 여부가 확인될 수 있었다. 한편, 차동 출력 신호의 크기가 0에서 벗어난 값일수록 출력 간 비대칭 정도가 크다는 것을 의미하므로 대상 전동기가 권선에서의 층간 및 상간 단락이나 혹은 회전자 공극의 불균일과 같은 고장 상태에 있다는 것이 유추되었다.

References

- [1] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," Institute of Electrical and Electronics Engineers Industry Applications Magazine, vol. 7, pp. 26-34, 2001.
- [2] M. E. H. Bendouid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, pp. 984-993, 2000.
- [3] 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.
- [4] H. Nejari and M. E. H. Benbouid, "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.