

잔류자기 유도 기전력을 이용한 3상유도전동기 권선의 극성 판별법에 관한 연구

최 순 만[†]

(Received October 15, 2014 ; Revised November 5, 2014 ; Accepted November 13, 2014)

A study on how to discriminate the polarities of stator windings for 3 phase induction motors by using induced voltages based on residual magnetism

Soon-man Choi[†]

요약: 단자 표식이 불분명한 3상유도전동기에서 고정자 권선의 극성을 판별하는 데는 외부 여자전류에 의해 유도되는 기전력 특성에 기초하거나 또는 회전자의 잔류자기를 이용하는 방법이 가능하다. 회전자의 잔류자기로 유도되는 권선에서의 기전력은 자속 크기와 수동 구동의 회전자 속도 및 위상 관계에 따라 정해지며 이 같은 극성 판별이 작업현장에서 가능하려면 기전력의 크기가 멀티테스터로 확인될 수 있는 정도이어야 하고 또한, 코일 간 위상 특성이 극성 판별에 적합해야 한다. 잔류자기에 의한 기전력들이 3상 평형 관계에 있다면 전체 합성 전압은 권선들의 극성 연결 상태가 정상일 때 0이 되어야 하는 한편, 극성 연결의 오류 시에는 상대적으로 큰 출력 전압을 나타낸다는 점에서 본 연구에서는 각 경우에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 잔류자기에 의한 판별 방식을 실험용 전동기에 적용하여 극성의 정상 및 이상 상태에서의 출력 파형을 비교함으로써 제시된 방식이 극성 판별 방법으로서 현장에서 용이하게 활용될 수 있는지를 확인한다.

주제어: 3상유도전동기, 잔류자기, 권선의 극성, 극성판별법

Abstract: To discriminate polarities of stator windings for 3 phase induction motors terminal tags of which are not readable, it is possible to utilize the residual magnetic flux present at their rotors as well as to use the way based on external exciting current. The induced voltages are basically decided by parameters such as the quantity of residual flux, the rotator speed by hand force and the phase properties between stator windings. To adopt induced voltages by residual flux for polarity discrimination at sites, the measured voltages by multi-testers need to be readable in magnitude enough to discriminate winding condition with reasonable phase characteristics. This study focuses on the analysis of various connection cases in the expectation that the summing voltages induced by residual flux shall show zero in case of normal connections while the sum becomes greater indication if the connection is in wrong condition. The proposed method is applied to actual motors to disclose how effective it is for polarity discrimination at sites through comparison of output signals between normal and fault connections.

Keywords: Three phase induction motor, Residual magnetic flux, Polarity of winding, Polarity discrimination

1. 서론

동기발전기의 경우 계사에 남아있는 잔류자기 때문에 초기 여자 없이 기동하여도 기전력이 발생하듯이 정지 중인 3상유도전동기 역시 회전자의 잔류자기가 존재하므로 이를 이용하여 기전력을 일으킬 수 있다. 3상유도전동기의 잔류자기를 적극적으로 이용하는 방식에는 SEIG(Self Excited Induction Generator)의 예를 들 수 있으며 외진 곳의 풍력발전기 시스템에서 많이 활용되고 있다[1-3]. 한편, 유도전동기의 고장진단에는 다양한 형태의 접근 방식들이 있어 왔으나 잔류자기를 전동기의 진단에 적용하려는 연구의 예는

아직 찾아보기가 어렵다[4]-[6].

잔류자기는 회전자 철심의 자기적인 히스테리시스 특성에 기인하므로 농형과 권선형 유도전동기 모두에서 전동기의 형식과 용량에 따라 일정 크기의 자속밀도를 갖는다. 잔류자기의 존재는 회전자의 축을 손으로 가볍게 돌릴 때 고정자 각 권선에서 발생하는 기전력을 멀티테스터로 측정함으로써 확인이 되며 이 같은 측정 결과는 고정자 권선의 상대적 극성일치의 여부를 판단하는 수단으로도 이용될 수 있다. 고정자 권선의 극성이 일치하지 않은 상태에서 전동기를 기동한다면 기동전류 수준의 과전류 흐름이 지속되어

[†] 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

결국 소손사고로 이어지기도 하므로 본 연구에서는 이를 방지하기 위한 현장에서의 방법으로서 잔류자기에 의한 기전력의 합성 출력을 이용하여 극성 판별이 가능하다는 것을 제시하고 있다. 잔류자기에 의한 각 상 기전력은 3상 평형 관계이므로 이들의 합성 기전력을 측정된 결과는 정상 상태에서 항상 0을 가리킨다. 이에 대해 역상 상태로 연결된 권선이 포함되는 경우는 상대적으로 큰 출력을 나타낼 것이므로 관련된 특성을 해석하여 제시된 극성 판별법이 현장에서의 활용에 적합함을 알아본다.

2. 잔류자기에 의한 기전력

2.1 각 상 기전력의 관계

회전자 잔류자기의 자속이 Φ_r [Wb]인 3상유도전동기에서 회전자 각속도가 ω [rad/s]일 때 고정자 권선에 주어지는 자속 ϕ 가 $\phi = \Phi_r \cos \omega t$ 이면 U상 권선에 유도되는 기전력 e_1 은 $e_1 = -n(d\phi/dt)$ 이다. 따라서 U, V, W 3상 권선에서 유도되는 상전압 e_1, e_2, e_3 은 식 (1), (2), (3)으로 나타낼 수 있다.

$$e_1 = \frac{\pi N \Phi_r n}{30} \sin \frac{\pi N}{30} t = E_m \sin \frac{\pi N}{30} t \quad (1)$$

$$e_2 = E_m \sin \left(\frac{\pi N}{30} t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2)$$

$$e_3 = E_m \sin \left(\frac{\pi N}{30} t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (3)$$

여기에서 n 과 N 은 권선수와 회전자의 분당회전수를 나타내고 최대치 E_m 은 $\pi N \Phi_r n / 30$ 이다. 각 권선의 극성이 정상적으로 결선된 상태에서 이들 기전력을 모두 합성하면 3상평형 관계에 있으므로 $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ 이 된다. 이에 대해 U, V, W 중 만일 V상 권선이 반대로 연결된 경우라면 e_2 의 부호가 음이 되므로 합성 전압은 식 (4)와 같아져서 단일 상전압의 2배 크기로 되고 위상은 U상에 대해 $\pi/3$ 만큼 진상이 된다.

$$e_1 - e_2 + e_3 = \frac{\pi N \Phi_r n}{15} \sin \left(\frac{\pi N}{30} t + \frac{\pi}{3} \right) \quad (4)$$

한편, 극성판별을 위해 기전력을 얻으려면 회전자를 손으로 돌려야 하고 이때의 회전속도 N 은 수십 rpm 정도로서 불규칙하다. 이러한 조건하에서도 합성 출력신호와 상전압 간의 최대치 비가 항상 일정하다는 것은 모든 연결경우에 대한 식 (5)의 편미분 결과에서도 확인이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial N} \frac{\max(\pm e_1 \pm e_2 \pm e_3)}{\max(e_1)} = 0 \quad (5)$$

합성전압의 상전압에 대한 배수관계가 회전수 N 에 영향을 받지 않음에 따라 극성연결의 이상여부를 전압 크기의 대소여부로 판단할 수 있게 된다.

2.2 합성전압의 출력

Figure 1은 고정자 권선에서의 합성전압을 출력하기 위한 회로의 구성이다. U 권선(U1, U2 단자), V 권선(V1, V2 단자), W 권선(W1, W2 단자)에서 U2, V1 및 V2, W1을 연결하면 U1, W2 단자에서는 각 권선의 유도기전력 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3$ 를 합성한 \dot{E}_0 의 출력이 얻어진다.

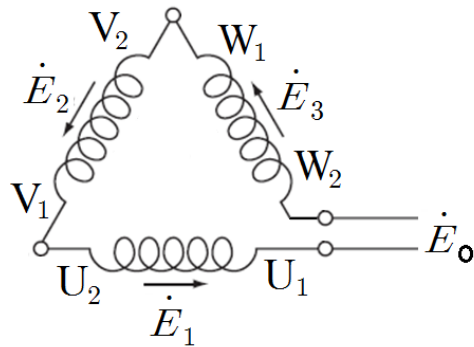


Figure 1: Relation of phase currents with V winding connected reversely

여기에서 수동으로 회전자를 일정 속도로 구동시키는 상태에서 V 권선의 극성연결이 반대인 경우라면 각 상전압은 Figure 2의 페이지 관계로 나타낼 수 있다.

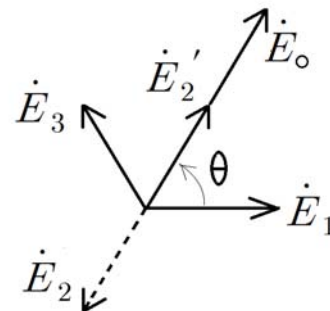


Figure 2: Relation of phase voltages and output voltage with V winding connected reversely

Figure 2에서 점선의 전압은 V 권선이 정상 극성연결일 때이고 \dot{E}_2' 는 역상 연결일 때를 나타낸다. 이 결과 \dot{E}_0 는

Table 1: Outputs of possible connection cases

	1	2	3	4	5	6	7	8
E_1	+	+	+	-	-	-	+	-
E_2	+	-	+	+	+	-	-	-
E_3	+	+	-	+	-	+	-	-
E_o	0	$2E_1$	$2E_1$	$2E_1$	$2E_1$	$2E_1$	$2E_1$	0
θ	0	$\frac{\pi}{3}$	$-\frac{\pi}{3}$	$-\pi$	$-\frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	0	0

상전압의 2배이고 U 권선 상전압을 기준으로 할 때 E_1 과의 위상차 θ 는 60도 진상이 되며 같은 방식으로 극성 연결이 가능한 8가지 모든 경우에 대해 나타내면 **Table 1**과 같다.

극성이 정상 및 역상 연결인 때를 **Table 1**에서는 (+)와 (-)로 표시하였으며 1과 8 경우 출력은 0인 반면 그 외는 모두 상전압 크기의 2배인 값을 나타내므로 극성연결의 이상여부가 크기 기준으로 판별될 수 있다. 또한, 상전압과 출력 전압 간 위상차 θ 를 오실로스코프로 측정한다면 역상으로 잘못 연결된 권선을 구별하는 것이 가능하다. 한편, 용량이 큰 전동기일수록 잔류자기 ϕ_r 가 커지므로 극성연결 오류 시의 출력은 더 큰 신호를 나타낼 것으로 유추된다.

3. 실험과 분석

3.1 실험 방법

극성연결의 이상여부를 판별하기 위한 실험용 3상유도 전동기로는 0.5HP(0.4kW) 1HP(0.75kW) 및 5HP(3.7kW)의 4극 380V 농형 전동기 3대가 사용되었다. 이들 전동기의 고정자 단자를 **Figure 1**과 같이 결선하고 회전자를 48RPM의 일정 속도로 구동시키는 조건에서 U_1 과 W_2 단자 간 전압이 정상적인 극성상태로 연결되었는지 여부의 구별이 가능한 출력 파형을 발생시키는지를 확인하였다.

3.2 결과와 분석

Figure 3은 0.5HP 전동기의 합성 전압을 측정한 그래프로서 시간 축에서 2초인 시점에 회전자를 구동한 경우이다. 여기에서 곡선 A는 극성이 모두 정상적인 경우로서 전압은 0[V]의 상태를 지속하고 있다. 이에 대해 곡선 B는 권선 한 개에서 극성이 반대로 연결된 경우의 전압 변화이며 합성 전압은 1.25초 주기의 정현파 파형으로서 최대치 전압은 19[mV]이다.

이러한 정현파 전압의 크기는 멀티테스터로도 충분히 측정될 수 있었으며 역상 권선의 위치와 개수에 관계없이 같은 정도의 크기로 파형이 검출되었다. 또한, **Figure 4**와 **Figure 5**의 곡선은 용량이 보다 큰 1HP과 5HP의 전동기에 대해 같은 방식으로 실험한 결과이다.

정상상태의 결선에서는 1HP과 5HP 모두 합성전압은 0을 나타내었으며 극성 연결이 잘못된 경우 1HP 전동기에서는

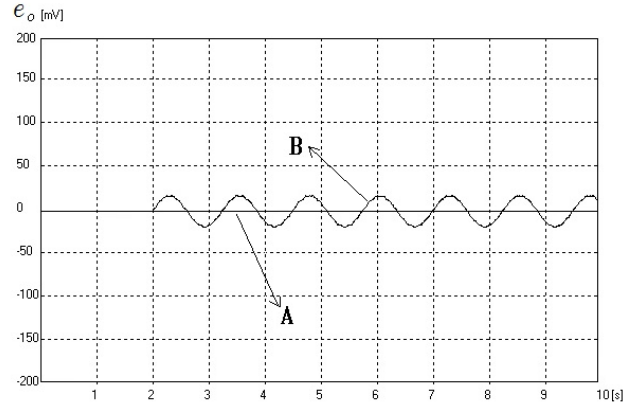


Figure 3: Results of e_o when winding connection is normal (A) and V winding is reversed (B) in polarity at 0.5HP motor

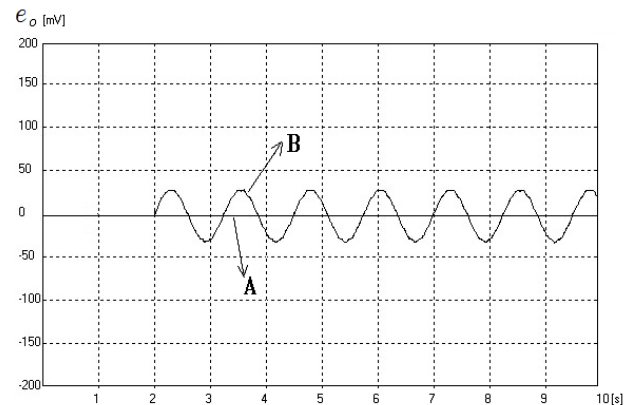


Figure 4: Results of e_o when winding connection is normal (A) and V winding is reversed (B) in polarity at 1HP motor

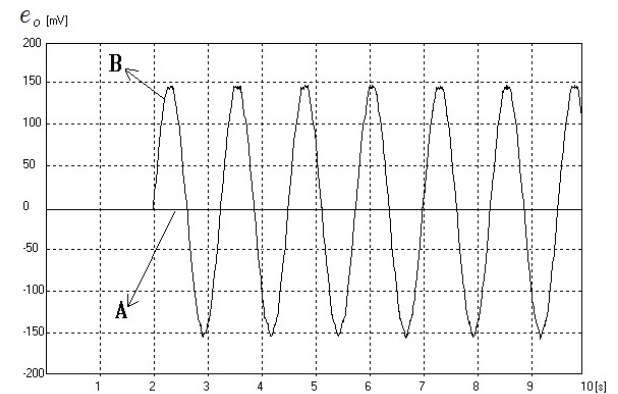


Figure 5: Results of e_o when winding connection is normal (A) and V winding is reversed (B) in polarity at 5HP motor

파형의 최대치가 32mV이고 5HP에서는 145mV의 큰 출력을 나타내었다. 용량 증가에 따라 출력 파형이 커지므로 극성의 오류 여부를 판별하기가 더 용이해진다. 또한, 큰 출력의 전동기일수록 극성 오류 시의 출력신호가 크다는 것은 대용량일수록 잔류자기가 크다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

3상유도전동기의 회전자에 존재하는 잔류자기를 이용하여 권선의 극성 연결 오류를 판별하는 방식은 별도의 전원 공급을 필요로 하지 않는다는 점에서 현장에서의 활용성이 높다. 잔류자기에 의한 유도 기전력은 3상 평형 관계이므로 권선에서의 합성 전압 측정을 통해 단자 연결의 이상 여부를 구분할 수 있는지를 알아보기 위해 관련된 특성을 여러 조건에서 분석하였다. 이 결과 역상 연결이 포함된 합성전압에서는 모두 단일 상전압 크기의 2배가 되는 신호를 출력하였으며 역상 연결 형태에 따라 상대적 위상차가 변동되었다. 또한, 실제 전동기에서 측정된 합성전압의 출력에서도 정상 극성의 연결에서 모두 0을 나타낸 반면 극성 연결이 잘못된 경우에는 예상된 크기의 큰 신호를 나타냄에 따라 멀티테스터로 판별이 가능하였으며 합성전압은 용량이 큰 전동기일수록 연결의 오류 시 큰 출력이 발생하였다. 이를 통해 제시된 판별법을 현장에서 이용함으로써 합성전압의 단순한 측정으로 권선 단자의 연결 오류에 대한 구별을 용이하게 할 수 있다는 것을 확인하였다.

References

- [1] T. F. Chan, "Capacitance requirements of self-excited induction generators," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, no. 2, pp. 304-311, 1993.
- [2] L. Wang and C. H. Lee, "A novel analysis on the performance of an isolated self excited induction generators," IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 12, no. 2, pp. 109-117, 1997.
- [3] D. Seyoum, C. Grantham, and M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 39, no. 4, pp. 939-944, 2003.
- [4] M. E. H. Bendouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, 2000.
- [5] 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.
- [6] 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.