

압축기용 집중권 BLDC 전동기의 착자 불량 진단

李光雲[†]

Magnetization Fault Diagnosis of Concentrated Winding BLDC Motors for Compressor

Kwang-Woon Lee

요 약

본 논문에서는 집중권 BLDC 전동기의 권선 착자 공정에서 발생하는 착자 불량을 진단할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 착자 불량 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 압축기를 이용한 효율 시험을 통해 권선 착자 불량이 BLDC 전동기의 에너지 효율 저감을 야기할 수 있음을 입증하였다. 제안된 방식은 착자 공정이 완료된 후에 BLDC 전동기를 구동하는 시험 과정에서 인버터를 이용하여 권선 착자 불량을 진단한다. 압축기용 BLDC 전동기에 대한 실험을 통해 권선 착자 불량을 높은 감도로 찾아낼 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

This paper presents a novel method to diagnose magnetization faults produced during magnetization process using stator coils of a brushless dc motor with concentrated windings. It is demonstrated that the stator coil magnetization faults can cause a drop of energy efficiency of the brushless dc motor through computer simulations using a magnetization fault model and efficiency test using compressors. The proposed method diagnoses the stator coil magnetization faults by using an inverter during the brushless dc motor driving test after the magnetization process is completed. An experimental study on the brushless dc motor for compressor shows that the stator coil magnetization faults can be detected with high sensitivity.

Key Words : Stator Coil Magnetization, BLDC Motor, Concentrated Winding, Compressor

1. 서 론

압축기는 냉장고 및 에어컨 등에서 냉매 압축을 담당하는 부품으로 시스템의 효율에 직접적으로 영향을 준다. 근래 에너지 효율에 대한 관심이 증가하면서 고효율 BLDC 전동기를 탑재한 압축기의 적용이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다.^[1-4]

BLDC 전동기는 고정자의 권선 방식에 따라 분포권

과 집중권 방식으로 분류되는 데, 집중권 방식의 경우 분포권 대비 동손이 적게 발생하고 생산성 및 품질 측면에서 유리하기 때문에 근래 산업계에서 널리 사용되고 있다.^[1] 냉장고 압축기 구동용 BLDC 전동기의 경우 가격이 상대적으로 저렴한 페라이트 재질의 영구자석이 주로 사용되는 데, 생산성 향상을 목적으로 전동기가 조립된 상태에서 고정자의 권선에 착자 전류를 인가하여 영구자석을 자화시키는 권선 착자 방식이 선호된다.^[3-4]

집중권 BLDC 전동기에서 권선 착자를 통해 회전자 의 영구자석을 착자하기 위해서는 회전자의 정렬 위치를 바꾸어 가면서 2번의 착자 공정을 거쳐야 한다.^[3] 첫 번째 착자 공정에서는 회전자의 영구자석이 착자되

[†]교신저자 :정회원,목포해양대 해양전자통신공학부 전임강사
E-mail : kwlee89@mmu.ac.kr
접수일자 : 2009. 1. 15 1차 심사 : 2009. 2. 18
2차 심사 : 2009. 3. 13 심사완료 : 2009. 3. 17

지 않은 상태이므로 착자 순간에 회전자에 외력이 작용하지 않는다. 그러나, 두 번째 착자 공정에서는 착자 전류에 의한 자계와 첫 번째 공정을 통해 일부 착자된 영구자석 자계 간의 상호 작용으로 인하여 착자 순간에 회전자에 큰 진동이 발생하게 되고, 이로 인해 회전자 정렬이 틀어지는 현상이 발생한다. 이때 회전자 정렬이 틀어지는 정도가 심하면 영구자석이 균일하게 착자되지 못하는 착자 불량 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 권선 착자 시스템에서 회전자를 회전시켜 특정 위치로 정렬시키는 회전 지그의 고정력을 증가시켜야 하는 데, 압축기 및 권선 착자 시스템의 구조적인 문제 및 생산성을 고려할 때 회전 지그의 고정력을 증가시키는 데는 한계가 있다. 따라서 권선 착자 공정이 완료된 후에 검사를 통해서 착자 불량을 진단하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

기존의 압축기용 집중권 BLDC 전동기의 착자상태 검사 방법을 살펴보면, 착자 완료 후에 회전 지그를 이용하여 회전자를 천천히 기계각으로 360도 회전시키면서 측정된 자속의 실효값으로 착자 이상 유무를 판단하였다. 기존 검사 방식에서 자속을 측정하는 것은 회전 지그를 이용하여 역기전력 측정이 원활한 속도까지 회전자를 회전시킬 수 없기 때문이다. 착자영구자석 재료 및 고정자의 편차, 작업 공장의 계절별 온도 변화 등을 고려할 때 영구자석이 착자된 정도를 측정된 자속의 값으로 검사하는 방식에서는 정상과 불량을 판별하는 기준을 엄격하게 적용하는 데 어려움이 따르고, 이로 인해 권선 착자 공정에서 회전자 정렬의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량을 제대로 분별하지 못하는 문제를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 압축기용 집중권 BLDC 전동기의 권선 착자 과정에서 회전자 정렬이 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량에 압축기에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션과 압축기 효율 비교 시험을 통해 평가하고, 회전자 정렬 비틀림으로 인한 착자 불량을 진단할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 압축기용 집중권 BLDC 전동기의 착자 공정 및 착자 불량 영향

압축기용 BLDC 전동기의 경우 생산성을 고려하여 미착자 상태의 영구자석을 회전자에 조립한 후에 고정자를 착자 요크(Yoke)로 활용하여 영구자석을 착자하는 권선 착자 방식이 보편적으로 적용되고 있다. 그림 1은 BLDC 전동기 착자 시스템으로, 고정자와 회전자

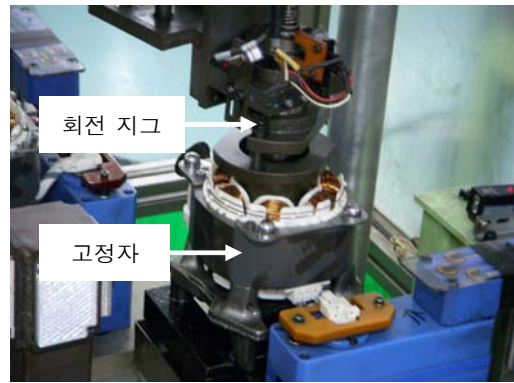


그림 1 BLDC 전동기 착자 시스템
Fig. 1 Magnetization system for BLDC motors

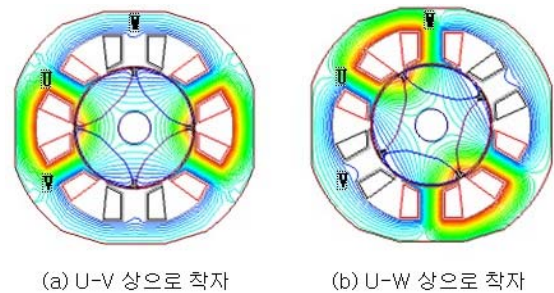


그림 2. 집중권 BLDC 전동기의 권선 착자 공정.
Fig. 2. Stator coil magnetization process of concentrated winding BLDC motors

가 조립된 상태에서 서보 모터로 구성된 회전 지그를 이용하여 회전자를 특정 위치로 정렬해 가면서 권선 착자 공정을 진행한다. 집중권 BLDC 전동기의 경우 한번의 착자 공정으로 영구자석의 완전 착자가 이루어지지 못하므로, 그림 2에 나타난 바와 같이 회전자의 위치 및 착자 결선을 바꾸어 가면서 2회의 착자 공정을 진행해야 한다. 두 번째 착자 공정에서는 영구자석이 일부 착자된 상태이므로 착자 전류에 의한 자계와 영구자석 자계 간의 상호 작용으로 인하여 착자 순간에 회전자에 큰 진동이 발생한다. 회전자 정렬에 사용되는 회전 지그는 착자 순간에 회전자를 일정 위치로 유지하는 기능도 담당하지만 두 번째 착자 공정에서 발생하는 진동에 의한 회전자의 비틀림을 완벽히 잡아주는 데는 한계가 있으며, 회전자 정렬이 틀어지는 정도가 큰 경우 착자 불량이 발생하게 된다.

두 번째 착자 공정에서 회전자의 비틀림으로 인한 착자 불량 영향을 평가할 목적으로 두 번째 착자 공정에서 회전자 정렬이 전기각으로 20도 정도 틀어졌다는 가정 하에 전자장 해석 프로그램인 JMAG을 이용

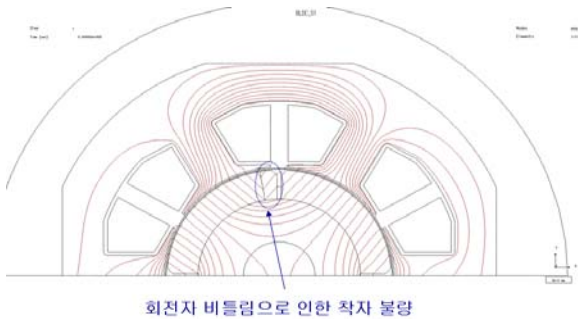


그림 3 착자 불량 BLDC 전동기의 모델
Fig. 3 Model of BLDC motor with magnetization fault

하여 그림 3과 같은 4극 6슬롯의 집중권 BLDC 전동기 모델을 만들고, JMAG-RT Coupler를 이용하여 전력전자 해석 프로그램인 PSIM에서 시뮬레이션을 진행하였다. 압축기용 BLDC 전동기는 압축기 내부가 고온, 고압의 환경이므로 홀센서 사용이 불가하여 센서리스 방식으로 구동된다. 그림 4와 그림 5는 각각 정상 및 착자 불량 모델의 BLDC 전동기에 대해 센서리스 제어를 PSIM으로 시뮬레이션한 결과이다. 착자 불량 모델(그림 3)의 경우 정상 모델에 비해 입력 전력이 증가함을 알 수 있다.

실험을 통해 PSIM 시뮬레이션 결과를 확인할 목적으로 착자 공정에서 회전자의 정렬 위치를 임의로 조정하여 고정할 수 있는 지그를 이용하여 착자 불량 BLDC 전동기를 만들고 압축기에 탑재하여 효율 시험을 진행하였다. 기계각으로 3도, 6도 정렬 오차를 가지는 BLDC 전동기 및 양산되는 정상 착자 BLDC 전동기에 대해 산포를 고려하여 각 3대씩 총 9대의 압축기를 제작하여 3,600 rpm 운전 조건으로 효율 시험을 진행하였고, 측정된 효율의 평균 값을 표 1에 나타내었다.

표 1 압축기 효율 시험 결과
Table 1 Compressor efficiency test result

전동기 종류	압축기 효율(단위: EER)
정상 착자	6.81
3도 각도 오차	6.78
6도 각도 오차	6.66

표 1에서 압축기의 에너지 효율을 표현하는 데 사용된 EER(Energy Efficiency Ratio)은 단위 시간당 압축기의 냉동 능력에 소요되는 소비 입력의 비율로 정의된다. 일반적으로 압축기의 냉동 능력은 칼로리미터를 이용하여 측정하고, 압축기의 소비 전력은 전력계를 이용하여 측정한다. 압축기 구동용 전동기의 효율은

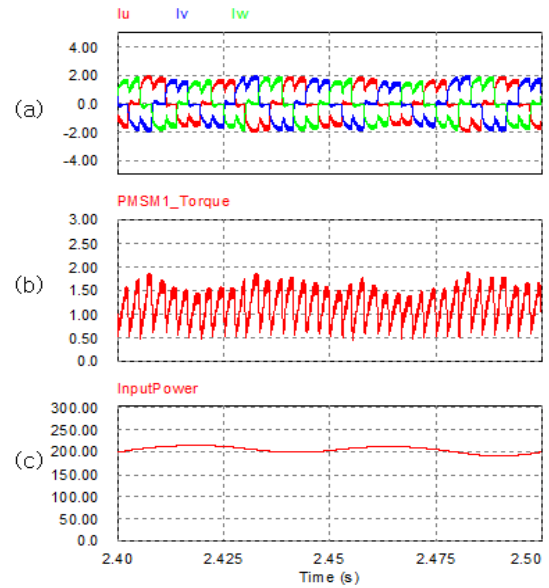


그림 4 정상 BLDC 전동기 모델의 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation result of the healthy BLDC motor model (a)Phase currents[A], (b)Torque [Nm], (c) Input Power [W]

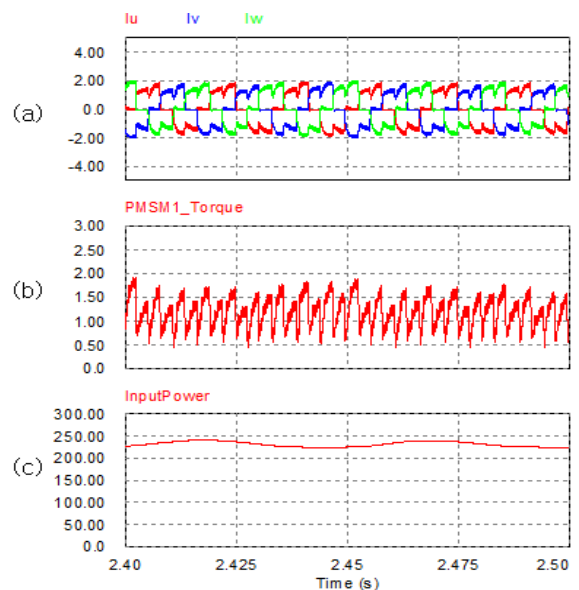


그림 5 착자 불량 BLDC 전동기 모델의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result of the BLDC motor model with magnetization fault (a)Phase currents[A], (b)Torque [Nm], (c) Input Power [W]

압축기의 효율에 직접적인 영향을 주기 때문에, 압축기의 기계 부품들이 동일하다고 가정하면 압축기의

EER 비교로 전동기 효율 변화를 간접적으로 알아낼 수 있다. 표 1에서 기계각으로 3도의 오차를 가지는 착자 불량 압축기의 경우 정상 착자 압축기에 비해 EER 단위로 효율이 0.03정도 저하되었고, 기계각으로 6도의 오차를 가지는 경우에는 효율이 0.15정도 저하되었다. 일반적으로 냉장고 압축기의 효율시험에서 EER 위로 0.05 이상 차이가 나면 변화가 있는 것으로 판단한다. 따라서 기계각으로 6도의 정렬 오차를 가지는 착자 불량 압축기의 경우 정상 착자 압축기에 비해 효율이 크게 저감되었다고 판단할 수 있다. 즉, 압축기용 집중권 BLDC 전동기의 착자 공정에서 회전자의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량은 압축기의 효율을 저감시키는 요인으로 작용하므로 착자 공정 이후의 검사 공정에서 정확하게 불량품을 선별해 낼 수 있는 검사 방법이 필요하다.

3. 착자 불량 진단 방법

그림 6은 3개의 BLDC 전동기 시료에 대해 회전자를 전동기로부터 분리한 후에 기계각으로 360도 회전시켜 가면서 가우스 미터를 이용하여 표면의 자속을 측정하는 것이다. 그림 6에서 sample 1은 정상 착자된 경우이고, sample 2는 두 번째 착자 공정에서 회전자의 정렬 위치가 기계각으로 6도의 오차를 가지도록 한 착자 불량 시료이고, sample 3은 실제 압축기 제조 공정에서 회전자 자속 기준으로는 양품으로 판정되었으나 냉장고 세트 효율 시험을 통해 불량으로 판정된 착자 불량 시료이다. 그림 7은 그림 6의 측정 결과를 이용하여 원형 다이어그램을 그린 것으로 회전자 표면에 부착된 4극의 영구자석이 착자된 형태를 보인다. 그림 6에서 sample 2와 3의 경우 sample 1에 비해 자석의 자속량이 상대적으로 균일하지 못함을 알 수 있다. 그림 7을 살펴보면, sample 3의 경우 sample 1에 비해 자석이 착자된 형태가 좀 더 비대칭적이다. Sample 3의 자속 파형으로부터 권선 착자 공정 중 두 번째 착자 공정에서 회전자 정렬이 틀어지는 현상이 발생했음을 간접적으로 설명할 수 있다.

그림 8은 정상 착자(sample 1) 및 착자 불량(sample 2) BLDC 전동기의 역기전력 파형이다. 그림 8에서 정상 및 착자 불량 BLDC 전동기의 역기전력 실효치는 각각 106.9V와 105.2V로 그 차이가 아주 작기 때문에 역기전력의 크기로는 착자 불량을 정확하게 알아낼 수 없다. 정상 착자 BLDC 전동기의 경우 역기전력의 ZCP(Zero-Crossing Point) 발생 간격이 비교적 균일한

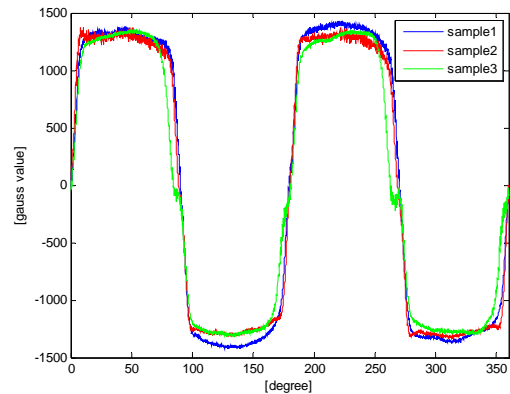


그림 6 측정된 회전자 자속
Fig. 6 Measured rotor magnet flux

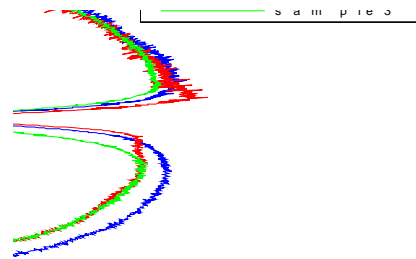


그림 7 측정된 회전자 자속의 원형 다이어그램
Fig. 7 Circle diagram of measured rotor magnet flux

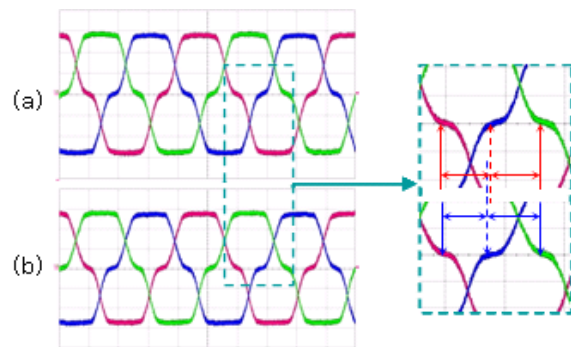


그림 8 역기전력 파형 (a):sample1, (b) sample2
Fig. 8 Back-emf waveforms (a):sample1, (b) sample2

반면에 착자 불량 BLDC 전동기의 경우에는 역기전력의 ZCP 발생 간격이 균일하지 않다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 착자 공정의 두 번째 착자 공정에서 회전자 정렬의 틀어짐으로 인해 그림 6과 7에 나타난 바와 같이 회전자 자석의 한쪽 끝 단부만 자속량

이 줄어들었기 때문에 발생하는 것이다. 역기전력이 정현적인 경우 역기전력의 ZCP는 고정자 권선을 쇠교하는 영구자석의 자속이 최대인 경우에 해당한다는 것을 고려하면 3상 권선을 가지는 BLDC 전동기에서 sample 2와 같은 착자 불량일 경우 그림 8과 같이 역기전력의 ZCP 발생 간격이 일정하지 않다는 것을 설명할 수 있다. 압축기용 BLDC 전동기의 경우 일반적으로 역기전력의 ZCP 간격이 일정하도록 영구자석 형상 및 구조를 설계한다. 또한, 제조 공정에서의 공차가 역기전력 ZCP 간격에 미치는 영향은 매우 작기 때문에 역기전력 ZCP 간격의 불균일 여부로 착자 불량 진단이 가능하다.

집중권 BLDC 전동기의 권선 착자 공정이 완료된 이후 역기전력 파형이 측정 가능한 속도로 회전자를 회전시키면서 상역기전력의 ZCP 발생 간격이 균일한가를 검사하면 회전자 정렬의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량을 정확히 진단해 낼 수 있다. 그러나 냉장고 압축기의 경우에는 BLDC 전동기의 일부만 조립된 상태에서 권선 착자 공정을 수행하므로 그림 1에 나타낸 바와 같이 착자 시스템의 회전지그를 이용하여 회전자를 일정 속도 이상으로 회전시키는 데는 문제가 있다. 권선 착자 공정이 완료된 후에는 BLDC 전동기가 압축기에 탑재된 상태에서 인버터를 이용하여 압축기를 구동하는 시험을 진행하게 된다. 본 논문에서는 인버터를 이용하여 압축기를 시운전하는 과정에서 인버터를 이용하여 착자 불량을 진단하는 방식을 사용하였다.

착자 불량 진단을 목적으로 구성된 BLDC 전동기 드라이브의 구성은 그림 9와 같다. 압축기용 BLDC 전동기는 센서리스 방식으로 구동되므로 강제 정렬과 동기 가속을 통해 회전자를 일정 속도 이상으로 가속한 후에, 그림 10과 같은 단자 전압 검출 회로를 이용하여 오픈된 상의 단자 전압 파형과 인버터 직류 단 전압을 비교하여 얻은 역기전력의 ZCP 정보를 이용하여 센서리스 제어를 수행하도록 하였다.^[1,5]

BLDC 전동기가 압축기에 탑재된 상태에서 구동되므로 저속에서는 압축기의 주기적 부하 변동에 의한 속도 변동으로 인하여 역기전력의 ZCP 발생 간격도 변화하게 된다. 따라서 압축기가 저속으로 운전될 때에는 본 논문에서 제안한 역기전력 ZCP 발생 간격 정보를 이용한 착자 불량 진단에 어려움이 따른다. 압축기의 주기적 부하 변동의 영향은 압축기가 고속으로 회전할수록 줄어들게 된다. 본 논문에서 사용한 압축기의 경우 3,000rpm 이상의 속도로 운전할 때 부하 변

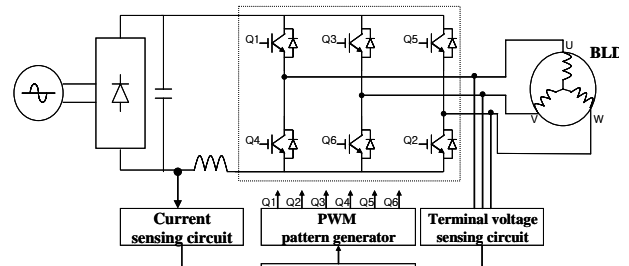


그림 9 BLDC전동기 구동장치의 구성
Fig. 9 Configuration of a BLDC motor drive

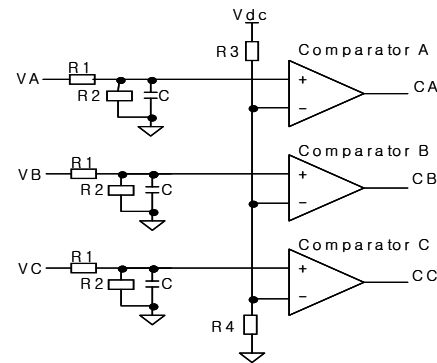


그림 10 단자전압 검출 회로
Fig. 10 Terminal voltage sensing circuit

동에 의한 전동기의 순시 속도 변동이 무시할 만큼 작은 값을 가지므로, 압축기를 3,000 rpm 으로 운전하는 상태에서 착자 불량을 진단하도록 하였다.

회전자 정렬의 틀어짐으로 인한 착자 불량 BLDC 전동기의 경우 회전 속도가 일정한 경우에도 역기전력의 ZCP 발생 간격이 일정치 않고 주기적으로 변화함을 앞에서 밝힌 바 있다. 역기전력의 ZCP 정보를 이용한 센서리스 제어 알고리즘의 동작 메커니즘을 고려할 때, 착자 불량으로 인해 역기전력의 ZCP 발생 간격이 일정치 않은 경우에는 속도 제어기와 역기전력의 ZCP 발생 간격 간의 상호 작용으로 인하여 속도 제어기의 출력에 맥동이 포함되어 결과적으로 BLDC 전동기의 속도 응답에 맥동을 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 착자 불량을 진단하는 순간에는 인버터의 PWM 시비율을 일정 값으로 고정함으로써 속도 제어에 의한 역기전력의 ZCP 발생 간격 변동을 억제하도록 하였다.

압축기 구동용 BLDC 전동기가 3,000 rpm으로 운전되고 있고, 인버터의 PWM 시비율이 일시적으로 고정된 상태에서 회전자 정렬의 틀어짐으로 인한 착자 불량을 진단하기 위한 기준 값은 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta T = |\Delta t_{zcp}(n) - \Delta t_{zcp}(n-1)| \quad (1)$$

식 (1)에서 $\Delta t_{zcp}(n)$ 과 $\Delta t_{zcp}(n-1)$ 은 각각 현재 스텝과 한 스텝 이전의 역기전력 ZCP 발생 간격이다. 정상 착자의 경우 ΔT 는 0에 가까운 값을 가지게 되고, 회전자 정렬의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량량의 경우 회전자 정렬이 틀어진 정도에 따라 ΔT 는 증가하게 된다. 따라서 ΔT 의 값을 기준으로 회전자 정렬의 틀어짐으로 인한 착자 불량량을 진단할 수 있다.

4. 실험 결과

실험에 사용된 BLDC 전동기의 사양은 표 2와 같다.

그림 11과 그림 12는 두 번째 착자 공정에서 회전자의 틀어진 정도가 기계각으로 각각 1도 및 6도(sample 2)인 착자 불량 BLDC 전동기를 압축기에 조립한 상태에서 착자 불량 진단용 인버터를 이용하여 3,000 rpm의 속도로 압축기를 구동하여 얻은 실험 파형이다. 그림 12, 13에서 역기전력 검출 신호 및 회전자 정렬이 틀어진 정도를 나타내는 ΔT 는 인버터 제어용 마이크로 프로세서에 D/A 컨버터를 인터페이스하여 출력한 파형으로, ΔT 와 회전자 정렬이 틀어진 각도 간의 관계를 그림 우측 하단에 별도로 도시하였다.

그림 11과 그림 12를 비교해 보면 회전자 정렬이 틀어진 정도에 따라 ΔT 가 거의 선형적으로 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 회전자 정렬의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량량의 진단에 있어서 ΔT 는 정확한 진단 지표로 활용이 가능하다. 그림 13은 착자 불량 BLDC 전동기(sample 3)에 대해 ΔT 를 측정된 결과로, 측정된 ΔT 로부터 착자 불량 시료임을 판단할 수 있다.

본 논문에서 실험 대상으로 한 냉장고용 압축기의 경우 착자 각도 오차가 3도 이하일 때에는 효율에 큰 변화가 없었으나, 6도 이상인 경우 효율에 큰 변화를 보였다. 따라서 ΔT 의 값이 6도 이상일 때 착자 불량으로 판단하는 기준을 세울 수 있으며, 실제 기준 값을 설정하기 위해서는 실제 제조 라인 적용을 통한 실증적인 데이터가 추가적으로 요구된다.

표 2 BLDC 전동기 사양
Table 2 Specification of a BLDC motor

고정자 권선	집중권
회전자 구조	영구자석 표면부착형
극 수	4극
정격 속도	3,600 rpm

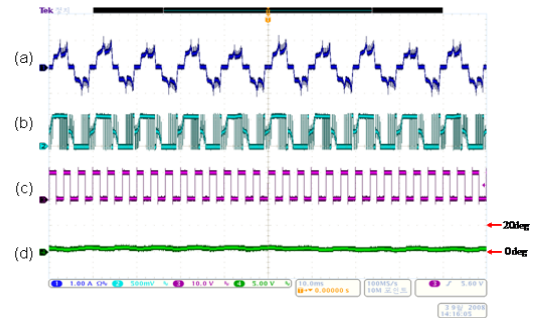


그림 11 시료 1에 대한 실험 결과
(a)상전류(1A/div.), (b)단자전압(250V/div.), (c)역기전력 ZCP 검출 신호, (d) ΔT
Fig. 11 Experimental result of sample 1
(a)phase current(1A/div.), (b)terminal voltage(250V/div.), (c)back-emf ZCP detection signal, (d) ΔT

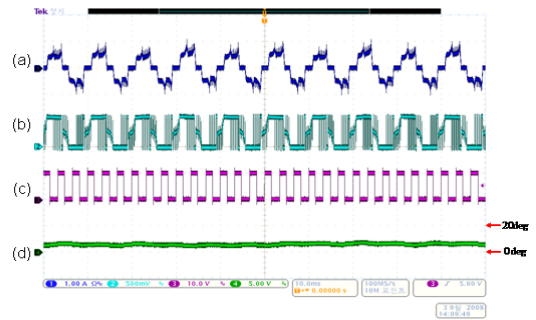


그림 12 시료 2에 대한 실험 결과
(a)상전류(1A/div.), (b)단자전압(250V/div.), (c)역기전력 ZCP 검출 신호, (d) ΔT
Fig. 12 Experimental result of sample 2
(a)phase current(1A/div.), (b)terminal voltage(250V/div.), (c)back-emf ZCP detection signal, (d) ΔT

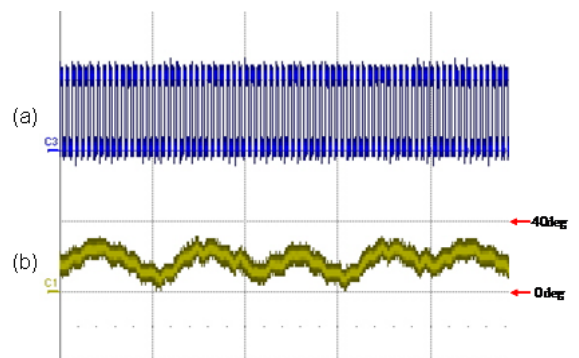


그림 13 시료 3에 대한 실험 결과
(a)역기전력 ZCP 검출 신호, (b) ΔT
Fig. 13 Experimental result of sample 3
(a)back-emf ZCP detection signal, (b) ΔT

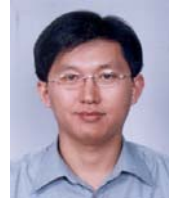
5. 결 론

본 논문에서는 압축기용 집중권 BLDC 전동기의 권선 착자 공정에서 회전자의 틀어짐으로 인해 발생하는 착자 불량이 압축기의 효율을 저하시킨다는 것을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였고, 이러한 착자 불량이 상역기전력의 ZCP 발생 간격에 주기적인 변동을 야기함을 확인하고 이를 이용하여 착자 불량을 정확히 진단해 낼 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 진단 방법은 권선 착자 공정이 완료된 이후 인버터로 압축기를 시운전 하는 과정에서 착자 불량 여부를 진단하기 때문에 별도의 검사 공정이 추가되지 않으며 단순히 인버터 소프트웨어의 변경만으로 착자 불량 진단이 가능하여 경제적이다.

참 고 문 헌

- [1] 이광운, 이준환, 최재영, “압축기용 BLDC 전동기의 센서리스 기동”, *전력전자학회 논문지*, 제11권, 제5호, pp. 440-446, 2006. 10.
- [2] 조관열, 양순배, 김학원, “랜덤 PWM을 이용한 왕복동식 압축기의 전자기 소음 저감”, *전력전자학회 논문지*, 제5권, 제2호, pp. 200-207, 2000. 4.
- [3] 안준호, 조관열, “가전제품용 BLDC 전동기의 설계 기술”, *전력전자학회지*, 제7권, 제5호, pp. 13-17, 2002. 10.
- [4] 윤중석, 김광현, “영구자석 동기전동기의 설계 및 착자기술”, *전력전자학회지*, 제7권, 제5호, pp. 18-23, 2002. 10.
- [5] 여형기, “브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구”, *고려대학교 전기공학과 박사학위논문*, 1998.

저 자 소 개



이광운(李光雲)

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2000년~2002년 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원. 2002년~2007년 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원. 2007년~2008년 고려대 BK21연구교수. 2008년~현재 목포해양대 해양전자통신공학부 전임강사.