

압축기용 BLDC 전동기의 센서리스 기동

李光雲[†], 李濬煥^{*}, 崔宰榮^{**}

Position Sensorless Starting of BLDC Motor for Compressor

Kwang-Woon Lee, Joon-Hwan Lee and Jae-Young Choi

요 약

BLDC 전동기와 같은 영구자석 전동기는 토크 각에 따라 출력 토크의 변화가 크기 때문에 원활한 기동 특성을 얻기 위해서는 회전자의 초기 위치 정보가 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 냉장고용 왕복동 압축기의 구동을 위해 사용되는 BLDC 전동기의 센서리스 구동장치에서 원활한 기동 특성을 얻기 위한 새로운 기동 제어 방식을 제안한다. 제안된 방식은 전동기의 전류 응답 특성으로부터 파악된 회전자 위치 정보를 이용하여 BLDC 전동기를 기동하는 방식으로, 압축기의 기동 부하 변동에 강인한 기동 특성을 가진다. 실험을 통하여 제안된 방식의 효과를 입증하였다.

ABSTRACT

The magnitude of output torque in a BLDC Motor depends on torque angle so that the exact initial position of rotor is essentially required for good starting. This paper presents a novel starting control method for smooth starting in a position-sensorless controlled BLDC motor drive for reciprocating compressor of refrigerator. The proposed method starts a BLDC motor using information on the initial position of rotor, determined from current response characteristics, and shows robust starting capability to starting load variations. The effectiveness of the proposed method is verified through experimental results.

Key Words : BLDC Motor, Sensorless Starting, Reciprocating compressor

1. 서 론

BLDC 전동기는 가변속 제어가 용이하고, 운전 영역 변화에 따른 효율 변화가 적은 특징을 가지고 있다. 이로 인해 고효율을 필요로 하는 가전제품에 널리 적용되고 있으며, 향후에도 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다^[1].

가전제품에서 BLDC 전동기가 적용되고 있는 대표적인 사례로서 압축기를 꼽을 수 있다. 압축기 내부는

고온, 고압의 환경이기 때문에 압축기에 사용되는 BLDC 전동기는 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어 방식으로 구동된다^[2]. 현재까지 BLDC 전동기를 센서리스 제어 방식으로 구동하기 위한 다양한 방식이 제안 되었는데, 전동기 단자 전압으로부터 역기전력의 ZCP(Zero Crossing Point) 정보를 검출하여 센서리스 제어하는 방식이 일반적으로 사용되고 있다^[2,3]. 그러나 이 방식은 역기전력 검출이 불가능한 정지 및 저속 운전 영역에서는 적용할 수 없다. 따라서 전동기의 회전자 위치를 특정 위치로 강제 정렬한 후 전동기에 인가되는 전압 및 주파수 패턴을 조절하여 동기 가속하여 센서리스 제어로 전환하는 방식이 전동기 기동을 위해 일반적으로 사용되어진다^[2]. 그러나 이러한 기동 방식은 전동기의 부하 조건에 따라 기동 전류 및 진동 등의

[†]교신저자 : 정희원, 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원

E-mail : kw_lee@samsung.com

^{*}정희원, 삼성전자 생활가전총괄 선임연구원

^{**}정희원, 삼성전자 가전연구소 수석연구원

접수일자 : 2006. 7. 25 1차 심사 : 2006. 8. 12

심사완료 : 2006. 8. 30

기동 특성이 크게 영향을 받는 단점이 있다.

센서리스 제어 방식으로 구동되는 BLDC 전동기의 기동을 원활하게 하기 위해서는 회전자 초기 위치 정보가 필수적으로 요구된다. 기존의 강제 정렬 방식은 전동기 부하, 강제 정렬 전류의 크기 및 인가 시간 등에 따라 회전자 강제 정렬이 성공 또는 실패할 수 있다. 강제 정렬이 제대로 이루어지 못한 상태에서 동기가속을 하면 모터의 기동 출력 토크가 작기 때문에 기동 실패 및 동기가속 구간에서의 과전류에 의한 토크 맥동과 진동 등을 유발할 수 있다.

BLDC 전동기의 회전자 초기 위치를 센서리스 방식으로 감지하기 위해 인덕턴스 변화 또는 자기적 포화 현상을 이용하는 방식이 제안된 바 있다^{4,5)}. 냉장고용 왕복동 압축기에 주로 사용되고 있는 BLDC 전동기는 영구자석이 회전자 표면에 부착되는 방식으로 자기적 포화 현상을 이용하여 회전자의 초기 위치를 감지할 수 있다. 그러나 고효율을 중시하는 냉장고 압축기용 BLDC 전동기에서 자기적 포화 현상을 발생시키기 위해서는 영구자석의 감자 전류를 초과하는 과전류를 공급해야 하기 때문에, 실질적으로 자기적 포화 현상을 이용한 회전자 위치 감지 방식의 적용이 곤란하다.

본 논문에서는 냉장고 압축기용 BLDC 전동기의 회전자 강제 정렬 성공 여부를 전류 응답 특성으로부터 파악하고, 회전자를 특정 위치에 성공적으로 정렬시킨 후 동기가속을 통해 BLDC 전동기를 구동하는 새로운 기동 제어 방식을 제안하고자 한다. 제안된 방식은 강제 정렬 구간에서 전류 지령과 응답간의 오차 정보를 이용하는 단순한 방식으로, 간편하게 구현할 수 있다. 실험을 통해 기존의 일반적인 기동 방식과 비교한 결과, 제안된 방식은 전동기 부하 변동에 강인한 기동 특성을 가짐을 확인하였다.

2. BLDC 전동기의 센서리스 구동 시스템

2.1 왕복동 압축기의 구조 및 동작 원리

그림 1은 냉장고용 왕복동 압축기의 구성을 나타낸다. BLDC 전동기의 회전 운동이 크랭크에 의해 피스톤의 직선 운동으로 변환되고, 피스톤의 직선 운동에 의해 실린더 내부에서 냉매의 흡입 및 압축이 진행된다. 압축기의 냉매 흡입부와 토출부의 압력이 평형 상태인 경우 BLDC 모터에 인가되는 부하 토크는 상당히 작으며, 흡입부와 토출부의 압력차에 비례하여 부하 토크는 증가하게 된다. 대부분의 경우 압축기가 기동할 때 흡입부와 토출부의 압력은 평형상태이나, 주

위 온도 등 환경적 요인과 냉장고의 사이클 제어 등의 요인에 의해 흡입부와 토출부의 압력이 불평형인 상태에서 압축기가 기동할 때도 있다.

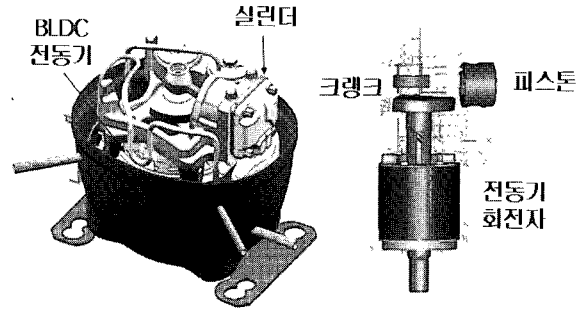


그림 1 왕복동 압축기의 구성
Fig. 1 Configuration of reciprocating compressor

2.2 센서리스 구동 시스템

압축기용 BLDC 전동기 구동 시스템에서는 단자 전압으로부터 역기전력의 ZCP 정보를 검출하고, ZCP 정보로부터 상 전환 시점을 결정하는 센서리스 제어 방식이 일반화되어 있다. 그림 2는 센서리스 BLDC 전동기 구동 시스템에서 역기전력의 ZCP와 상전환 시점간의 관계를 나타낸다. 그림 2에서 Ia, Ib, Ic는 전동기의 상전류를 나타낸다.

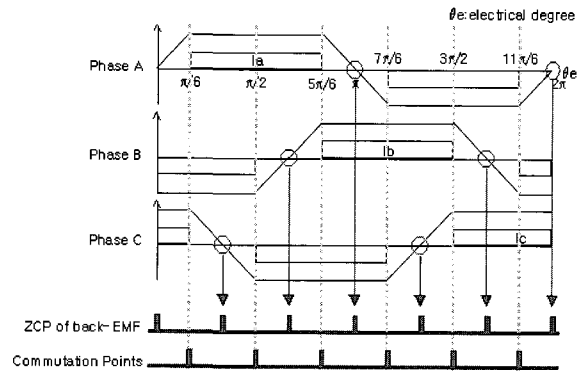


그림 2 역기전력의 ZCP와 상전환 시점

Fig. 2 Zero crossing points of back-emfs and commutation points

그림 2에서 상전환 시점(T_{cmt})은 다음과 같이 계산된다.

$$T_{cmt} = T_{zcp} + \frac{\Delta T_{zcp}}{2} \quad (1)$$

식 (1)에서 T_{zcp} 는 ZCP 발생 시점을, ΔT_{zcp} 는 ZCP 발생 시점들 간의 시간차를 의미한다.

3. BLDC 전동기의 센서리스 기동 알고리즘

3.1 일반적인 센서리스 기동 알고리즘

BLDC 전동기의 역기전력은 전동기의 회전속도에 비례한다. 따라서 전동기가 정지된 상태이거나 저속으로 회전할 때는 단자전압으로부터 전동기의 역기전력을 검출하는 것이 불가능하다. 전동기가 정지된 상태 또는 저속으로 회전할 때에도 회전자 위치 검출이 가능한 방법들이 있으나, 서론에서도 언급한 바와 같이 기술적 복잡성 및 압축기용 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 특수성으로 인하여 강제 정렬 및 동기 가속에 의한 기동 방식이 널리 사용되고 있다.

그림 3은 압축기용 BLDC 전동기의 일반적인 기동 순서를 나타낸다. 강제 정렬 단계에서는 고정자 권선에 일정 전류를 인가하여 회전자를 특정 위치로 강제 정렬시킨다. 강제 정렬 전류의 크기 및 인가 시간은 전동기 부하 특성을 고려하여 실험적으로 결정된다. 강제 정렬 이후에는 전동기에 인가되는 전압 및 주파수를 제어하여 단자 전압 파형으로부터 역기전력 검출이 가능한 속도까지 회전자를 동기 가속시킨 후, 센서리스 제어로 전환하게 된다.

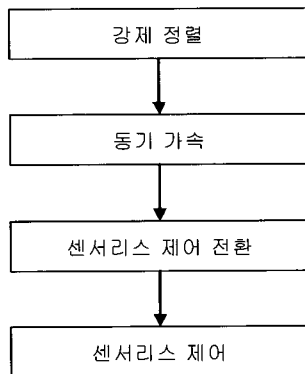


그림 3 일반적인 센서리스 기동 순서
Fig. 3 Conventional sensorless starting sequence

냉장고 압축기에 사용되는 BLDC 전동기는 대부분의 경우 압축기의 흡입 및 토출 압력이 평형이 된 상태에서 기동을 하기 때문에 기존의 방식으로도 비교적 원활한 기동이 가능하다. 그러나 온도 등 주변 환경의 변화로 인해 압축기의 흡입 및 토출 압력이 불평형인

상태에서는 압축기 내부에서 실린더 내의 냉매 가스는 피스톤에 가스 스프링 부하로 작용한다. 따라서 압축기의 흡입/토출 압력이 불평형인 상태에서는 단순히 일정 크기의 전류를 일정 시간동안 고정자 권선에 인가하는 강제 정렬 방식을 사용할 경우 강제 정렬이 실패할 가능성이 크다. 강제 정렬이 제대로 이루어지지 못하여 기동 출력 토크가 부족한 상태에서 동기 가속을 하게 되면 기동 실패 및 동기 가속 구간에서의 과전류에 의한 토크 맥동과 진동 등을 유발할 수 있다. 즉, 기존의 센서리스 기동 방식은 회전자의 강제 정렬 성공 여부를 알 수 없는 단점을 가지고 있다.

그림 4는 압축기의 흡입/토출 압력이 불평형 상태에서 기존의 기동 방식으로 기동 실패한 경우의 전류 파형이다. 그림 4의 경우 동기 가속에서 맥동 전류로 인한 토크 맥동에 의해 과도한 진동이 압축기에서 발생되고, 과전류에 의해 회전자의 영구 자석이 감자될 우려가 있다.

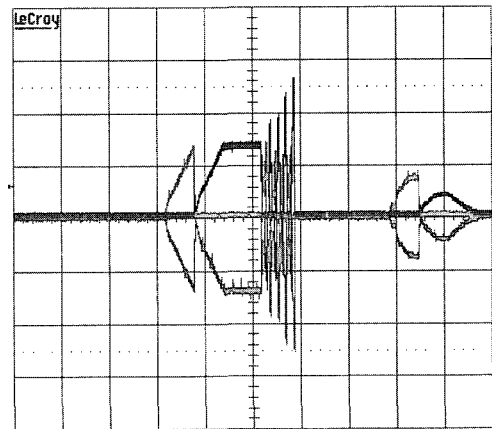


그림 4 압축기용 BLDC 전동기의 기동 전류 파형 (기동 실패 조건, 2A/div, 0.5sec/div)
Fig. 4 Starting current waveforms of BLDC motor for compressor (starting failure condition)

3.2 새로운 센서리스 기동 알고리즘

회전자 강제 정렬을 시도하면, 회전자가 정렬되는 과정에서 회전자의 움직임으로 인해 고정자 권선에는 역기전력이 발생한다. 반면, 강제 정렬이 성공한 상태에서 다시 강제 정렬을 반복하게 되면 회전자가 강제 정렬이 된 상태이므로 고정자 권선에 발생하는 역기전력의 크기는 아주 작은 값을 가지게 된다. 이러한 물리적 현상을 이용하면 강제 정렬 과정에서의 전류 응답 특성으로부터 쉽게 강제 정렬 성공 여부를 파악할 수 있다.

BLDC 전동기의 전류 제어 시스템은 그림 5와 같이 간략히 표현할 수 있다. 전류 제어기 블록을 G1, BLDC 전동기의 전기적 블록을 G2라고 하면, 전류 지령 I^* 및 역기전력 E에 대한 전류의 전달함수를 다음과 같이 이끌어 낼 수 있다.

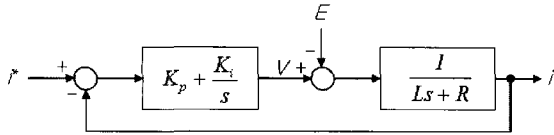


그림 5 BLDC 전동기 전류 제어 시스템
Fig. 5 Current control system of BLDC motor

$$I(s) = \frac{G1(s)G2(s)}{1 + G1(s)G2(s)} I^*(s) - \frac{G2(s)}{1 + G1(s)G2(s)} E(s) \quad (2)$$

전류제어기의 이득을 다음과 같이 설정하면,

$$K_p = L\omega_c, K_i = R\omega_c \quad (3)$$

식 (2)는 다음과 같이 표현되어진다^[6].

$$I(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} I^*(s) - \frac{s/L}{(s + \omega_c)(s + R/L)} E(s) \quad (4)$$

그림 6은 식 (4)에서 전류 제어기의 대역폭을 각각 1Hz와 10Hz로 설정했을 때, 역기전력에 대한 전류 응답 전달함수에 대한 보드 선도이다. 그림 6에서 전류 제어기의 대역폭이 1Hz일 때, 10Hz인 경우에 비해 저주파수 대역에서 이득이 다소 증가됨을 알 수 있다. 강제 정렬 과정에서 회전자의 정렬로 인해 발생하는 역기전력은 저주파수 성분의 자연 감쇄진동의 형태를 가진다. 따라서 전류 제어기의 대역폭을 작게 설정하면 저주파수 성분의 역기전력이 전류 제어기에 의해 감쇄되는 정도가 줄어들기 때문에, 역기전력은 전류 응답에 외란으로 작용하여 전류 지령과 응답 간에 오차를 발생시킨다.

그림 7은 전류 제어기의 대역폭을 2Hz로 제한시키고, 전류 지령을 2A 수준까지 서서히 증가시키면서 전류 제어를 수행하여 ac상으로 강제 정렬을 한 경우의 전류 응답을 나타낸다. 강제 정렬 과정에서 회전자의 움직임으로 인한 역기전력 성분이 전류 제어기에 외란

으로 작용하여 전류 응답에 백동이 발생함을 알 수 있다. 그림 7에서 ZCP_b는 b상의 단자전압으로부터 역기전력의 ZCP를 검출하는 회로의 출력을 나타낸다. 회전자 움직임으로 인한 역기전력에 의해 ZCP 검출 신호도 영향을 받음을 알 수 있다.

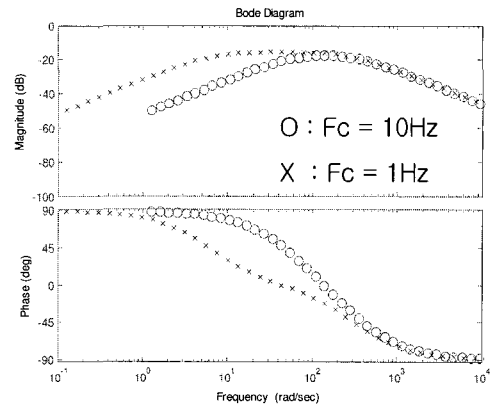


그림 6 역기전력에 대한 전류응답 전달함수의 Bode선도
Fig. 6 Bode plot of transfer function between back-emf and current response

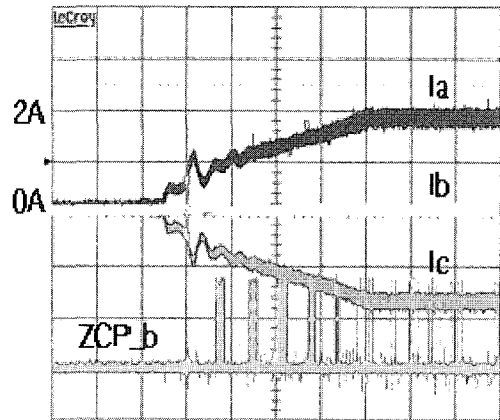


그림 7 정렬과정에서의 전류응답(1A/div, 0.1s/div)
Fig. 7 Current response during alignment (1A/div, 0.1s/div)

그림 8은 강제 정렬이 성공적으로 이루어진 상태에서 강제 정렬을 다시 반복하였을 때의 전류 파형을 나타낸다. 강제 정렬이 성공적으로 이루어진 상태이므로, 반복된 정렬 과정에서 회전자의 움직임은 발생하지 않는다. 따라서 전류 응답은 지령을 잘 추종하게 되고, ZCP 검출 신호의 출력에도 변화가 나타나지 않는다.

그림 7과 그림 8로부터 압축기 구동용 BLDC 전동기의 강제 정렬 성공 여부를 반복 정렬 과정에서의 전

류 응답으로부터 파악할 수 있음을 확인할 수 있다. 마찬가지로, 반복된 정렬 과정에서 ZCP 검출회로의 출력으로부터 강제 정렬 성공 여부를 판단할 수도 있다. 저가의 8비트 마이크로프로세서를 사용하는 경우에는 제한된 연산 속도로 인해 전류 제어가 불가능할 수도 있다. 이러한 경우에는 전술한 바와 같이 ZCP 검출 회로의 출력으로부터 강제 정렬 성공 여부를 판단하는 방식을 사용할 수 있다. ZCP 검출 회로의 출력을 이용하는 경우에는 인버터의 PWM에 의한 노이즈 신호를 ZCP 검출 신호로 잘못 인식하지 않도록 주의해야 한다.

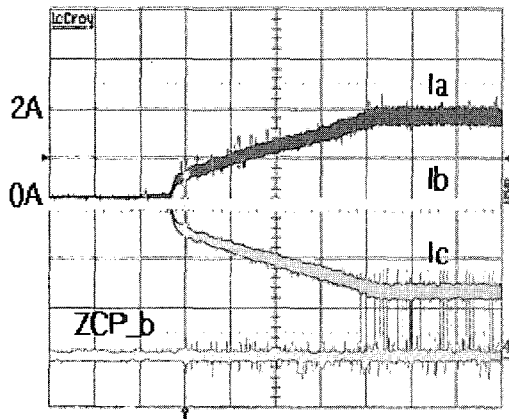


그림 8 정렬과정에서의 전류응답(1A/div, 0.1s/div)
Fig. 8 Current response during alignment (1A/div, 0.1s/div)

그림 9는 본 논문에서 제안하는 압축기용 BLDC 전동기의 기동 알고리즘을 나타낸다. 전류 제어 응답 특성으로부터 강제 정렬이 확실히 성공한 경우에 한해 동기 가속을 시작한다. 강제 정렬이 실패한 경우에는 성공할 때 까지 정렬을 반복한다. 강제 정렬 성공 여부를 파악하는 과정은 다음과 같다. 전류 제어기의 대역폭을 2Hz로 설정한 상태에서, 전류 제어를 통해 강제 정렬을 시도한다. 이때, 강제 정렬 과정에서 전류 지령에 대한 전류 응답으로부터 오차를 구하고, 오차의 절대 값들 중에서 최대의 값(E_{max})을 구한다. E_{max} 의 값이 일정 수준(Th)보다 큰 경우에는 강제 정렬이 완벽히 이루어지지 않은 것으로 판단하여 강제 정렬을 재시도하고, 작은 경우에는 강제 정렬이 성공한 것으로 판단하여 동기 가속을 통해 회전자를 역기 전력 검출이 가능한 속도까지 가속한 후 센서리스 제어모드로 전환하여 운전한다. 그림 9에서 Th 는 실험을 통해 원활한 기동이 가능한 수준의 값으로 정해진다.

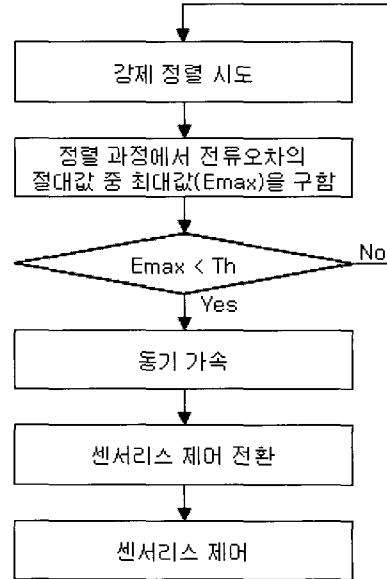


그림 9 제안된 센서리스 기동 순서
Fig. 9 Proposed sensorless starting sequence

4. 실험 결과

본 논문에서 실험에 사용한 시스템의 구성은 그림 10과 같다. 압축기 구동용으로 250W급의 4극 BLDC 전동기가 사용되었다. 압축기 토출부에 매니폴더 게이지를 부착하여 흡입부와 토출부의 압력 차이를 조절하였다.

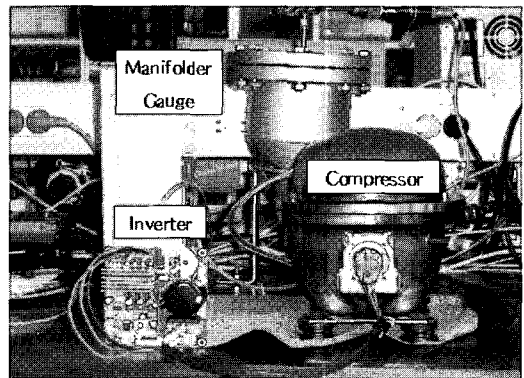


그림 10 실험 시스템의 구성
Fig. 10 Configuration of experimental system

그림 11은 매니폴더 게이지를 이용하여 흡입부와 토출부의 압력 차를 1.3kg-f/cm^2 로 유지한 상태에서, 기존의 기동 방식을 사용하여 BLDC 전동기를 기동하였을 때의 전류 파형이다. 그림 11에서 ①은 강제 정렬

구간으로, 원활한 강제 정렬을 위해 상전류를 바꾸어 가면서 2번의 정렬을 시도하였다. ②와 ③은 각각 동기 가속 및 센서리스 제어 구간을 나타낸다. 회전자 정렬이 제대로 이루어지지 못한 상태에서 동기 가속을 하였고, 이로 인해 동기 가속 구간에서 5A 정도의 과전류가 발생하여 토크 맥동을 발생시켰다.

그림 12는 압축기 흡입부와 토출부의 압력 차를 7.0kg-f/cm^2 로 유지한 상태에서, 본 논문에서 제안한 센서리스 기동 방식으로 압축기를 기동한 경우의 전류 파형이다. 그림 11과 마찬가지로 ①은 강제 정렬 구간, ②와 ③은 각각 동기 가속 및 센서리스 제어 구간을 나타낸다. 그림 12의 경우 정렬이 성공된 이후에 동기 가속을 하였고, 결과적으로 동기 가속 구간에서의 상전류도 2.5A 이하로 제한되었다. 그림 10의 실험 시스템에서, 기존의 센서리스 기동 방식으로는 최대 1.3kg-f/cm^2 의 압력 차까지만 기동이 가능하였다. 반면 제안된 기동 방식은 최대 7.0kg-f/cm^2 의 압력 차에서도 부드러운 기동이 가능하였다.

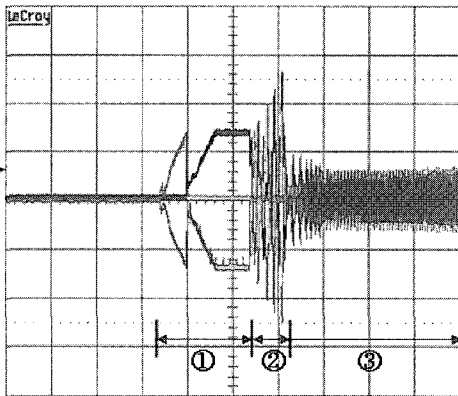


그림 11 기동 전류 파형(기존 방식)
(2A/div, 0.5s/div)
Fig. 11 Starting current waveform
(conventional method)

5. 결 론

본 논문에서는 냉장고 왕복동 압축기용 BLDC 전동기의 새로운 센서리스 기동 제어 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 BLDC 전동기의 전류 응답 특성으로부터 회전자의 강제정렬 성공 여부를 판단하고, 강제정렬이 성공된 상태에서 기동을 시작함으로써 압축기의 흡입부와 토출부의 압력이 불평형인 상태에서도 부드러운 기동 성능을 보였다.

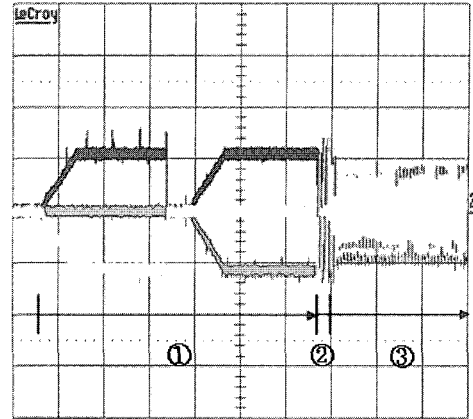


그림 12 기동 전류 파형(제안된 방식)
(2A/div, 0.5s/div)
Fig. 12 Starting current waveform
(proposed method)

실험을 통해 제안된 기동방식으로 기존의 기동방식으로 기동 가능한 최대 차압 조건의 4배 이상이 되는 차압조건에서도 기동이 가능함을 확인하였다. 따라서 차압조건에서의 기동 실패로 인한 토크 맥동 발생을 방지할 수 있다. 또한, 제안된 기동 방식은 기동 전류를 2.5A 이하로 제한함으로써 영구자석 감자의 우려를 없앴고, 전력 소자의 전류 정격을 낮출 수 있어 인버터 재료비 절감이 가능한 장점을 가진다.

참 고 문 헌

- [1] Industrial Environment Research Report for Small Motor, KETI, 2002.
- [2] 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구," 고려대학교 대학원 박사학위 논문, 1998.
- [3] KwangWoon Lee, et. al., "Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC motor drive," In Proc. PESC04, pp.1419-1423, 2004.
- [4] J.Ha, K.Ide, T.Sawa, and S.Sul, "Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial states," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no.3, pp.761-767, May/June. 2003.
- [5] S.Nakashima, Y.Inagaki, and I.Miki, "Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no.6, pp.1598-1603, Nov./Dec. 2000.
- [6] 설승기, 전기기기 제어론, 브레인코리아, 2002.

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(공박). 1999년~2000년 고려대 공학기술연구소 (Post Doc.). 2000년~2002년 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원. 2002년~현재 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원.



이준환(李濬煥)

1973년 10월 28일생. 1999년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 삼성전자 생활가전총괄 선임연구원.



최재영(崔宰榮)

1965년 5월 5일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 Virginia Tech. Electrical&Computer Eng. 졸업(공박). 1990년~1996년 LG전자 홈어플라이언스 연구소 선임연구원. 2001년~현재 삼성전자 가전연구소 수석연구원.