압축기용 BLDC 전동기의 센서리스 기동

이광운, 이준환, 최재영
삼성전자 가전연구소

Position Sensorless Starting of BLDC Motor for Compressor

Kwang-Woon Lee, Joon-Hwan Lee, Jae-Young Choi
Digital Appliance R&D Center, Samsung Electronics Co., Ltd.

ABSTRACT

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.

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 대표적 사례로서 압축기를 꼽을 수 있다. 압축기 내부는 고온 고압의 환경이기 때문에 압축기에 사용되는 BLDC 전동기는 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어 방식으로 구동된다. 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. 그러나 이 방식은 역기전력 검출이 불가능한 정지 및 저속 운전 영역에서는 적용할 수 없다. 따라서 전동기의 회전자를 특정 위치로 강제 정렬한 후 전동기에 인가되는 전압 및 주파수 패턴을 조절하여 동기 가속하여 센서리스 제어로 전환하는 방식이 전동기 기동을 위해 일반적으로 사용되어진다. 그러나 이러한 기동 방식은 전동기의 부하 조건에 따라 기동 전류 및 진동 등의 기동 특성이 크게 영향을 받는 단점이 있다.[2]

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 동기 가속을 하면 모터의 기동 출력 토크가 작기 때문에 기동 실패 및 동기 가속 구간에서의 과전류에 의한 토크 맥동과 진동 등을 유발할 수 있다.

BLDC 전동기의 회전자 초기 위치를 센서리스 방식으로 감지하기 위해 인덕턴스 변화 또는 자기적 돌극 현상을 이용하는 방식이 제안된 바 있다.[3,4] 냉장고용 왕복동 압축기에 주로 사용되고 있는 BLDC 전동기는 영구자석이 회전자 표면에 부착되는 방식으로 자기적 돌극 현상을 이용하여 회전자의 초기 위치를 감지할 수 있다. 그러나 고효율을 중시하는 냉장고 압축기용 BLDC 전동기에서 자기적 돌극 현상을 발생시키기 위해서는 영구자석의 감자 전류를 초과하는 과전류를 공급해야 하기 때문에, 실질적으로 자기적 돌극 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 동기 가속을 통해 BLDC 전동기를 구동하는 새로운 기동 제어 방식을 제안하고자 한다. 제안된 방식은 강제 정렬 구간에서 전류 지령과 응답 간의 오차 정보를 이용하는 단순한 방식으로, 저가의 마이크로프로세서로도 쉽게 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 기동

2.1 기존의 센서리스 기동 방식

그림 1은 역기전력의 ZCP 정보를 이용한 BLDC 전동기의 센서리스 제어 방식에서 일반적으로 사용되고 있는 기동 방식의 순서도이다. 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.

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 전동기의 초기 부하가 크기 때문에 기존의 기동 방식을 사용할 경우 강제 정렬이 제대로 이

루어지 못하여 기동 출력 토크가 부족한 상태에서 동기 가속을 하게 되어 기동 실패 및 동기 가속 구간에서의 과전류에 의한 토크 맥동과 진동 등을 유발할 수 있다. 그림 2는 압축기의 흡입/토출 압력이 불평형 상태에서 기존의 기동 방식으로 기동 실패한 경우의 전류 파형이다. 그림 2의 경우 동기 가속에서 맥동 전류로 인한 토크 맥동에 의해 과도한 진동이 압축기에서 발생되고, 피크(peak) 전류에 의해 회전자의 영구 자석이 감자될 우려가 있다.

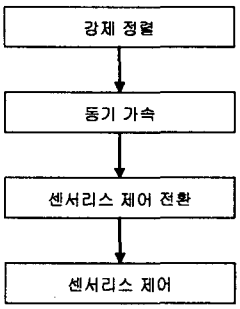

그림 1 센서리스 기동 순서도 (기존 방식)
Fig. 1 Sensorless starting flow-chart (Conventional method)

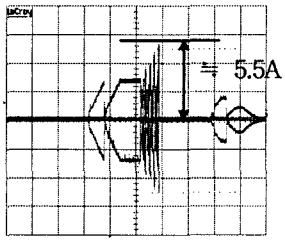

그림 2 압축기용 BLDC 전동기의 기동 전류 파형(기동 실패)
Fig. 2 Starting current waveforms of BLDC motor for compressor.(Starting fail condition)

2.2 새로운 센서리스 기동 방식

그림 3은 냉장고용 왕복동 압축기의 구조를 나타낸다. 회전자의 회전 운동은 크랭크에 의해 피스톤의 직선 운동으로 변환된다. 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. 즉, 기존의 센서리스 기동 방식은 회전자의 강제 정렬 성공 여부를 알 수 없는 단점을 가지고 있다.

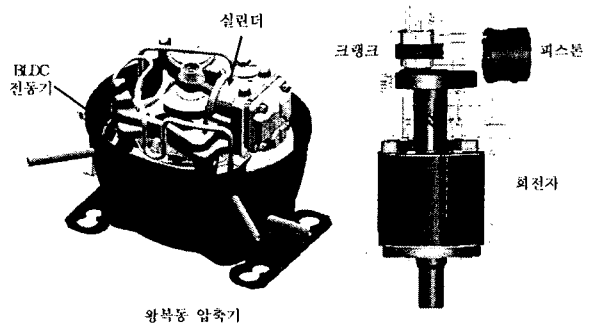

그림 3 왕복동 압축기 구조
Fig. 3 Structure of reciprocating compressor

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 블록은 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 전류 제어기 블록을 G1, BLDC 전동기의 전기적 블록을 G2라고 하면, 다음과 같은 수식을 이끌어 낼 수 있다.

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

전류 제어기의 이득을 다음과 같이 설정하면,

$$K_p=L\omega_c,\ K_i=R\omega_c \quad (2)$$

식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$I(s)=\frac{\omega_c}{s+\omega_c}I^*(s)-\frac{s/L}{(s+\omega_c)(s+R/L)}E(s) \quad (3)$$

그림 5는 식 (3)에서 전류 제어기의 대역폭을 각각 1Hz와 10Hz로 설정했을 때의 역기전력과 전류 응답간의 전달함수에 대한 보드 선도이다. 강제 정렬 과정에서 회전자의 정렬로 인해 발생되는 역기전력은 자연 감쇄 진동의 형태를 가진다. 따라서 전류 제어기의 대역폭을 작게 설정하면 역기전력은 전류 응답에 외란으로 작용하여 전류 지령과 응답 간에 오차를 발생시킨다. 그림 6과 그림 7은 각각 강제 정렬이 진행되는 과정과 강제 정렬이 이루어진 상황에서 정렬을 반복하는 과정에서의 전류 파형으로, 전류제어기의 대역폭을 작게 설정하는 경우 전류 응답으로부터 강제 정렬의 성공 여부를 파악할 수 있음을 알 수 있다.

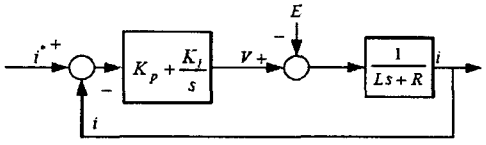

그림 4 전류 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of current controller

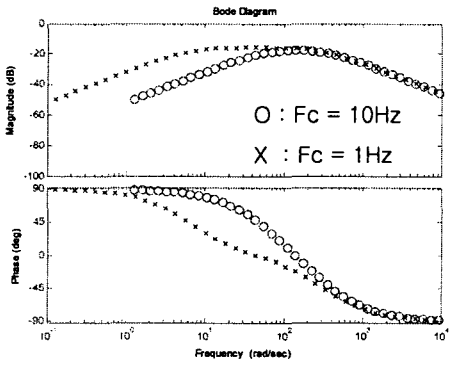

그림 5 역기전력에 대한 전류 전달함수의 보드 선도
Fig. 5 Bode plot of transfer function between back-emf and current

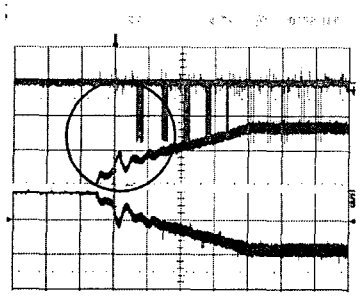

그림 6 정렬 과정에서의 전류 응답(2A/div.)
Fig. 6 Current response during alignment

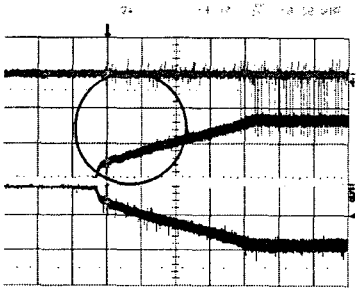

그림 7 반복 정렬 과정에서의 전류 응답(2A/div.)
Fig. 7 Current response during repeated alignment

그림 8은 본 논문에서 제안한 BLDC 전동기 센서리스 기동 방식에 대한 순서도이다. 전류 응답으로부터 강제 정렬 성공 여부를 파악하고, 강제 정렬이 성공적으로 이루어진 경우에 동기 가속을 시작하므로 전동기의 기동 출력 토크를 최대로 이용할 수 있는 장점이 있다.

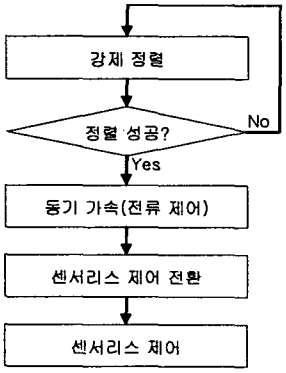

그림 8 센서리스 기동 순서도 (제안된 방식)
Fig. 8 Sensorless starting flow-chart (Proposed method)

2.3 실험 결과

본 논문에서 실험에 사용한 시스템의 구성은 그림 9와 같다. 압축기 구동용으로 250W급의 4극 BLDC 전동기가 사용되었다. 그림 10은 압축기의 토출부에 매니폴더 게이지를 부착하여 7.0kg-f/cm^{2}의 압력을 유지한 상태에서, 본 논문에서 제안한 센서리스 기동 방식으로 압축기를 기동한 경우의 전류 파형이다. 그림 10에서 ①은 강제 정렬 구간으로, 정렬이 성공되도록 2번의 정렬을 시도하였다. ②와 ③은 각각 동기 가속 및 센서리스 제어 구간을 나타낸다. 그림 9의 실험 시스템에서, 기존의 센서리스 기동 방식으로는 최대 0.7kg-f/cm^{2}의 압력까지만 부드러운 기동이 가능하였다. 반면 제안된 기동 방식은 최대 7.0kg-f/cm^{2}의 압력에서도 부드러운 기동이 가능하였다.

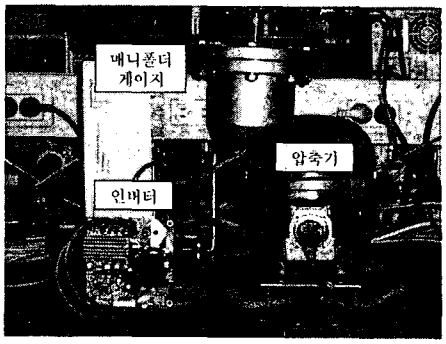

그림 9 실험 시스템의 구성
Fig. 9 Configuration of experimental system

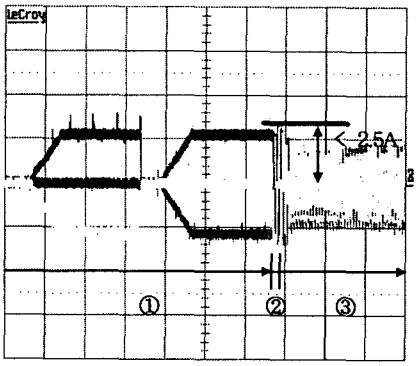

그림 10 제안된 센서리스 기동 방식의 전류 응답(2A/div.)
Fig. 10 Current response with the proposed sensorless starting method

3. 결 론

본 논문에서는 냉장고 왕복동 압축기용 BLDC 전동기의 새로운 센서리스 기동 제어 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 기존의 기동 방식 대비 부하 변동에 강인한 기동 성능을 가진다. 기동 과정에서 발생할 수 있는 과도한 피크 전류를 억제할 수 있어, 과전류에 의한 영구자석 감자 우려가 없다. 또한, 전력 소자의 전류 정격을 줄일 수 있어 인버터 재료비 절감이 가능하다.

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] 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/Jun. 2003.

[4] 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.