

풀 브리지 인버터 기반 단상 유도전동기의 소프트 기동 기법

Soft Start-up Algorithm of Single-Phase Induction Motor Based on Full-bridge Inverter

김 태 성*, 강 형 도*, 황 선 환*★

Tae-Seong Kim*, Hyung-Do Kang*, Seon-Hwan Hwang*★

Abstract

This paper proposes an algorithm for reducing the starting current when the single-phase induction motor starts and analyzes its operation. Generally, the single-phase induction motors require several starters to generate the starting torque due to their structural characteristics. In this paper, a capacitor-start / capacitor-run method of the single-phase induction motor is basically adopted. This conventional method is efficient and has a large starting torque, but it generates about 5 ~ 6 times of inrush current at startup. As a result, the freezer starting device and peripheral devices are damaged and life time may be reduced. To reduce the inrush current, the current control algorithm based on the virtual dq model is presented to control the starting current. In addition, it validates the proposed algorithm through experiments to smooth transit from start-up operation to the rated operating region.

요 약

본 논문은 단상 유도전동기의 기동 시 발생하는 기동전류를 분석하고 이를 저감하기 위한 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 단상 유도전동기는 구조적인 특성으로 인해 기동토크를 발생시킬 수 있는 별도의 기동장치가 요구된다. 본 논문에서 사용되고 있는 방법은 커패시터-기동/커패시터-운전 방식이며 타 방식 대비 기동토크가 크고 운전 효율이 높은 특성이 있다. 하지만 초기 기동 시 약 5~6배에 해당되는 돌입전류가 발생하며 이로 인한 초저온 냉동고 기동 소자와 주변기기들의 소손 및 수명 저하의 원인이 된다. 기동 시 발생하는 돌입전류를 저감하기 위하여 가상 dq 모델 기반의 전류제어 알고리즘을 적용하여 기동 전류를 제한하고, 정격운전에 도달 시 상용전원과 동일한 운전조건으로 전환하기 위한 알고리즘을 실험을 통하여 그 타당성을 검증한다.

Key words : Single-phase induction motor, Soft start-up algorithm, Virtual dq -based current controller, Operation transition, Capacitor-start/capacitor-run

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

★ Corresponding author

E-mail: seonhwan@kyungnam.ac.kr. Tel: +82-55-249-2744

※ Acknowledgment

This research was supported by National Research Foundation of Korea(NRF-2017R1D1A1B03 031807).

Manuscript received Jun. 8, 2018; revised Jun. 19, 2018;

Accepted Jun. 25, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

일반적인 가전제품의 경우, 상용전원이 단상 교류 전원이므로 단상 유도전동기는 추가적인 전력 변환장치 없이 직접 사용할 수 있으며, 견고하고 유지 보수가 용의하고 비용이 저렴하여 가전제품 이외에 다양한 산업용 및 가전제품에 널리 사용되고 있다.

그러나, 단상 유도전동기는 3상 유도전동기와는 달리, 단일 위상에 의해 생성된 자기장이 고정된 상태로 유지되고, 시간에 따라 맥동하게 된다. 이로 인해 추가적인 기동장치 없이는 단독구동이 불가하다.

이러한 단상 유도전동기를 기동하기 위한 기존의 방법으로는 분상 기동, 커패시터 기동, 커패시터 운전, 커패시터-기동/커패시터-운전(CSCR) 및 셰이딩폴(SP) 방식이 있다[1],[2]. 그러나 이러한 고정식 시스템 구조의 직접 기동방법을 이용할 때 모터의 기동 전류는 정격의 5~6배 정도에 해당하는 과전류가 흐르게 되고, 이로 인해 기계적인 토크 맥동이 발생할 수 있다.

이로 인해 기동 전류를 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되었다. 첫 번째 기법으로는 자동 변압기와 권선탭 장치는 기동 전류를 제한하기 위해 단상 유도전동기에 공급되는 전압 크기를 줄이는데 사용되었다[3]. 그러나 변압기의 크기, 무게 및 비용적인 측면을 고려하면 적당하지 않을 수 있다. 두 번째 기법인 위상제어기법은 사이리스터의 전압 제어를 이용하여 큰 기동 전류를 줄이는 저비용의 효과적인 방법이다[4]. 하지만 고조파 제한 기준을 초과하는 고조파뿐만 아니라, 흡수 및 짝수 고조파를 포함하는 불연속 입력 전류 파형을 발생시키는 문제점이 있다.

따라서, 현재의 펄스 폭 변조(PWM)인버터 방식은 기존의 사이리스터 기반 전압 제어와 연관된 문제점을 극복할 수 있는 대안이 되었다. DC링크컨버터와 AC-AC컨버터와 같은 다양한 PWM 컨버터 토폴로지들이 연구되어왔다[5]-[7]. 높은 초핑 주파수에서의 PWM 동작은 작은 크기의 필터로 쉽게 제거할 수 있는 크기의 고조파를 발생시킨다[8].

본 논문에서는 PWM 인버터를 적용하여 단상 유도전동기의 출력 전류를 전역통과필터의 특성을 이용해 가상 q 축을 만들고, 가상의 dq 축 좌표변환을 이용하여 기동 시 발생하는 돌입전류를 저감할 수 있는 동기좌표계 PI 전류제어를 사용하고자 한다. 또한, 주권선 및 보조 권선의 전류를 측정하고 제어할 수 있는 경우에는 센서리스 제어방법을 적용할 수 있다[9]. 하지만 그림 1.(a)와 같은 압축기 응용시스템의 경우 모터내부에 권선이 존재함으로 불가능하다. 따라서, 센서리스 방식으로 모터의 속도를 제어하는 것은 구조적으로 불가능하다.

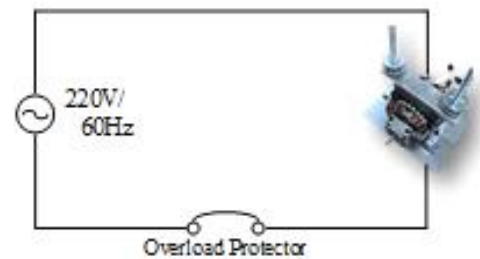
이러한 문제를 해결하기 위한 전환 알고리즘은 정상 상태에서 일정 전압 및 일정 주파수를 제어하도록 설계되었다. 제안하는 소프트 기동 알고리즘의 유용성과 유효성은 3상 유도전동기에 널리 사용되는 오픈루프 전압제어 기법과의 성능 비교를 통해 실험으로 검증하고자 한다.

II. 본론

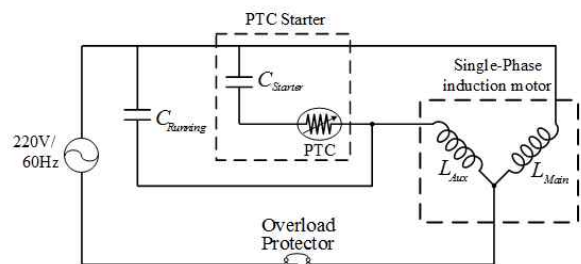
1. 단상 유도전동기용 CSCR-PTC의 구성

그림 1.(b)는 초저온 냉동고의 압축기를 제어하기 위해 단상 유도전동기를 기동하기 위한 커패시터 기동-커패시터 운전 기법의 구성을 나타낸다. 모터는 주 권선인 두 개의 고정자 권선과 PTC(Positive Temperature Coefficient) 기동기가 있는 보조권선으로 구성된다.

그림 2는 기동 시 기동 커패시터와 운전커패시터에 접속되어 높은 효율로 운전하고, 일정수치 이상의 전류 값에 도달하고 기동 시 저항이 커지면 PTC 기동기 측 전류 경로가 회로에서 분리되고 운전 커패시터만 접속되어 높은 효율에서 운전하는 것을 보여준다[1].



(a) A circuit of single-phase induction motor



(b) A detailed circuit of CSCR-PTC for single-phase induction motor

Fig. 1. Configuration of single-phase induction motor.

그림 1. 단상 유도전동기의 구성

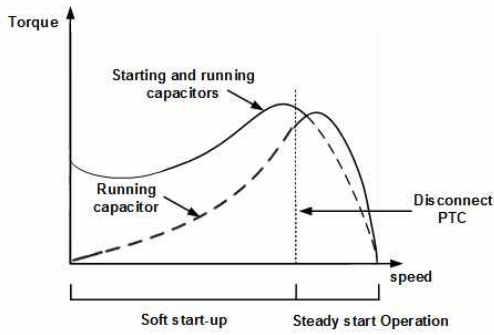
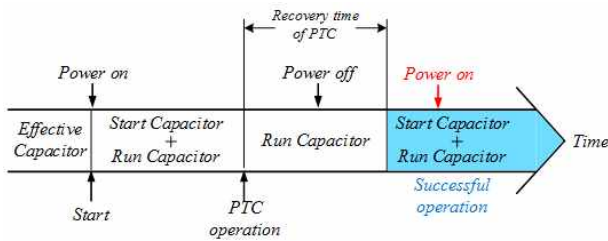
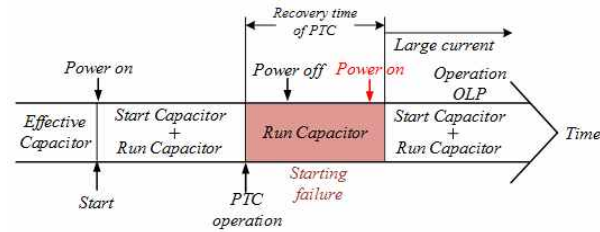


Fig. 2. Torque-speed characteristic curve of CSCR-PTC.

그림 2. CSCR-PTC의 토크 - 속도 특성곡선



(a) Normal start(Power on after PTC recovery time)



(b) Failure start(OLP operation after starting failure)

Fig. 3. Starting operation of CSCR -PTC.

그림 3. CSCR-PTC의 기동 동작

그러나, 커패시터 기동-운전 방법의 기동 전류는 전 부하 전류의 5~6배 정도가 될 수 있는데, 이 전류는 기동 시 1초 이내에 발생하며 전기 시스템과 기계 시스템의 비정상적인 동작을 유발할 수 있다. 그림 3.(a)는 커패시터 기동-운전 및 PTC의 기동 동작을 나타내는 그림이다. PTC의 복구시간 이후에 전원이 켜지면 기동이 성공적으로 수행된다. 그러나 그림 3.(b)에서와 같이 PTC를 복구하기 전에 시스템을 시작하려고 할 때에는 가동 중인 커패시터만 사용할 수 있기 때문에 기동이 실패하게 된다. 이 경우, OLP(Over Load Protector)는 장시간 유지되는 큰 전류를 차단하기 위해 정상적으로 10~20초 동안 동작하며 시스템에 전기적, 기계적인 손상을 유발할 수 있다.

따라서, 단상 유도전동기를 기동할 때의 돌입전류를 개선해야한다.

2. 제안된 소프트 기동 및 운전모드 전환 기법

가. 소프트 기동 기법

그림 4는 단상 유도전동기 구동을 위한 전력변환 장치를 보여주고 있다. 전체 시스템은 단상 전파 정류회로, 직류단 및 단상 풀 브리지 PWM 인버터로 구성되어 있다. 단상 유도전동기의 상전류 정보를 이용해 가상 dq모델 생성을 위한 좌표변환 부, 인가되는 전압의 위상을 검출하여 정속운전 전환시 기준 각을 만들어 주기 위한 위치추정 알고리즘, 만들어진 가상의 dq모델 전류를 제어하기 위한 PI 전류제어기, 제어기를 거쳐 최종적으로 출력되는 PWM 신호를 만들어주는 정현파 PWM 블록으로 이루어짐을 알 수 있다.

(1) 가상 dq모델 생성

단상 유도전동기로부터 검출한 상전류를 동기좌표계로 변환하기 위해서 그림 5의 보드선도로 알 수 있듯이 운전주파수가 변하여도 이득은 '1'이고 위상차이만 90° 지연되는 전역통과필터를 사용하여 가상의 dq모델을 구할 수 있다. 전역통과필터의 전달함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

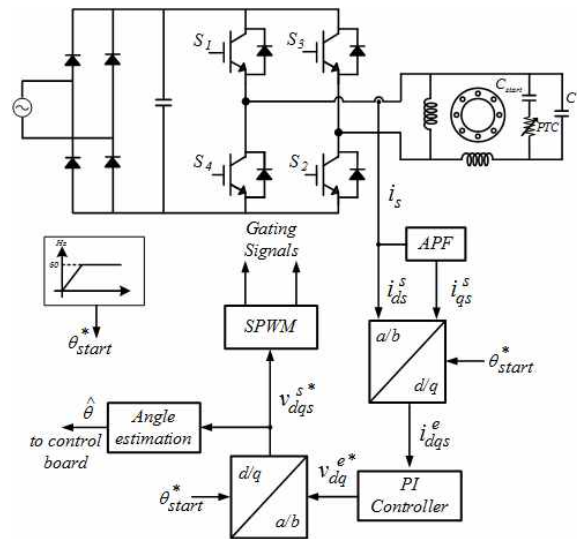


Fig. 4. An overall system block diagram of the proposed algorithm.

그림 4. 제안하는 알고리즘의 전체 시스템 블록도

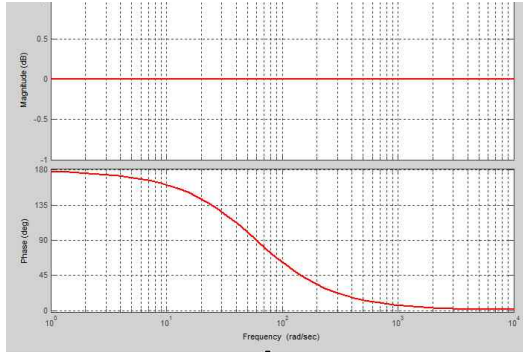


Fig. 5. Bode plot of all pass filter.
그림 5. 전역통과필터의 보드선도

$$G_{APF}(s) = -\frac{s - w_c}{s + w_c} \quad (1)$$

여기서, w_c : 차단 주파수

전역통과필터를 거쳐 생성된 정지좌표계 dq 축 전류는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_m \sin\theta_0 \\ I_m \cos\theta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, w_c : open loop V/F위상각

정지좌표계 dq 축 전류는 식 (3)의 좌표변환을 통해 동기좌표계 dq 축 전류로 변환되며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고 최종적으로 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds}^s \cos\theta_0 + i_{qs}^s \sin\theta_0 \\ -i_{ds}^s \sin\theta_0 + i_{qs}^s \cos\theta_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 가상 dq 모델 PI 전류제어기

그림 6은 단상 유도전동기의 기동을 위한 가상 dq 모델 전류제어 알고리즘 블록을 나타낸다. 검출한

상전류 i_s 를 전역통과필터를 통해 90° 지연된 가상 q 축 전류 i_{qs}^s 를 생성하고, 좌표변환을 통해 i_{ds}^e 와 i_{qs}^e 로 변환 후에 PI 제어기를 통해 제어된다. i_{ds}^e 는 '0'으로 제어되고 i_{qs}^e 는 PTC의 동작 기준에 따라 기동 시 돌입전류 보다 낮고, 최소 기동토크를 유지할 수 있는 크기로 제어된다. 제어기 출력인 전압지령 v_{ds}^{e*} 와 v_{qs}^{e*} 는 역변환을 통해 v_{ds}^{s*} 와 v_{qs}^{s*} 로 변환되고, v_{ds}^{s*} 는 정현파 PWM의 전압 지령값으로 사용되며 정속운전 전환 시의 전압 제어의 위상을 추정하는데 사용된다.

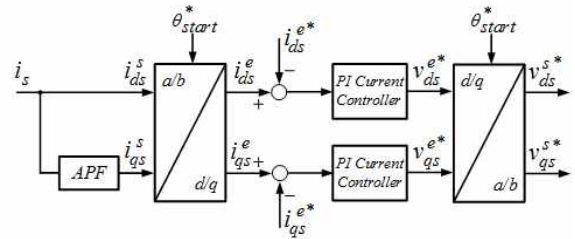


Fig. 6. PI current controller of virtual dq model.
그림 6. 가상 dq 모델 기반 PI 전류 제어기

나. 정속운전 전환 알고리즘

실험대상인 초저온 냉동고는 일반적으로 상용 주파수인 50[Hz] 또는 60[Hz]에서 일정 속도로 동작한다. 따라서, 단상 유도전동기는 운전시작 후 정상상태 운전영역에서는 일정전압 일정주파수에서 동작해야한다.

기동 후에 정상동작 모드에서 단상 유도전동기를 동작시키기 위해 더 작은 실제전류가 요구 되더라도 전류 제어기의 전류지령이 유지되면 전류 제어가 포화상태가 된다. 결과적으로, 모터가 이미 구동 중일 때 PTC가 동작하여 운전 전류가 제어기의 지령 전류보다 작아지므로 오차가 커져 제어 전압이 상승하게 되어 부적절한 운전을 하게 된다. 이러한 원인이 소프트 기동과 일정전압/일정주파수(CVCF) 구간 사이에 모드전환 알고리즘이 필요한 이유가 되고, 전압 출력과 위상각이 제어기의 목표 전압과 동일해야한다.

본 논문에서는 제어기의 전압 출력과 위상각을 동일하게하기 위해 arctangent 기반 PLL(Phase Lock Loop)방법을 사용한다[10]-[16]. 그림 7은 소프트 기동 제어 및 정속운전제어를 포함하는 단상

유도전동기의 전체 블록도를 나타낸다. 전역통과 필터는 전류제어기의 출력전압과 90°위상 차이를 가지는 v_{qs}^{s*} 를 생성하는데 사용되고, 위상각은 생성된 arctangent 값으로 추정할 수 있다. 운전모드 전환은 전류제어기 목표 전압이 220[Vrms]에 도달하기 전에 수행된다.

3. 실험 결과

그림 8은 초저온 냉동고, 전력변환시스템 및 제어 보드를 나타낸다. 실험에 사용된 단상 유도전동기는 커패시터 기동-커패시터 운전방법을 기반으로 하고, 풀 브리지 PWM 인버터는 5[kHz]의 스위칭 주파수를 가지는 IGBT 모듈에 의해 구성된다. 단상 유도전동기의 사양은 표 1과 같고 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 제어 알고리즘을 구현하였다.

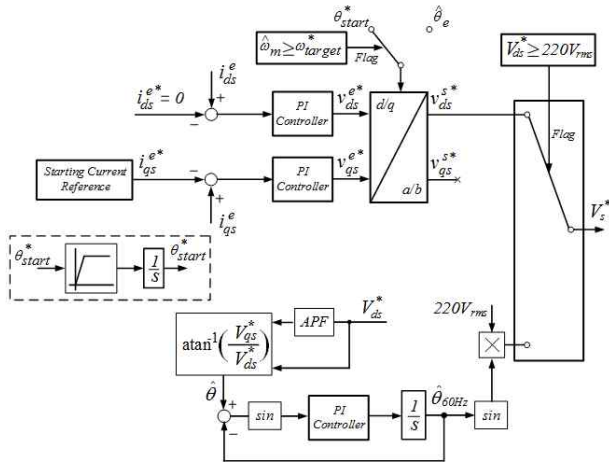
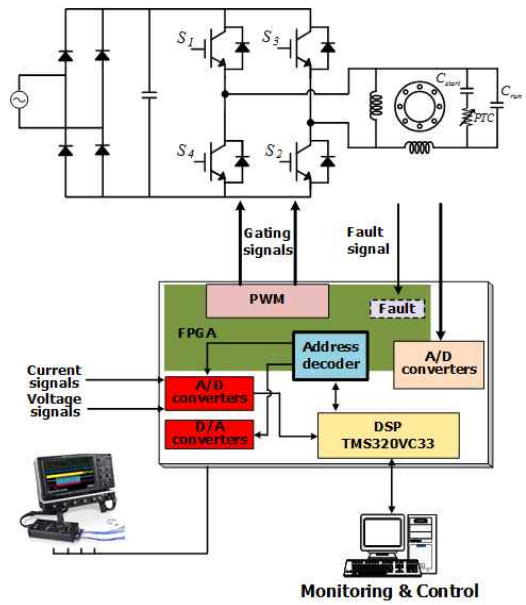


Fig. 7. An overall control block diagram of single-phase induction motor.

그림 7. 단상 유도전동기 제어 시스템의 전체 블록도



(a) A picture of experimental setup



(b) A block diagram of experiment set

Fig. 8. An overall driving system of single-phase induction motor.

그림 8. 단상 유도전동기의 구동 시스템

Table 1. Specifications of single-phase induction motor.

표 1. 단상 유도전동기의 사양

Parameters	Value	Unit
Max Winding Resistance	4.7	ohm
Aux. Winding Resistance	21.97	ohm
Main. Winding Inductance	230	mH
Aux. Winding Inductance	260	mH
Running Capacitor	10	uF
Starting Capacitor	75	uF
Maximum Power	1040	W
Rated Power	260	W
Rated Frequency	60	Hz

실험에 사용된 단상 유도전동기의 기동방법은 직접기동, 전압제어 및 가상 dq모델 PI 전류제어로 구성된다.

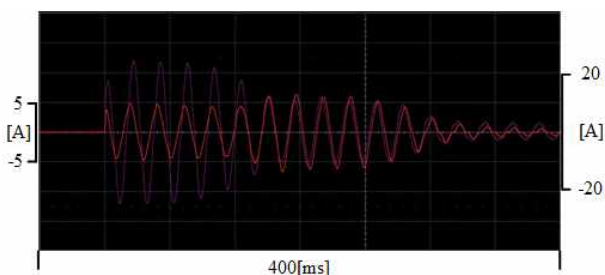
직입기동 방식에서는 기동 전류가 고정회로에 의해 결정되며 큰 기동전류가 발생한다. 그림 9는 -60[°C]에서 -40[°C]에서의 초저온 냉동고의 실내 온도변화에 따라 단상 유도전동기가 직접 기동될 때의 실험결과를 보여주는데, 순간적인 입력전류는 약 24[A]이며, 기동권선에는 약 6[A]로 높은 전류로 인해 시스템이 손상될 수 있다.

전압제어 방식으로는 가변전압/가변주파수제어(VVVF)와 가변전압/일정주파수제어(VVCF)로 구성된다. 이러한 방법은 전압 제어를 통해 간접적으로 기동 전류를 줄여준다. 그림 10은 전압 제어가 적용될 때의 기동전류를 보여주는데, VVVF 제어방식은 기동 시 순간적인 입력전류가 약 58% 저감되고 VVCF 제어방식은 약 33% 저감되는 것을 확인할 수 있다.

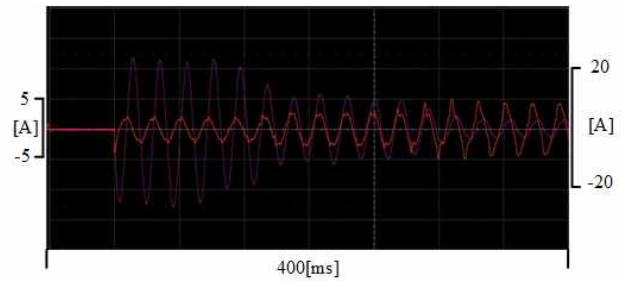
그림 11은 본 논문에서 제안한 기동전류 저감 알고리즘을 적용한 결과이며, 각각 정지좌표계 전류파형, 인버터 출력전류 및 기동권선의 전류를 측정하였다. i_{ds}^s 대비 i_{qs}^s 가 기동과 동시에 90° 위상차를 가지며 생성되는 것을 확인할 수 있고, 기동 시간은 약 2.2[sec]이며 돌입전류가 직입 기동방식에 비해 전체 입력전류가 25%이상 감소한 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 각각 동기좌표계 전류 파형, 인버터 출력 전류 및 기동권선의 전류를 측정하였다. i_{ds}^e 는 '0'으로, i_{qs}^e 는 기동 시 돌입전류보다 낮고 최소 기동토크를 유지할 수 있는 최소값인 16[A]로 제어됨을 알 수 있다.

그림 13은 정속모드 전환을 위해 위상각 생성 파형을 나타낸다. 그림 13.(a)는 기동 시 위상각(파랑) 추종을 보여주며, 그림 13.(b)는 모드 전환 후 추종된 위상각(파랑)을 이용해 전환을 한 뒤의 파형이며 추종된 위상각과 그 위상을 이용한 전류 지령(빨강) 및 전류 프로브로 측정한 실제전류(초록)이다. 파형에서 나타나듯이 기동 전류 제한 알고리즘을 따라서 각을 추종하고, 전환시점에 가까워지면 60[Hz]의 각을 만들어낸다. 만들어진 위상각과 지령 전압조건이 만족될 때 운전모드의 전환을 시작하여 상용전원과 동일한 조건으로 전환하게 된다.



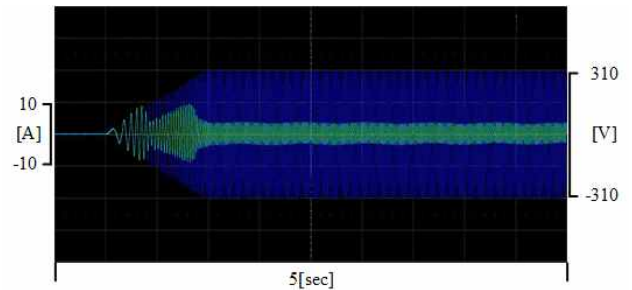
(a) Input current and starting winding current



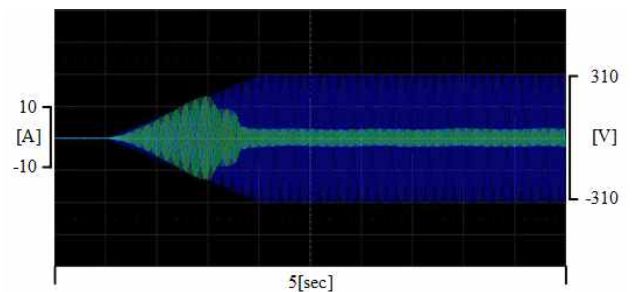
(b) Input current and auxiliary winding current

Fig. 9. Direct entry AC power. (a) Input current and starting winding current. (b) Input current and auxiliary winding current.

그림 9. 직입기동 시. (a)입력 전류 및 기동권선 전류, (b) 입력전류 및 보조권선 전류



(a) VVVF



(b) VVCF

Fig. 10. In applying the voltage control algorithm. (a) VVVF, (b) VVCF.

그림 10. 전압제어 알고리즘 적용 시. (a) 가변전압/가변주파수제어, (b) 가변전압/일정주파수 제어

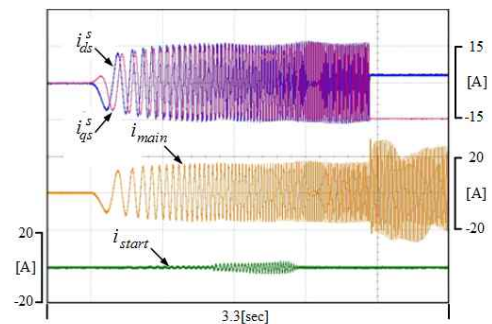


Fig. 11. In applying the starting current reduction algorithm, stationary reference frame dq current, input current and starting current.

그림 11. 기동 전류저감 알고리즘 적용에 따른 정지좌표계 dq 전류, 입력 전류 및 기동전류

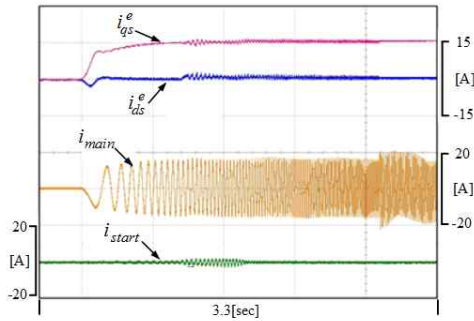
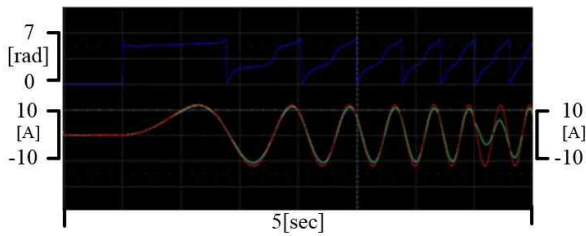
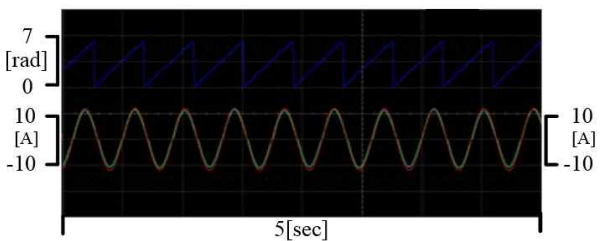


Fig. 12. In applying the starting current reduction algorithm, synchronous reference frame dq current, input current and starting current.

그림 12. 기동 전류저감 알고리즘 적용에 따른 동기좌표계 dq 전류, 입력 전류 및 기동전류



(a) Operation mode following tracking angle



(b) Tracking angle after operation transition

Fig. 13. Phase angle generating waveform for constant speed mode conversion. (a) Operation mode following tracking angle, (b) Tracking angle after operation transition.

그림 13. 정속모드 전환을 위한 위상각 생성 파형. (a) 기동 시 추종각, (b) 전환 시 추종각

III. 결론

본 논문에서는 초저온 냉동기의 기동전류 저감을 위해 가상 dq 모델 기반의 새로운 소프트 기동 알고리즘을 제안한다. 또한, 기동 후 정상상태 운전 영역에서 일정전압/일정주파수(CVCF) 동작을 위해 운전모드 전환 알고리즘이 제시되었다. 단상 유도전동기 구동 시스템을 검증하고 실현하기 위해 초저온 냉동고가 사용되었으며, 제안된 소프트 기동 및 전환 알고리즘의 유용성을 다양한 실험 결과를 토대로 타당성을 검증하였다.

References

[1] C. J. KIM, C. Y. Choi, D. E. Lee, G. S. Choi, and S. H. Beak, "Torque characteristics of single phase induction motor for phase control method", in *Electrical Machines and Systems, 2003 ICEMS*, 2003, pp. 510-513. DOI: 10.1109/ICEMS.2003.1274093

[2] E. Muljadi, Y. Zhao, T. H. Liu, T. A. Lipo, "Adjustable ac capacitor for a single-phase induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, No. 3, 1993, pp. 479-485. DOI: 10.1109/28.222415

[3] F. M. Bruce, R. J. Graefe, A. Lutz and M. D. Panlener, "Reduced-voltage starting of squirrel-cage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-20, No. 1, 1984, pp. 46-55. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504374

[4] V. V. Sastry, M. R. Prasad and T. V. Sivakumar, "Optimal soft starting of voltage-controller-fed IM drive based on voltage across thyristor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, No. 6, 1997, pp. 1041-1051. DOI: 10.1109/63.641502

[5] A. S. Ba-thunya, R. Khopkar, K. Wei, and H. A. Toliyat, "Single phase induction motor drives - A literature survey", *Electric Machines and Drives Conference, 2001 IEEE*, 2001, pp. 911-916. DOI: 10.1109/IEMDC.2001.939428

[6] A. Khoei and S. Yuvarajan, "Steady state performance of a single phase induction motor fed by a direct ac-ac converter", *Proceedings of IEEE Conference*, 1989, pp. 128-132. DOI: 10.1109/IAS.1989.96641

[7] Ashraf Ali Khan, Honnyong Cha, Hafiz Furqan Ahmed, "An Improved Single-Phase Direct PWM Inverting Buck-Boost AC-AC Converter" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, pp. 5384-5393. DOI: 10.1109/TIE.2016.2565461

[8] D. Yildirim and M. Bilgic, "PWM AC Chopper Control of Single-Phase Induction Motor for Variable-Speed Fan Application", *34th Annualconference of IEEE Industrial Electronics, 2008, Vol.1, No.1*, 2008, pp.1337 - 1342. DOI: 10.1109/IECON.2008.4758148

- [9] J. I. Ha, S. K. Sul, "Sensorless Field Orientation Control of an Induction Machine by High-Frequency Signal Injection", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 35, No. 1, 1999, pp. 45-51 .DOI: 10.1109/IAS.1997.643058
- [10] D. N. Zmood, "Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators," *IEEE trans. on Industrial Electronics*, vol. 37, 2001, pp. 601-610. DOI: 10.1109/IAS.1999.801601
- [11] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, 2006, pp. 1398-1409. DOI: 10.1109/TIE.2006.881997
- [12] G. Hsieh, and J.C. Hung, "Phase-locked loop techniques - a survey," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 6, 1996, pp. 609-615. DOI: 10.1109/41.544547
- [13] Sidelmo M. Silva, Bruno M. Lopes, Braz J. Cardoso Filho, Rodrigo P. Campana, Wallace C. Boaventura, "Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-phase Grid-connected Systems," *IEEE Trans. IAS*, 2004, pp. 2259-2263. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348790
- [14] M. Ciobotaru. "Reliable grid condition detection and control of single-phase distributed power generation system," master thesis, Aalborg University, 2009.
- [15] S. Golestan M. Monfared F. D. Freijedo, J. M. Guerrero, "Performance Improvement of a Prefiltered Synchronous-Reference-Frame PLL by Using a PID-Type Loop Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 61, no 7, 2014, pp. 3469-3479. DOI: 10.1109/TIE.2013.2282607
- [16] M. K. Ghartemani, "A Unifying Approach to Single-Phase Synchronous Reference Frame PLLs," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 10, 2013, pp. 4550-4556. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2235185

BIOGRAPHY

Tae-Seong Kim



(Student Member)
2018 : BS degree in
Electrical Engineering,
Kyungnam University.
2018~Present : MS Course
in Electrical Engineering,
Kyungnam University.

Hyung-do Kang



(Student Member)
2017 : BS degree in
Electrical Engineering,
Kyungnam University.
2017~Present : MS Course
in Electrical Engineering,
Kyungnam University.

Seon-Hwan Hwang



(Member)
2004 : BS degree in
Electrical Engineering,
Busan University.
2006 : MS degree in
Electrical Engineering,
Busan University.

2011 : PhD degree in Electrical Engineering,
Busan University.
2011~2012 : Research Engineer, Center fo
Advanced Powr Systems(CAPS), Florida State
University, Tallahassee, FL, USA.
2012~Present : Professor in Department of
Electrical Engineering, Kyungnam University.