

순간전압강하 보상 알고리즘을 이용한 인버터 제어에 관한 연구

(The Inverter Control Method Using The Voltage Sag Compensation algorithm)

윤홍민* · 배진용 · 김 용**

(Hong-Min Yun · Jin-Yong Bae · Yong Kim)

Abstract

In this paper general purpose voltage source inverter drives are equipped with an under-voltage protection mechanism, causing the system to shut down within a few milliseconds after a power interruption in the main input sources. When a power interruption occurs finish, if the system is a large inertia restarting the load a long time is required. This paper suggests modifications in the control algorithm in order to improve the sag ride-through performance of ac inverter. The new proposed strategy recommends maintaining the DC-link voltage constant at the nominal value during a sag control algorithm, experimental results are presented.

Key Words : Voltage Source Inverter, SAG, Ride-through, Compensation Algorithm

1. 서 론

최근 공장자동화를 위하여 유도 전동기 가변속 구동 시스템에는 전압형 인버터가 주로 사용되고 있다. 이 시스템에서 입력 전원부에 순간 정전이 발생하게 되면, 유도 전동기를 제어하던 인버터의 직류단 전압이 급격하게 낮아지게 되고 수십 msec 안에 저전압 트립

(Low Voltage Trip)이 발생하여 시스템 출력이 차단되며, 부하의 관성 때문에 전동기의 회전은 일정시간 동안 지속된다[1]. 또한 순간 정전의 복구로 인하여 전동기가 완전히 정지하기 전에 전원이 공급되더라도 인버터는 전동기의 실제 회전속도를 알 수 없기 때문에 즉시 정상 속도로 가속이 어렵다는 문제점이 나타나고 있다. 또한 임의의 속도로 회전중인 전동기를 인버터로 재기동시키는 경우, 부하상태에 따라 순간적으로 과도한 전류가 발생된다[1-3].

따라서 순간 정전 후 재기동시 인버터의 과전류를 차단하고, 전동기의 빠른 추종을 위해서 Kai 등은 인버터의 전류 제어를 통한 DC 링크 전압 안정화 기법을 제안하였고[1], J. Holtz 등은 DC 링크 전압 레벨을 가변하여 빠른 응답성을 위한 전류제어 방식과 페루프 제어 방식을 적용한 제어기를 이용하여 순간 정전시 전동기 관성 에너지를 이용한 회생 모드 기법을 제

* 주저자 : LS산전 자동화제품연구소 선임연구원
** 교신저자 : 동국대학교(서울) 전자전기공학부 교수
* Main author : LSIS Automation R&D Center
Research Engineer
** Corresponding author : Dongguk University(Seoul)
Electronics and Electrical Engineering
Professor
Tel : 02-2260-3720, Fax : 02-2275-0162
E-mail : kyee@dongguk.edu
접수일자 : 2012년 10월 29일
1차심사 : 2012년 10월 31일
심사완료 : 2012년 11월 26일

안하였으며[2], Brian 등은 부하측 관성을 추정하여 순간 정전시 전동기의 부하량 변동에 따른 영향도를 파악하는 인버터의 과전류, 과전압 트립(Trip) 억제 방식에 대해 제안하였다[3].

기존의 순간 정전 보상방법은 DC 링크 전압 안정화 [1], 전류제어 및 페루프 제어를 통한 안정화[2], 부하량 변동에 따른 안정화[3] 등 순간 정전 보상에서 특정 부분만을 안정화 시키는 것을 목표로 하는 한계가 있었다.

하지만 본 논문에서는 직류전압 제어기, 부하추정기, 속도추정기 및 헌팅보상기를 사용하여 순간 정전이 발생하는 경우 인버터 출력 전류의 급격한 변화를 억제하고, 부하량 변동에 따른 안정화를 추구하는 전류제어 방식을 도입하여 가장 최적의 순간전압강하 보상 알고리즘을 제안하고 실험적으로 확인하고자 한다.

2. 본 문

2.1 일반적인 유도 전동기 구동 시스템

그림 1은 일반적인 유도 전동기 구동 시스템을 나타낸다.

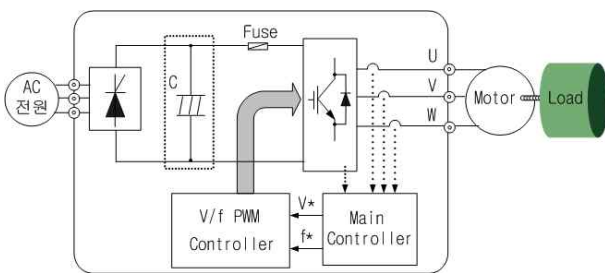


그림 1. 일반적인 유도 전동기 구동 시스템
Fig. 1. General drive system of induction motor

일반적인 가변속 구동은 교류에서 직류로 정류하고 이 전원을 바탕으로 인버터를 통하여 가변속 제어가 가능한 교류구동 방식을 사용한다. 이 구동 시스템에서 주 제어기는 인버터 출력 전류를 검출하고 V/f 제어를 수행하는 전압형 인버터가 유도전동기 구동을

위해서 가장 널리 사용되고 있다[1-3].

2.2 제안한 순간정전 보상 알고리즘

식 (1)은 DC 링크 커패시터에서 저장하는 에너지의 양을 수식적으로 나타낸 것이다.

$$W = \frac{1}{2} C_d V_{dc}^2 \quad J \quad (1)$$

식 (2)는 식 (1)을 시간에 따라서 미분한 것으로서 이는 시간에 따른 DC 링크의 입력 전력과 출력 전력의 차이를 나타낸다.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{C_d}{2} \cdot \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (2)$$

인버터가 정상적으로 운전시 부하는 임의의 속도(ω)에서 $\frac{1}{2} J \omega^2 J$ 과 같은 관성 에너지를 지니게 되고, 유도 전동기의 전류의 공급으로 인하여 자기 에너지는 $\frac{1}{2} L i^2 J$ 이 저장된다. 하지만 순간 정전이 발생하면 유도 전동기는 발전기로 동작하게 되며, 인버터는 DC 링크에서 소모되는 에너지를 확보하기 위하여 회생 모드로 운전한다. 그림 2는 정전시 DC 링크 전압을 나타낸다. 입력 전원(380Vac)이 정상일 경우, 각 동작 전압은 V_d 540V, V_{d1} 510V, V_{d2} 480V, V_{d3} 345V이다. V_d

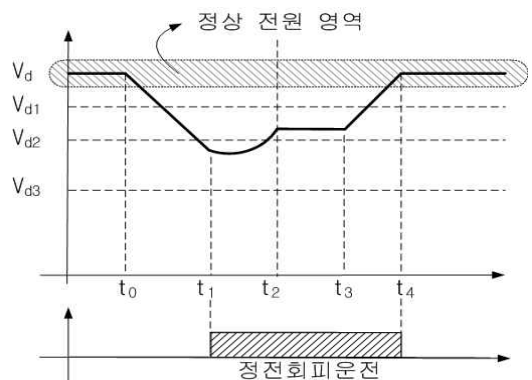


그림 2. 정전시 직류단 전압
Fig. 2. Voltage of the DC-link during a power interruption

는 정상전압 레벨이며, V_{d1} , V_{d2} 는 정전회피 운전시 제어전압레벨, V_{d3} 는 저전압고장레벨이다.

본 논문에서는 시간 t_0 에서 입력단에 순간 정전이 발생하고 시간 t_3 에서 정상 전원으로 회복되어 시간 t_4 에서 DC 링크 전압이 정상 상태에 도달하는 순간전압강하 보상 알고리즘을 수행한다.

식 (3)은 정전회피운전 구간인 시간 t_1 에서 t_2 까지의 DC 링크 에너지 변화분을 나타낸다.

$$\frac{1}{2} C_d [(V_{d1})^2 - (V_{d2})^2] = \int_{t_1}^{t_2} P_{dN} dt \quad (3)$$

따라서 식 (3)에서 인버터 직류단 전압을 최소한으로 변화시키는 최소 시간(t_{min})은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{min} = \frac{1}{2} C_d \cdot \frac{(V_{d1})^2 - (V_{d2})^2}{P_{dN}} \quad (4)$$

본 논문에서는 DC 링크 전압의 변화를 최소로 억제하기 위하여 최소 시간동안 V_{d1} 과 V_{d2} 레벨 사이에 DC 링크 전압을 최대한으로 유지시키는 방법을 제안한 것이다.

그림 3은 제안된 순간전압강하 보상 인버터 제어를 나타낸다.

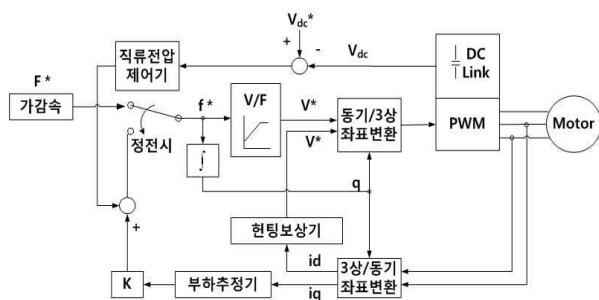


그림 3. 제안된 순간전압강하 보상 인버터 제어기
Fig. 3. Proposed voltage sag compensation inverter controller

기존의 Kai 등이 제안한 DC 링크 전압 제어 방식은 급격한 외란 발생시 DC 링크 안정화에 한계가 있었다

[1]. 하지만 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘은 직류전압 제어기와 부하추정기 및 속도추정기를 동시에 적용하며, 부하량 변동으로 인한 불안정을 해소하기 위하여 헌팅보상기를 동시에 적용하기에 가장 최적의 순간전압강하 보상 알고리즘을 제안한다.

그림 4는 제안된 DC 링크 전압 제어를 나타낸다. 순간 정전 발생시 순간전압강하 보상 알고리즘을 수행하며, 토크분 전류(i_q)를 추정하여 출력 주파수(f_{slip})를 감소시킨다. 동시에 DC 링크 전압이 일정하게 V_{dc}^* 로 유지시키게 DC 링크 전압제어를 수행한다.

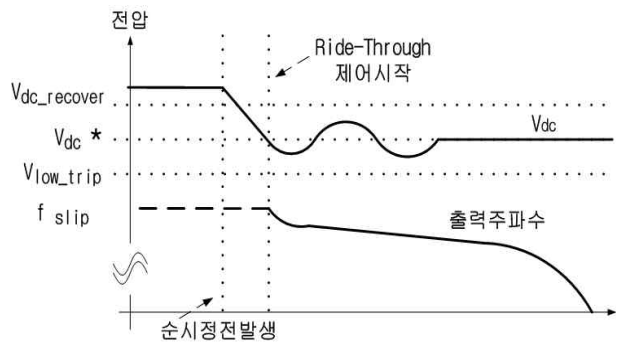


그림 4. 제안된 DC 링크 전압 제어
Fig. 4. Proposed DC-link voltage control

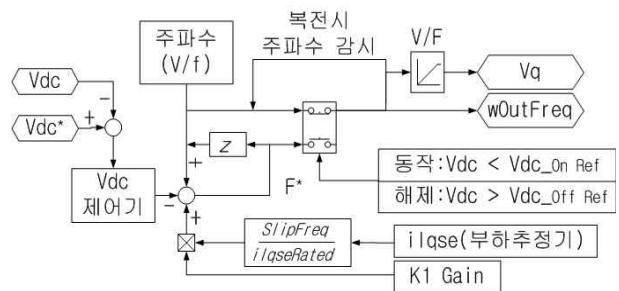


그림 5. 제안된 부하추정기
Fig. 5. Proposed load estimator

그림 5는 제안된 부하추정기를 나타낸다. 제안된 추정기는 출력 전류의 정격에 대비하여 부하량을 추정하고, 이를 주파수로 변환하여 기존 출력 주파수 대비하여 변동하는 출력 주파수를 추정하게 된다.

그림 6는 제안된 속도추정기를 나타낸다. 제안된 속도추정기는 인버터 출력 전류를 검출하여 고정자

및 회전자 전류(i_d, i_q)에 시간 지연을 고려하여 비례-적분 제어기(PI 제어기)에 의해 유도 전동기의 회전 속도를 추정하게 된다. 보다 안정된 유도 전동기 회전 속도를 추정하기 위하여 회전자 속도 지령치(f^*)와 추정치(\hat{f})를 조합시키는 속도추정 방식을 채택하였다.

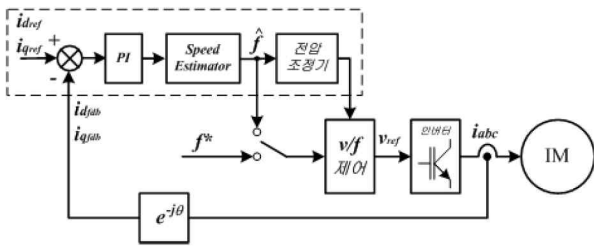


그림 6. 제안된 속도추정기
Fig. 6. Proposed speed estimator

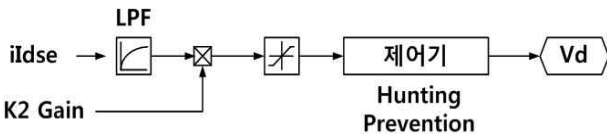


그림 7. 제안된 헌팅보상기
Fig. 7. Proposed hunting prevention

그림 7은 제안된 헌팅보상기를 나타낸다. 적용한 헌팅보상기는 총 출력 전류 중 자속분 전류(i_d)를 바탕으로 이득(K2)을 고려하여 부하량 변동으로 인한 전류 불안정을 해소하는 방안으로 추가 적용하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

그림 8은 시뮬레이션 회로도를 나타낸다. 제안한 순간전압강하 보상 알고리즘을 검증하기 위해서 전류 진동과 전압 안정화에 대한 시뮬레이션 PSIM 9.0 프로그램으로 수행하였다.

표 1은 시뮬레이션에 사용한 농형 유도전동기의 주요 파라미터 값을 나타낸다. 사용된 유도전동기 제정수는 고정자 저항 R_s , 회전자 저항 R_r , 고정자 누설 인

덕턴스 L_s , 회전자 누설 인덕턴스 L_r , 여자 인덕턴스 L_m 이다.

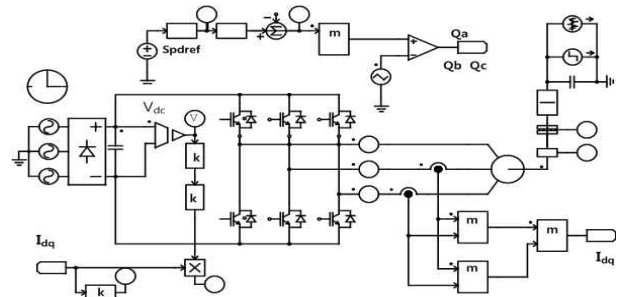


그림 8. 시뮬레이션 회로도
Fig. 8. Simulation circuit

표 1. 모의 실험 파라미터
Table 1. Parameter of simulation test

농형 유도전동기	7.5(kW) 380(V)
$R_s(\Omega), R_r(\Omega)$	0.294, 0.156
$L_s(H), L_r(H)$	0.00136, 0.00074
$L_m(H)$	0.041

그림 9는 보상 전·후의 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다.

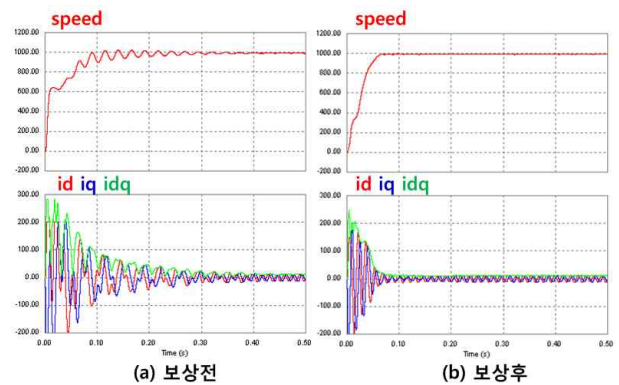


그림 9. 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation results

그림 9 (a)와 같이 순간전압강하 보상 알고리즘 적용하지 않는 경우 속도에서 진동이 발생하고, 전류도 상당한 진동과 함께 과전류가 발생하였지만, 그림 9 (b)와 같이 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘을 적

용하는 경우 속도가 진동이 없이 시간 0.06sec 이후 일정하게 되며, 전류의 진동이 상대적으로 적어지는 특성을 보이고 있다.

3.2 실험 결과

그림 10은 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘의 테스트를 위한 실험장치를 나타낸다.



그림 10. 실험 장치
Fig. 10. Experimental apparatus

7.5 kW 380V급의 유도 전동기 2대를 직렬로 연결함을 통하여 제안된 알고리즘을 실험적으로 확인하고자 하였다.

그림 11은 운전 주파수 7 Hz에서 제안된 순간전압강하 알고리즘의 보상 전·후의 실험파형을 나타낸다.

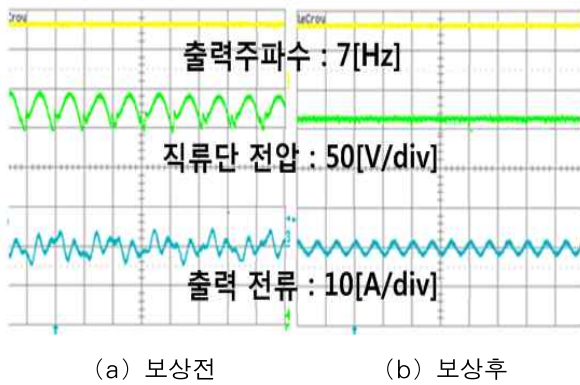


그림 11. 실험결과(출력주파수 : 7Hz, 50msec)
Fig. 11. Experimental results(output freq : 7Hz)

그림 11 (a)와 같이 순간전압강하 보상 알고리즘 적용하지 않는 경우 DC 링크 전압(직류단 전압)의 진동

과 함께 출력 전류 및 출력 주파수의 진동이 발생하나, 그림 11 (b)와 같이 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘을 적용하는 경우 DC 링크 전압이 일정하게 되어서 출력 전류 및 출력 주파수의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

그림 12는 운전 주파수 60Hz에서 제안된 순간전압강하 알고리즘의 보상시 일부하 실험파형을 나타낸다.

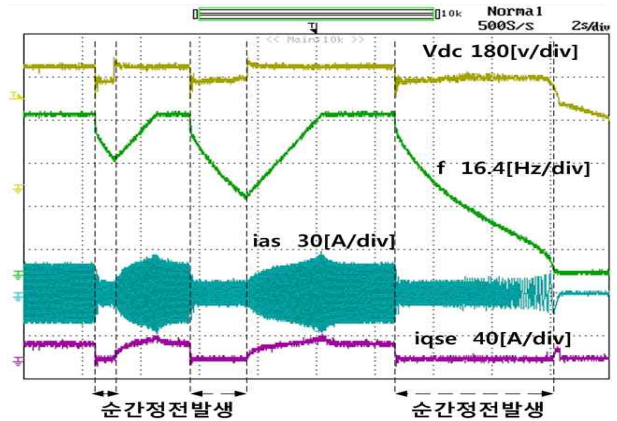


그림 12. 실험결과(출력주파수 : 60Hz)
Fig. 12. Experimental results(output freq : 60Hz)

그림 12에서 반복적으로 순간 정전(0.7sec/2sec/10sec 순간정전 수행)을 가하여 정상적으로 전원이 공급시 목표 주파수로 안전하게 제어됨을 확인하였다. 또한 순간정전 시간이 최대 5.2sec까지 DC 링크 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있어서 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 전동기 구동 시스템의 입력 전원 전압강하 시 인버터의 직류단 전압을 유지하기 위한 새로운 순간전압강하 보상 알고리즘을 제안하였다. 제안된 순간전압강하 보상 알고리즘은 직류전압 제어기, 부하 추정기, 속도추정기 및 헌팅 보상기를 사용하여 순간 정전이 발생하는 경우 인버터 출력 전류의 급격한 변화를 억제하고, 부하량 변동에 따른 안정화를 추구하는 전류제어 방식을 도입하여 가장 최적의 순간전압

강하 보상 방안을 새롭게 제시하였다. PSIM 9.0을 통한 시뮬레이션과 7.5kW급 유도 전동기의 실부하 실험을 통하여 과도상태시 출력전류 리플이 약 15% 감소시키고, 정상상태시 출력전류 리플을 약 50% 감소시키며, 최대 5.2sec까지 DC 링크 전압이 유지 가능한 새로운 순간정압강하 보상 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션과 실험에 의해서 검증하였다.

References

- [1] Kai Pietiläinen and Lennart Harnefors, Andreas Petersson, Hans-Peter Nee "DC-Link Stabilization and Voltage Sag Ride-Through of Inverter Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.53, No.4, 1261-1268, Aug. 2006.
- [2] Joachim Holtz and Wolfgang Lotzkat, "Controlled AC Drives with Capability at Power Interruption", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 5, pp. 1275-1283, Sept./Oct. 1994.
- [3] Brian J.Seibel, Russel J.Kerkman, and David Leggate, "Inverter Control During Overload and Following Power Interruption", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 3, pp. 567-573, May./June. 1992.
- [4] M. H. J. Bollen, "Voltage sags : effects, mitigation and prediction," Power Engineering Journal, pp. 129-135, June 1996.
- [5] E. R. Collins, Jr. and A. Mansoor, " Effects of voltage sags on AC motor drives," in Proc. Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, pp. 1-7, IEEE 1997.
- [6] A. Mansoor, E. R. Collins, and R. L. Morgan, "Effects of unsymmetrical voltage sags on adjustable speed drives," Proceedings of the 7th International Conf. on Harmonics and Quality of power, Las Vegas NV, pp. 467-472, 1996.
- [7] B. S. Kang, J. C. Kim, J. F. Moon, S. Y. Yun, "Investigation of the Impact of Voltage Sags on 3-Phase Induction Motors", KIIE Annual Spring Conference, pp. 361-365, 2004.

◇ 저자소개 ◇



윤홍민 (尹洪敏)

1976년 8월 8일생. 1999년 동국대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기전자공학부 박사과정. 2001년~현재 LS산전 자동화제품연구소 선임연구원.



배진용 (裴辰容)

1975년 8월 17일생. 1998년 동국대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2005년 8월~현재 특허청 전기사무관.



김 용 (金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 전기공학과 졸업. 1994 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 동국대 전자전기공학부 교수.