

매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어

정범동*†

* 한국해양수산연수원

The Speed Control for Direct Current Motors Using Matrix Converter Topology

Bum-dong Jeong*†

* Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

요약 : 본 논문은 직류전동기 속도제어를 위해 매트릭스 컨버터의 적용 가능성을 제안한다. 매트릭스 컨버터는 크게 직접 매트릭스 컨버터와 간접 매트릭스 컨버터로 나뉘는데 본 논문에서는 다양한 출력 단을 구성할 수 있어 향후 많은 활용이 예상되는 간접 매트릭스 컨버터를 이용하였다. 제안한 방식은 기존의 방식보다 입력 전류의 파형을 개선하고, 부피가 크고 비용이 많이 들며 수명단축의 원인이 되는 에너지 저장 요소를 가지지 않는 이점이 있다. 시뮬레이션을 통하여 기존 방식과 본 논문에서 제안하는 방식의 특징을 비교 분석하여 제안한 방식의 유효성을 입증하였다. 속도제어, 토크제어, 부하전류제어에서는 유사한 성능을 보이며, 입력전류는 정류단의 스위치를 직접 제어함으로써 정현파와 유사하게 제어되기 때문에 고조파가 크게 감소되었다.

핵심어 : 매트릭스 컨버터, 간접 매트릭스 컨버터, 직접 매트릭스 컨버터, 직류전동기, 속도제어

Abstract : This paper proposes the applicability of matrix converter topology for the speed control of direct current motors. Matrix converters are divided into direct and indirect components. This paper utilizes an indirect matrix converter which is expected to be used widely because of making a variety of output side. The proposed converter has advantages which improves input current shape, has no large energy storage component causing short life. Simulation results are provided to verify effectiveness by comparing and analyzing features of the proposed and conventional topology. The proposed method shows similar performance for speed control, torque control, and load current control compared to a conventional method. Furthermore Harmonics are greatly reduced because the input current is controlled in a manner similar to sinusoidal wave by directly controlling switches at the rectifier stage.

Key Words : Matrix Converter, Indirect Matrix Converter, Direct Matrix Converter, Direct Current Motor, Speed Control

1. 서론

매트릭스 컨버터에 관한 연구는 9개의 양방향 스위치를 가진 간단한 구조에서 시작되었다(Geethalakshmi et al., 2006).

직접 매트릭스 컨버터는 직류단의 에너지 저장 장치가 사용되지 않아 컨버터의 부피와 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다(Rodriguez et al., 2012; Yamamoto et al., 2009). 하지만 제어기법이 복잡하고 직류단이 없기 때문에 출력단을 확장할 수 없는 단점이 있다.

이에 반해 간접 매트릭스 컨버터는 직접 매트릭스 컨버터의 장점을 보유하고, 정류단과 인버터단을 구분하여 가상의

직류단을 이용하여 하나의 입력단에 다수의 출력단을 확장할 수 있어 향후 다양한 분야에서의 활용이 예상된다.

매트릭스 컨버터를 적용하기 위해서는 고성능 대용량의 반도체 스위치와 게이트 드라이버 기술이 뒷받침되어야 한다. 초창기에는 여러 가지 문제점으로 인해 실현이 어려웠지만 IGBT, MOSFET 등 대전력, 고속스위칭이 가능한 반도체 스위칭 소자가 개발되면서 매트릭스 컨버터의 적용과 연구가 활발히 진행되었다(Wheeler et al., 2002; Jones and Bose, 1976; Daniels and Slattery, 1978).

본 논문에서는 기존의 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어방식에 비해, 입력 전류의 파형을 개선하고 에너지 저장 요소를 가지지 않는 간접 매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어 방식을 제안한다.

† bumdonge@seaman.or.kr, 051-620-5873

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 계단 입력의 속도지령을 가했을 경우 응답 특성과 부하토크를 인가하였을 경우의 응답 특성을 파악하여 기존 방식과 본 논문에서 제안하는 방식의 특징을 비교 분석한다.

2. 매트릭스 컨버터의 종류 및 특성

2.1 직접 매트릭스 컨버터

Fig. 1에서 알 수 있듯이 다이오드 브리지를 이용한 기존의 컨버터의 경우 AC/DC 정류과정에서 리플이 많이 발생하므로 이를 완화시키기 위해 대용량 커패시터를 사용한다.

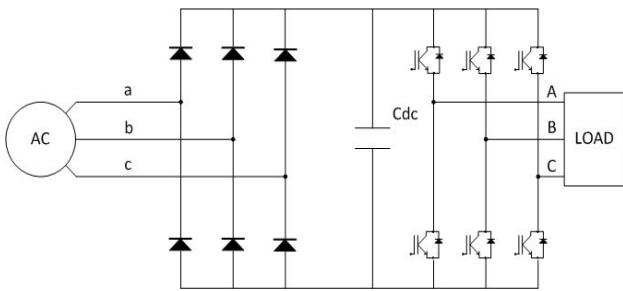


Fig. 1. Conventional AC/DC/AC converter.

하지만 이는 입력전류의 고조파를 증가시키고 역률을 낮추는 단점이 있다. 또한 직류단 커패시터는 많은 공간을 차지하고, 높은 비용을 발생시키며, 고온 상태에서 운전할 경우 용량의 감소로 인해 수명이 단축되는 문제가 있다.

또한 입력단에서 출력단으로의 단방향 에너지 흐름으로 인하여 부하 측에서 발생하게 되는 회생에너지를 저장 및 사용할 수 없는 단점이 있다.

이와 달리 AC/DC 정류용 다이오드 대신, 양방향 스위치를 사용하여 회생 에너지를 활용할 수 있는 것이 매트릭스 컨버터이다. 이 중에서 양방향 스위치를 이용하여 AC입력에서 AC출력으로 직접 변환시키는 것을 직접 매트릭스 컨버터라 하며 이를 Fig. 2에 도시하였다.

이를 구현하기 위해서는 9개의 양방향 스위치를 사용하게 된다. 고조파 함유량을 감소시키기 위해 입력단에 LC필터를 추가할 수 있고, 다이오드를 이용하여 보호회로를 구성할 수 있다. 같은 상의 두 개 이상의 스위치가 동시에 ON되는 것과, 같은 상의 스위치가 3개 모두 동시에 OFF되는 상태를 방지해야 한다.

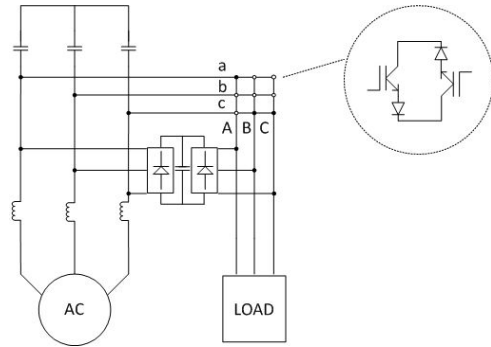


Fig. 2. Direct matrix converter.

즉, 직접 매트릭스 컨버터는 27가지의 스위칭 방식을 조합하여 원하는 전압과 주파수의 AC를 구현한다. 하지만 제어기법이 복잡하고 직류단이 없기 때문에 출력단을 확장할 수 없는 단점이 있다.

2.2 간접 매트릭스 컨버터

Fig. 3에 도시된 간접 매트릭스 컨버터는 가상의 직류단이 존재하기 때문에 하나의 입력단에 여러 개의 출력단을 확장할 수 있다. 즉, 직접 매트릭스 컨버터의 한계인 출력단의 확장이 가능하다. 이는 Fig. 1에 나타난 기존의 컨버터에서 정류단의 다이오드 브리지 대신 양방향 스위치를 이용하여 직접 스위칭 제어를 통해 정류한 뒤 인버터단에서 직류를 교류성분으로 출력하는 방식이다.

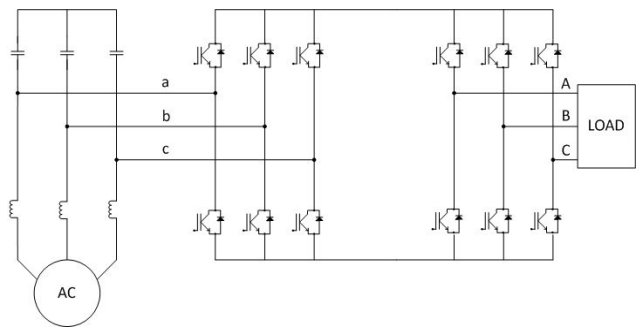


Fig. 3. Indirect matrix converter.

Fig. 2에 나타난 직접 매트릭스 컨버터의 경우 커패시터는 제거되었지만 다양한 출력단의 형성이 불가능한 단점이 있다. 이에 반해 Fig. 3에 나타난 간접 매트릭스 컨버터의 경우 커패시터를 제거함으로써 부피의 감소와 수명의 증가를 가져오며 가상의 직류 단이 존재하기 때문에 다양한 출력 단을 구성할 수 있는 이점이 있다. 특히, 정류단의 스위치 개수가 많다는 단점을 보완하기 위해 효과적으로 스위치 개수

를 줄인 것을 스파스 매트릭스 컨버터라 한다(Kolar et al., 2007; Kim, 2017).

3. 매트릭스 컨버터에 의한 직류전동기 제어

3.1 기존의 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어

본 논문에서는 매트릭스 컨버터를 이용하여 직류전동기 속도제어를 위한 토폴로지를 구성하였다. 제안하는 매트릭스 컨버터와 비교하기 위하여 Fig. 4에 제시된 기존의 컨버터의 경우 다이오드 브리지를 이용하여 정류단이 구성되어 있다.

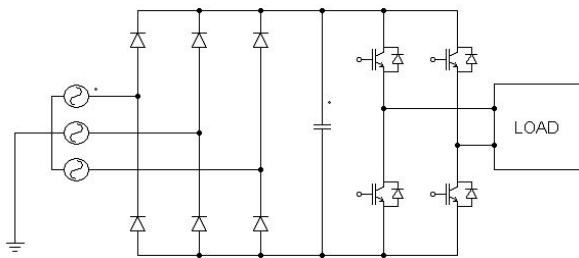


Fig. 4. Conventional converter.

다이오드 브리지를 이용한 정류단은 안정된 직류 출력전압을 얻기 위해 DC단에 커패시터를 설치한다. 하지만 DC단에 사용되는 커패시터는 AC단과 달리 훨씬 대용량의 커패시터가 필수적이다.

3.2 제안하는 매트릭스 컨버터를 이용한 직류전동기 속도제어

Fig. 5의 제안하는 매트릭스 컨버터의 경우 다이오드 대신 직접 스위칭을 하여 정류할 수 있도록 IGBT를 이용하여 정류단을 구성하고, 인버터단은 기존의 방식과 동일한 방식으로 직류전동기의 속도제어 토폴로지를 구성하였다.

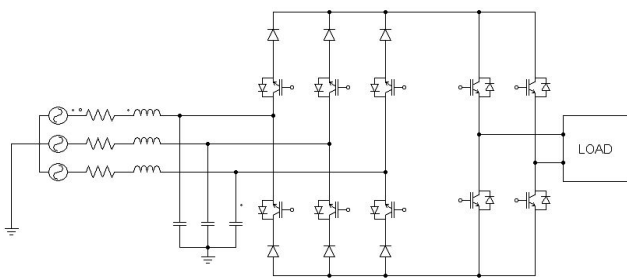


Fig. 5. Proposed matrix converter.

정류단의 각 IGBT는 PWM 제어를 통하여 스위칭을 한다.

단, 정류단은 양방향 스위치 대신 각각 1개의 IGBT 스위치와 다이오드를 부착하여 양방향성이 아닌 단방향으로 제어를 간단하게 할 수 있도록 구성하였다. 기존 방식의 단점이었던 DC단의 커패시터를 제거하여 가격이 저렴해지고 부피를 줄일 수 있으며 수명이 늘어나는 장점이 있다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기의 속도제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 저속영역 및 고속영역에서 PSIM 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

먼저 고속영역(1,000[rpm])에서 속도제어에 비례하는 부하를 인가하고, 저속영역(200[rpm])에서 계단상의 부하토크를 인가하여 시뮬레이션을 실시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 직류전동기의 파라미터 및 시스템정수는 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters of direct motor used for computer simulation and system constants

Rated Output	1,200[W]	R_r	0.5[Ω]
Rated Voltage	120[V]	L_s	20[mH]
Rated Current	10[A]	L_r	10[mH]
Rated Speed	1,200[rpm]	J	0.4[Kg·m ²]
R_s	75[Ω]	T_s	8[μs]

4.1 기존의 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 제어

Fig. 6은 기존의 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 구동시뮬레이션 PSIM 다이어그램으로 속도와 전류제어를 위해 PI제어를 사용하였다.

Fig. 7은 0[rpm]에서 1,000[rpm]으로 계단 입력의 속도지령을 가했을 경우 직류전동기의 속도응답 특성을 나타낸다.

(a)는 속도를 나타내고, (b)는 속도제어에 비례하는 부하를 나타낸다. (c)는 입력단 중 한 상의 전류파형을 나타내고 기본파의 정수배 주파수를 갖는 고조파가 많이 함유된 형상이다. PSIM 프로그램을 이용하여 입력단 측 전류의 전 고조파의 실효치와 기본파의 실효치의 비로 정의되는 THD(Total Harmonic Distortion)를 구하면 743%이다. 이는 기본파형에 고조파가 상당히 많이 포함되어 있음을 의미한다. (d)는 부하 전류를 나타내고, 부하가 안정화 된 구간에서 12.14 ~ 14.04[A] 사이의 범위에서 평균 13.09[A]를 나타내고 있다.

매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어

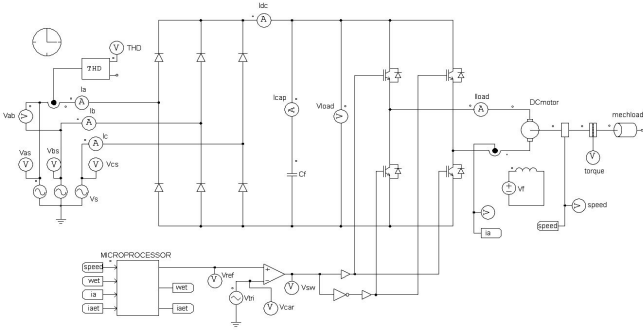
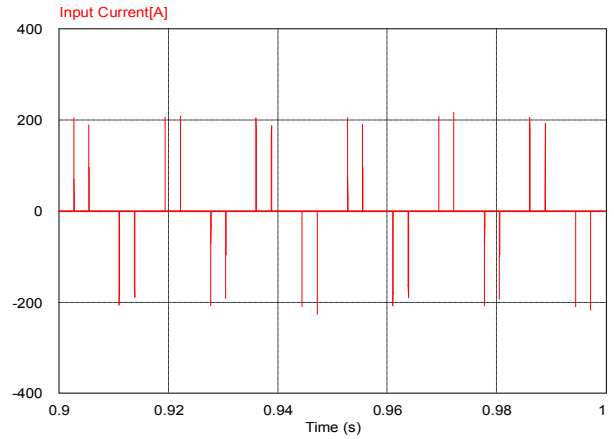
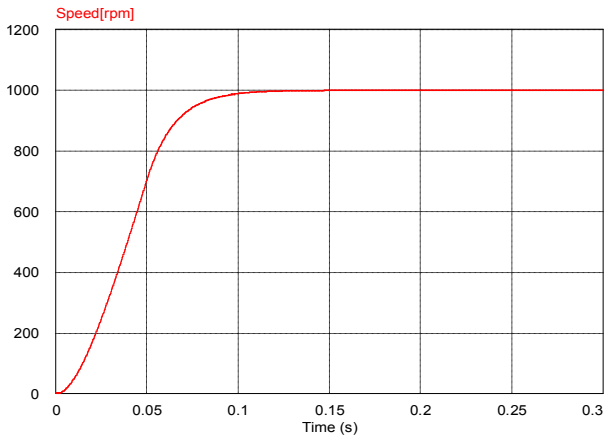


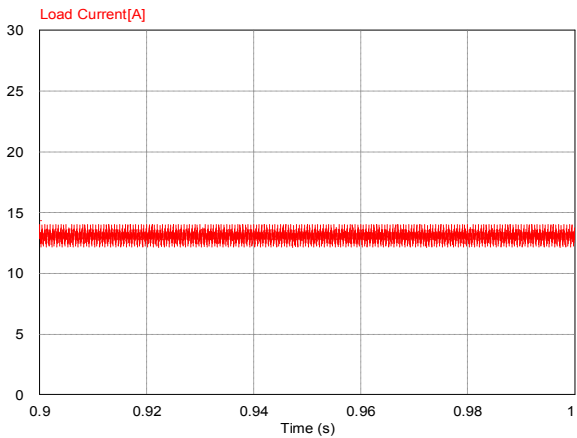
Fig. 6. PSIM diagram for conventional converter.



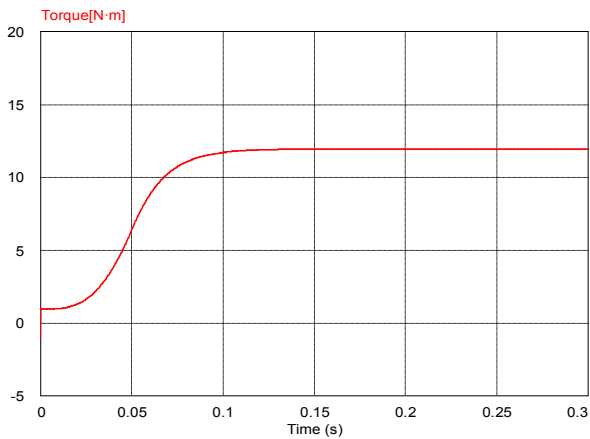
(c) Input current



(a) Speed



(d) Load current



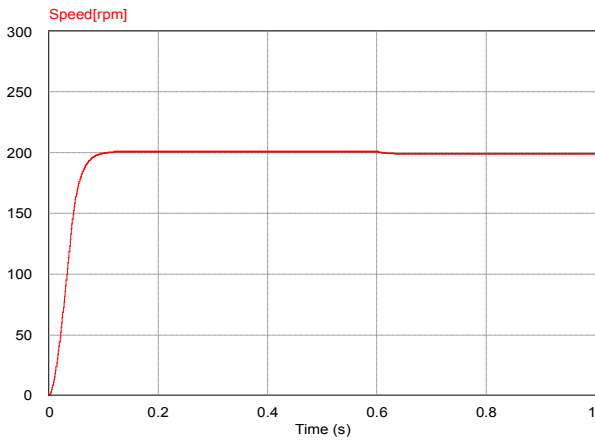
(b) Torque

Fig. 7. Simulation responses for step change of speed setting (0 → 1,000[rpm]).

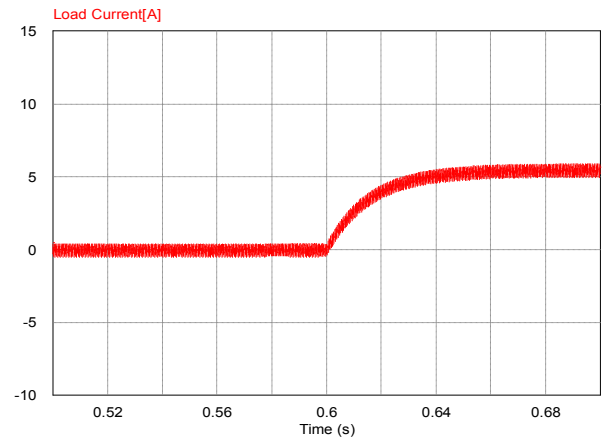
Fig. 8은 200[rpm]으로 정상운전 중 5[N·m]의 부하토크를 인가하였을 경우의 응답을 나타낸다.

(a)는 속도를 나타내고, (b)는 부하토크 인가 전·후의 부하의 변화를 나타낸다. (c)는 부하토크 인가 전·후의 입력단의 한 상의 전류형상 변화를 나타내는데, 기본파의 정수배 주파수를 갖는 고조파가 많이 함유된 형상이다. PSIM 프로그램을 이용하여 부하 안정 이후 입력단 전류의 THD를 측정해보면 689%에 이른다. 이는 입력단 전류 파형에 고조파가 상당히 많이 포함되어 있음을 의미한다. (d)는 부하토크 인가 전·후의 부하전류를 나타내고, 부하가 안정화 된 구간에서 4.43 ~ 6.61[A] 사이의 범위에서 평균 5.47[A]를 나타내고 있다.

정범동

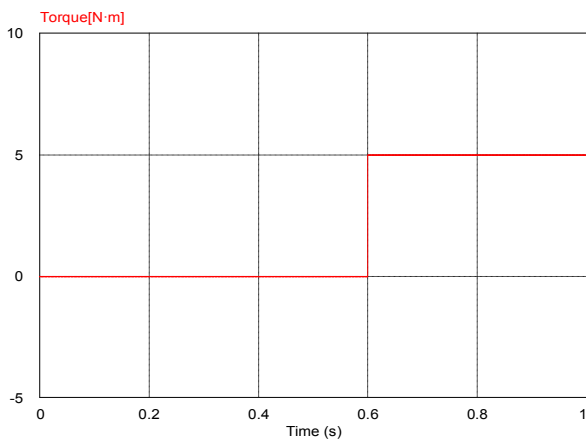


(a) Speed

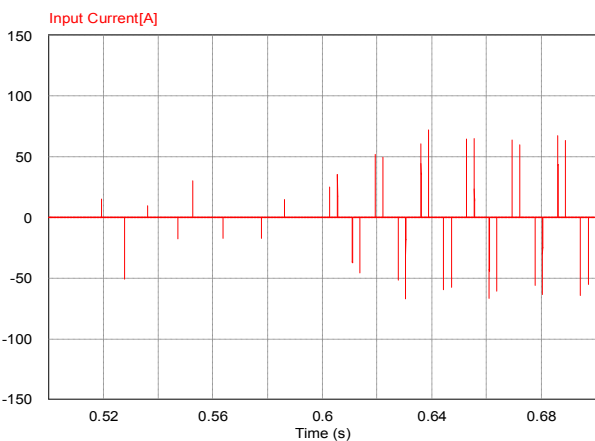


(d) Load current

Fig. 8. Simulation responses for step change of load torque (200[rpm], 5[N·m]).



(b) Torque



(c) Input current

4.2 제안하는 매트릭스 컨버터를 이용한 직류전동기 제어

Fig. 9는 제안하는 매트릭스 컨버터를 이용한 직류전동기 구동시물레이션 PSIM 다이어그램이다. 기존의 컨버터 토폴로지와 동일하게 속도와 전류제어를 위해 PI제어기를 사용하였다.

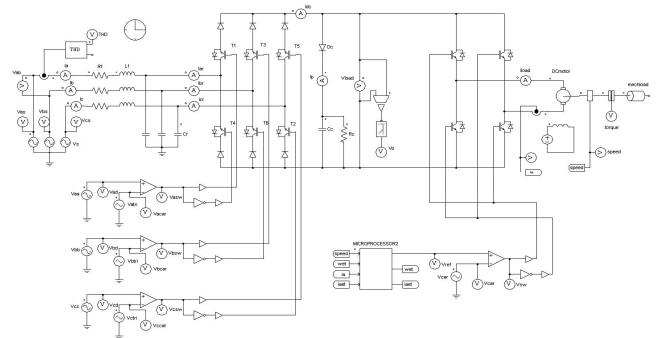
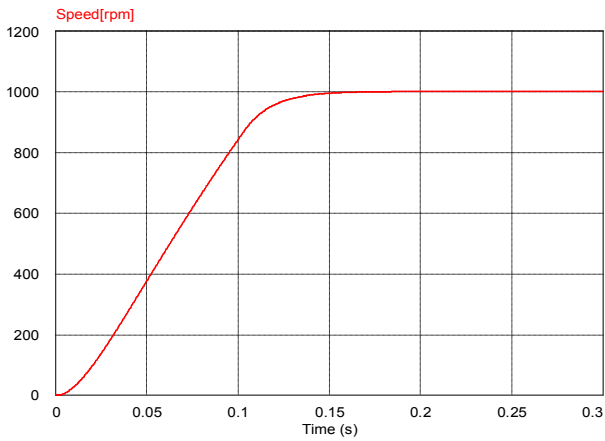


Fig. 9. PSIM diagram for proposed matrix converter topology.

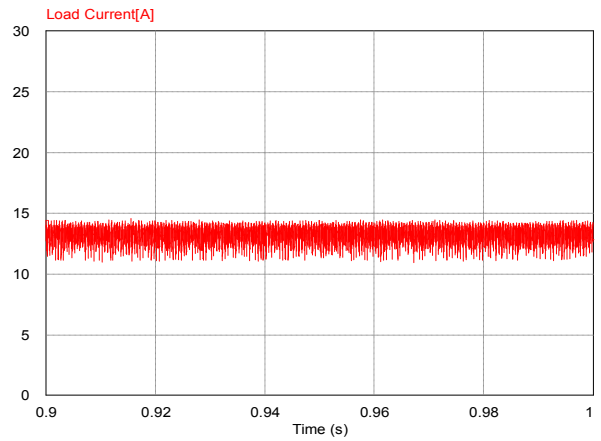
Fig. 10은 0[rpm]에서 1,000[rpm]으로 계단 입력의 속도지령을 가했을 경우 직류전동기의 속도응답 특성을 나타낸다.

(a)는 속도를 나타내고 기존의 방식처럼 안정적인 제어결과를 보여준다. (b)는 속도제곱에 비례하는 부하를 나타내고 기존방식처럼 과도상태에서 안정적인 부하형상을 나타낸다. (c)는 입력단의 한 상의 전류를 나타내고, 기존의 방식보다 정현파에 가까운 형상으로, THD는 3.41[%]이다. (d)는 부하전류를 나타내고, 부하가 안정화 된 구간에서 10.98~14.57[A] 사이의 범위에서 평균13.13[A]를 나타내고 있다.

매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기 속도제어

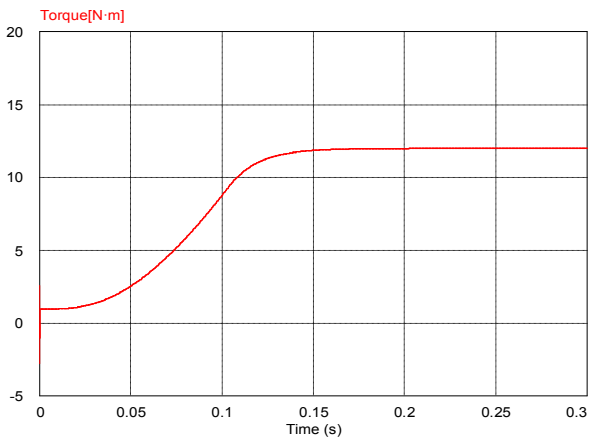


(a) Speed



(d) Load current

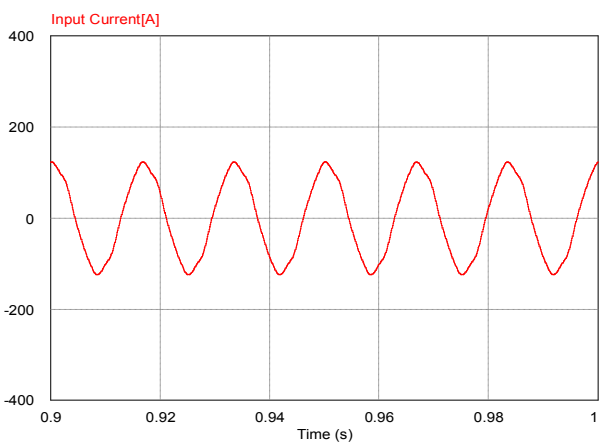
Fig. 10. Simulation responses for step change of speed setting (0 → 1,000[rpm]).



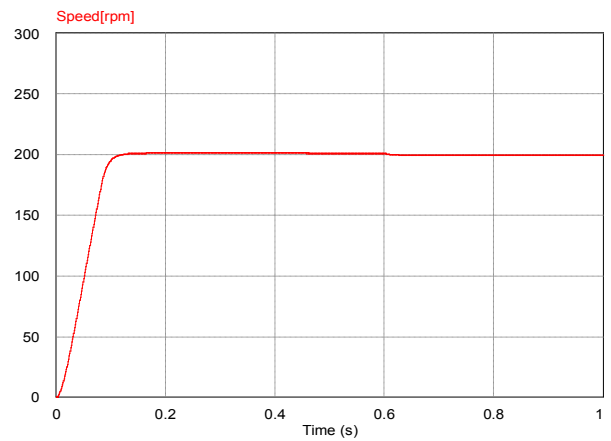
(b) Torque

Fig. 11은 200[rpm]으로 정상운전 중 5[N·m]의 부하토크를 인가하였을 경우의 응답을 나타낸다.

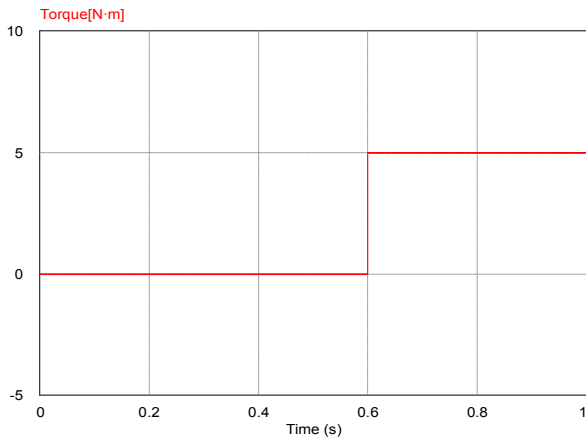
(a)는 속도를 나타내고 기존의 방식처럼 과도상태에서 안정적인 제어결과를 보여준다. (b)는 부하토크 인가 전·후의 부하의 변화를 나타낸다. (c)는 부하토크 인가 전·후의 입력단의 전류형상 변화를 나타내는데, 기존의 방식보다 정현파에 가까운 형상으로, THD는 5.74[%]이다. 부하토크 인가에 따른 전류 파형의 변화가 기존의 방식과 비교할 때 거의 없다. (d)는 부하토크 인가 전·후의 부하전류를 나타내고, 부하가 안정화 된 구간에서 4.57~5.98[A] 사이의 범위에서 평균 5.47[A]를 나타내며, 기존의 방식처럼 과도상태에서도 안정적인 제어가 이루어진다.



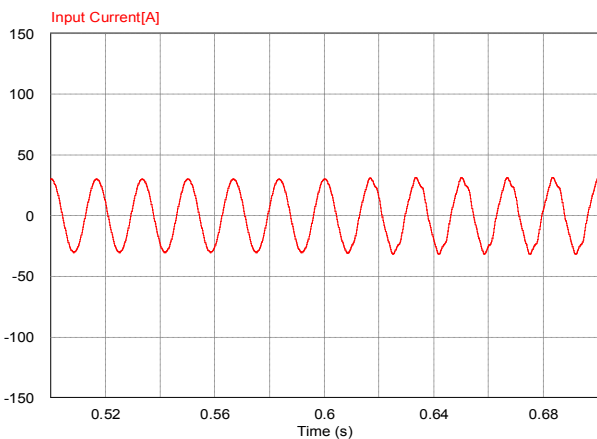
(c) Input current



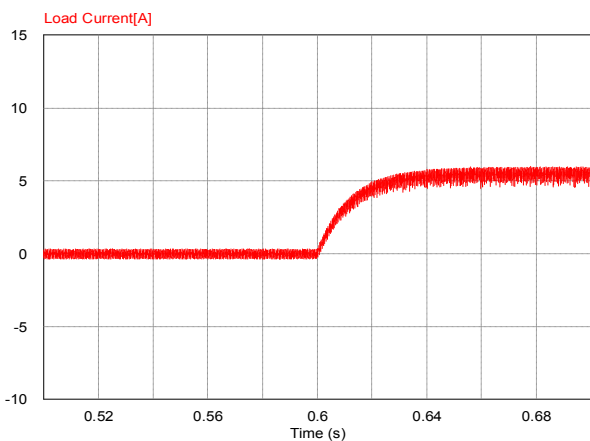
(a) Speed



(b) Torque



(c) Input current



(d) Load current

Fig. 11. Simulation responses for step change of load torque (200[rpm], 5[N·m]).

4.3 시뮬레이션 결과 검토

Fig. 7(a)와 Fig. 10(a), Fig. 7(b)와 Fig. 10(b)를 각각 비교해 보면, 0[rpm]에서 고속영역인 1,000[rpm]으로 계단 입력의 속도지령을 가했을 경우 기존의 방식처럼 본 논문에서 제안한 매트릭스 컨버터 토폴로지도 과도상태에서 안정적인 속도 및 토크 제어가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 7(c)와 Fig. 10(c)를 비교해 보면, 기존 방식의 입력단 전류 파형을 나타낸 Fig. 7(c)를 보면 THD가 743[%]로 정현파와는 비교할 수 없을 정도로 기본파의 정수배 주파수를 갖는 고조파가 매우 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 방식의 입력단 전류 파형을 나타낸 Fig. 10(c)를 보면 THD가 3.41[%]로 정현파에 가까운 우수한 품질의 파형을 보이고 있고, 입력 전류의 품질이 상당한 수준으로 개선되었음을 알 수 있다.

Fig. 7(d)와 Fig. 10(d)를 비교해 보면, 부하가 안정된 구간에서 기존방식과 본 논문에서 제안한 방식의 부하전류의 평균값이 각각 13.09[A]와 13.13[A]로 그 차이가 크지 않고, 과도구간에서도 기존의 방식만큼 제안한 방식도 안정적인 제어가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 8(a)와 Fig. 11(a), Fig. 8(b)와 Fig. 11(b)를 각각 비교해 보면, 0[rpm]에서 저속영역인 200[rpm]으로 계단 입력의 속도지령을 가했을 경우 기존의 방식처럼 본 논문에서 제안한 매트릭스 컨버터 토폴로지도 과도상태에서 안정적인 속도 및 토크 제어가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 8(c)와 Fig. 11(c)를 비교해 보면, 기존 방식의 입력단 전류 파형을 나타낸 Fig. 8(c)를 보면 THD가 689[%]로 정현파와는 비교할 수 없을 정도로 기본파의 정수배 주파수를 갖는 고조파가 매우 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 방식의 입력단 전류 파형을 나타낸 Fig. 11(c)를 보면 THD가 5.74[%]로 정현파에 가까운 우수한 품질의 파형을 보이고 있고, 입력 전류의 품질이 상당한 수준으로 개선되었음을 알 수 있다.

Fig. 8(d)와 Fig. 11(d)를 비교해 보면, 부하 인가 후 안정된 구간에서 기존방식과 본 논문에서 제안한 방식의 부하전류의 평균값이 5.47[A]로 동일하며, 과도구간에서도 기존의 방식만큼 제안한 방식도 안정적인 제어가 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

매트릭스 컨버터 토폴로지를 이용한 직류전동기의 속도 제어에 대한 성능을 파악하기 위해 기존의 컨버터 토폴로지를 이용한 방식과 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하였다.

시뮬레이션 분석 결과에서 알 수 있듯이, 기존의 방식만큼 본 논문에서 제안한 매트릭스 컨버터 토폴로지는 안정적

인 제어성능을 보인다. 속도제어, 토크제어, 부하전류제어에서는 유사한 성능을 보이나, 입력전류에 대한 제어성능에 있어서는 단연 압도적인 우수성을 보인다. 제안한 매트릭스 컨버터 토폴로지는 정류단의 스위치를 직접 제어하여 입력단의 전류파형을 정현파에 가깝게 제어하기 때문에 고조파가 적은 우수한 품질의 전류 공급을 가능하게 한다.

또한 제안한 방식의 매트릭스 컨버터 토폴로지는 기존의 방식에 있는 대용량 커패시터를 제거함으로써 컨버터 부피의 감소와 수명의 증가를 가능하게 하며, 특히 간접 매트릭스 컨버터의 경우 가상의 직류단이 존재하기 때문에 다양한 출력 단을 구성할 수 있는 이점이 있어 앞으로 폭넓은 활용 가능성과 연구 가치가 있는 분야이다.

Received : 2017. 12. 06.

Revised : 2018. 02. 21. (1st)

: 2018. 03. 19. (2nd)

Accepted : 2018. 04. 27.

References

- [1] Daniels, A. and D. Slattery(1978), New power converter technique employing power transistors, Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 125, No. 2, pp. 146-150.
- [2] Geethalakshmi, B., P. Sanjeevikumar and P. Dananjayan (2006), Performance analysis of AC-DC-AC converter as matrix converter, Proceedings of India International Conference on Power Electronics, pp. 57-61.
- [3] Jones, V. and B. Bose(1976), A frequency step-up cycloconverter using power transistors in inverse-series mode, Int. J. Electron., Vol. 41, No. 6, pp. 573-587.
- [4] Kim, S. W.(2017), A study on the DC/DC converter using matrix converter topology, master's thesis, Department of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea.
- [5] Kolar, J. W., F. Schafmeister, S. D. Round and H. Ertl (2007), Novel three-phase AC-AC sparse matrix converters, IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 5, pp. 1649-1661.
- [6] Rodriguez, J., Marco Rivera, J. W. Kolar and P. W. Wheeler(2012), A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 1, pp. 58-70.
- [7] Wheeler, P. W., J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham and A. Weinstein(2002), Matrix converters: a technology review, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 2, pp. 276-288.
- [8] Yamamoto, E., T. Kume, H. Hara, T. Uchino, J. Kang and H. Krug(2009), Development of matrix converter and its applications in industry, in Proc. 35th IEEE IECON, Porto, Portugal, pp. 4-12.