

스텝리스 전류 커뮤테이션 기법이 적용된 직접형 매트릭스 컨버터를 위한 입력 필터

한상훈¹, 권소연¹, 조영훈[†]

Input Filter for Direct Matrix Converter with Stepless Current Commutation Technique

Sanghun Han¹, Soyeon Kwon¹, and Younghoon Cho[†]

Abstract

This study proposes an input filter for a gallium-nitride-based direct matrix converter with a stepless current commutation technique. Various current commutation strategies have been adopted for reliable operation of switches. These strategies are complex to be implemented and require additional components. The stepless current commutation technique is simple to operate but causes overcurrent issues due to the occurrence of short circuit on input sources. In this study, to restrict the short circuit current, we utilized GaN devices with fast switching properties and modified the input filter. The proposed input filter was verified by experimental results of induction motor drive.

Key words: Direct matrix converter, Input filter, Motor drive system, Stepless current commutation

1. 서 론

전동기 구동용 시스템은 일반적으로 AC/DC 전력 변환 장치와 DC/AC 전력 변환 장치로 이루어져 있다. 이러한 구조는 두 전력 변환 장치 사이에 직류단 커패시터를 필요로 한다. 직류단 커패시터는 시스템의 부피를 증가시키고, 시스템의 수명을 줄이는 원인이다. 따라서 직류단 커패시터가 없는 AC/AC 전력 변환 장치로써 매트릭스 컨버터를 전동기 구동 분야에 적용하는 연구가 진행되어 왔다. 매트릭스 컨버터는 구조에 따라 직접형과 간접형으로 나뉘며, 본 논문에서는 그림 1과 같은 직접형 매트릭스 컨버터를 다룬다.

직접형 매트릭스 컨버터는 각 출력 상마다 입력의 3상 전원이 양방향 스위치로 연결되어 있다. 공통된 출력 상에 연결되어 있는 3개의 스위치들은 입력 측 단락 회로 및 출력 측 개방 회로의 발생을 방지하기 위해 다양

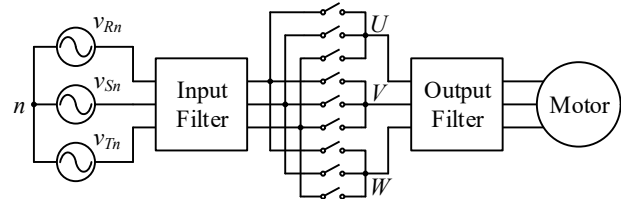


Fig. 1. Direct matrix converter.

한 전류 커뮤테이션(commutation) 기법들이 사용된다^{[1]-[4]}. 이러한 기법들은 입력 전압의 크기 혹은 출력 전류의 극성 정보를 필요로 한다. 또한 2개의 단방향 스위치로 이루어진 양방향 스위치를 사용해야 하며, 각 단방향 스위치는 각기 다른 스위칭 신호로 동작된다.

본 논문에서는 출력 전류의 극성을 판단하기 위한 추가적인 센서 및 복잡한 스위칭 신호의 구현을 요구하지 않는 스텝리스(stepless) 전류 커뮤테이션 기법을 적용하였다^{[5]-[6]}. 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법은 하나의 양방향 스위치 신호에 하나의 스위칭 신호를 필요로 하며, 스위치가 절환될 때 별도의 단계가 존재하지 않는다. 이는 입력 측 단락 회로 및 출력 측 개방 회로 발생으로 인한 과전류, 과전압 문제를 야기한다. 과전압 문제는 기존 매트릭스 컨버터에 보호 회로로 사용되는 클램프 회로 및 스너버 회로로 방지할 수 있다^[1]. 따라서 본

Paper number: TKPE-2020-25-2-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronics Eng., Konkuk University
Tel: +82-2-450-0519 Fax: +82-2-457-8895

¹ Dept. of Electrical and Electronics Eng., Konkuk University

Manuscript received Jan. 6, 2020; revised Jan. 9, 2020; accepted Feb. 8, 2020

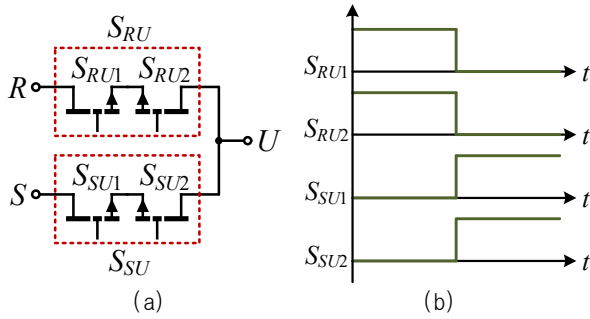


Fig. 2. Stepless current commutation technique. (a) Switch configuration of 2-phase input to single-phase output, (b) Switching waveforms.

논문에서는 과전류를 막기 위한 방안으로 gallium-nitride(GaN) 소자 적용 및 CL 구조의 입력 필터를 제안한다. GaN 소자의 빠른 스위칭 특성은 단락 회로가 발생하는 시간을 줄이고, 제안하는 입력 필터는 단락 전류의 기울기를 제한하여 과전류로 인한 스위치의 손상을 막는다.

2. 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법

스텝리스 전류 커뮤테이션 기법을 간략히 설명하기 위해 2상의 입력과 단상의 출력만 고려한다. 그림 2는 스위치의 구성과 스텝리스 커뮤테이션 기법의 스위칭 파형을 나타낸다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서는 공통 소스 구조의 역병렬 다이오드가 없는 양방향 스위치를 사용하였다. 출력 U상의 전류가 양방향 스위치 S_{RU}를 통해 흐르다 S_{SU}를 통해 흐르게 될 때 스위칭 파형은 그림 2(b)와 같다. 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법은 스위치가 절환될 때 별도의 커뮤테이션 시간 혹은 데드타임을 필요로 하지 않는다. 또한 이 기법은 입력 전압의 크기와 출력 전류의 극성, 양방향 스위치의 구조와 무관하게 적용 가능하다^{[1],[6]}.

3. 제안하는 입력 필터

기존의 직접형 매트릭스 컨버터에 사용되는 LC 구조의 입력 필터를 그림 3(a)에 나타냈다. LC 필터는 컨버터에서 발생하는 고조파 성분의 전류가 계통으로 유입되는 것을 막기 위해 사용된다. 인덕터에 병렬로 연결된 저항은 댐핑 및 과전압 방지의 목적으로 사용된다^{[6]-[7]}. 기존의 LC 필터는 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법을 적용하였을 때에도 고조파 성분을 저감할 수 있으나, 매트릭스 컨버터 측에 위치한 커패시터로 인해 과전류를 막을 수 없다^[6].

그림 3(b)는 본 논문에서 제안하는 입력 필터를 나타낸다. 기존 LC 필터와 달리 커패시터가 계통 측으로 연결된 CL 구조로 이루어져 있다. 그림 4는 공통된 출력

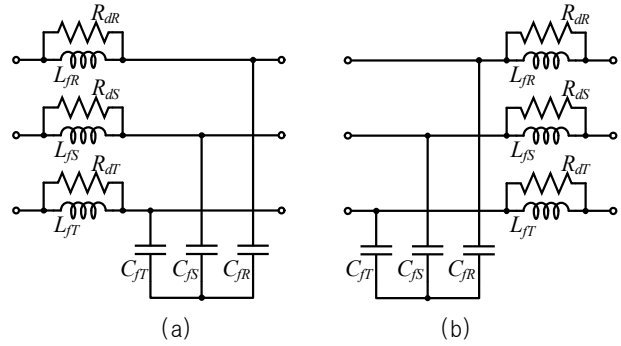


Fig. 3. Input filters. (a) Traditional input filter, (b) Proposed input filter.

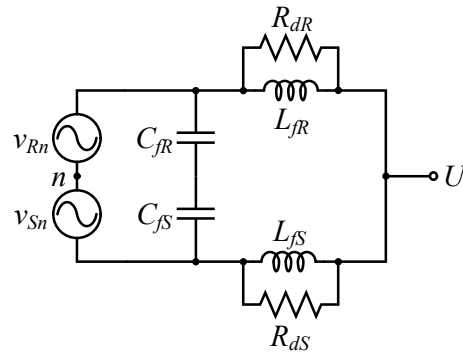


Fig. 4. Equivalent short circuit.

상과 연결된 2개의 스위치가 동시에 켜져 입력 전원 2상이 단락되었을 때 등가회로를 나타낸다. 입력 전원 및 커패시터와 스위치 사이 인덕터가 위치하기 때문에 단락 회로 발생 시 전류의 기울기를 제한함을 알 수 있다. 해석의 편의를 위해 댐핑 저항과 단락되기 전에 흐르던 전류를 0이라 가정한다면, 단락 전류 I_{short}는 다음과 같이 계산된다^[6].

$$I_{short} = \frac{V_{RS} \Delta t_{short}}{L_{fR} + L_{fS}} \quad (1)$$

식 (1)을 통해 알 수 있듯이, 단락 전류는 필터 인덕턴스에 키워 저감할 수 있다. 또한 단락 시간 Δt_{short}와 비례하므로, 본 논문에서는 입력 필터뿐만 아니라 빠른 스위칭 특성을 가진 GaN 소자를 적용하여 단락 전류를 저감하였다.

입력 필터는 단락 전류 제한뿐만 아니라 고조파 성분을 저감해야 한다. 제안하는 입력 필터의 고조파 저감 능력을 확인하기 위해 그림 5와 같은 매트릭스 컨버터의 입력 측 단상 등가회로를 살펴본다. 단상 등가회로에서는 계통 인덕턴스 L_g와 커패시터의 등가 직렬 저항 R_c가 고려되었다. 매트릭스 컨버터의 입력 측은 중속 전류원으로 해석할 수 있다. 계통 측 전류 i_g와 매트릭스 컨버터의 입력 전류 i_M 간 전달 함수 G_T(s)는 다음과 같다.

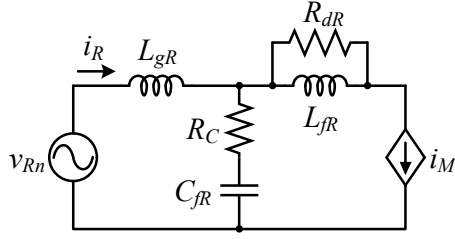
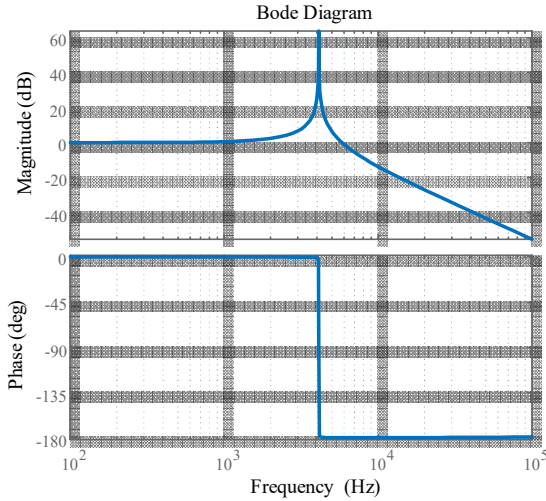


Fig. 5. Single phase input equivalent circuit.

Fig. 6. Frequency response of $G_i(s)$.TABLE I
PARAMETERS OF MATRIX CONVERTER

Parameter	Value
Input line-to-line voltage	200 V _{rms}
Grid frequency	60 Hz
Filter inductance	0.25 mH
Filter capacitance	5 μ F
Damping resistance	10 Ω
Switching frequency	10 kHz

$$G_i(s) = \frac{i_g}{i_M} = \frac{R_c C_f s + 1}{L_g C_f s^2 + R_c C_f s + 1} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 계통 인덕턴스와 입력 필터의 커패시터는 2차 저역 통과 필터로 동작함을 알 수 있다. 전달 함수 $G_i(s)$ 의 주파수 응답은 그림 6과 같다. 주파수 응답에서 사용된 입력 필터의 값들은 표 1과 같고, 계통 인덕턴스 L_g 와 등가 직렬 저항 R_c 는 각각 0.2 mH와 5 m Ω 으로 가정하였다. 본 논문에서 스위칭 주파수는 10 kHz이며, 주파수 응답에서 볼 수 있듯이 $G_i(s)$ 의 공진 주파수는 스위칭 주파수보다 낮은 4.1 kHz이다. 따라서 매트릭스 컨버터의 입력 전류는 입력 필터에 의해 고조파 성분이 저감되어 계통으로 전달된다.

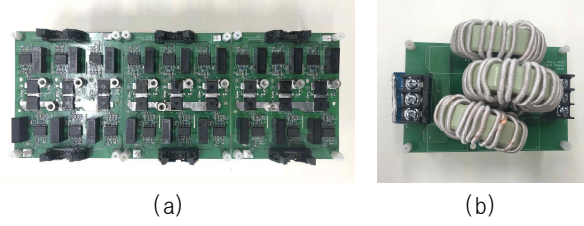


Fig. 7. Matrix converter prototype. (a) Matrix converter, (b) Input filter.

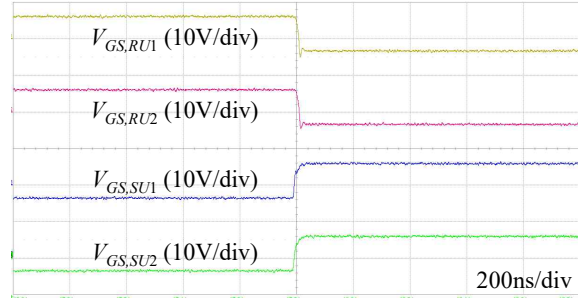


Fig. 8. Switching waveforms.

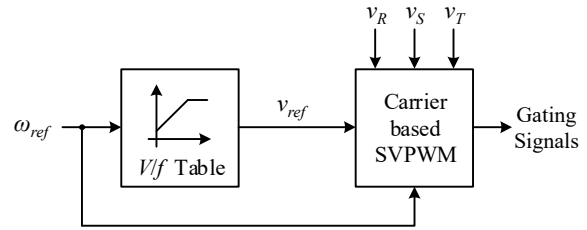


Fig. 9. Control block diagram.

4. 실험 결과

제안하는 입력 필터를 검증하고자 그림 7의 직접형 매트릭스 컨버터와 입력 필터를 제작하여 유도 전동기를 구동하였다. GaN 소자는 infineon 社의 IGO60R070D1을 사용하였다. 유도 전동기 구동을 위해 캐리어 기반 변조 방식^[8]을 사용하여 출력 전압을 합성하였으며, 입력 전류 정현파 제어는 수행하지 않았다. 캐리어 기반 변조 방식은 Texas instruments 사의 TMS320F28377를 사용하여 구현되었다.

그림 8은 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법으로 동작 시 각 스위치에 인가되는 게이트-소스 전압 파형이다. 그림 2(a)에 표시된 스위치의 게이트-소스 전압 파형을 측정하였으며, 커뮤테이션 시간 및 데드타임이 존재하지 않는 것을 알 수 있다.

그림 9는 유도 전동기 구동 시 사용한 V/f 제어 블록도이다. 그림 10은 유도 전동기 구동 시 매트릭스 컨버터의 입력 파형이다. 컨버터 측 전류 i_{MR} 을 살펴보면 단락 전류의 크기가 제한되고 있으며, 계통 측 전류 i_{gR} 에서는 단락 전류가 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 계통 측 전류는 컨버터 측 전류와 비교하여 고조파 성분

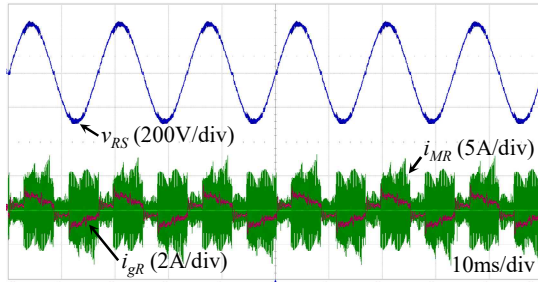


Fig. 10. Input waveforms.

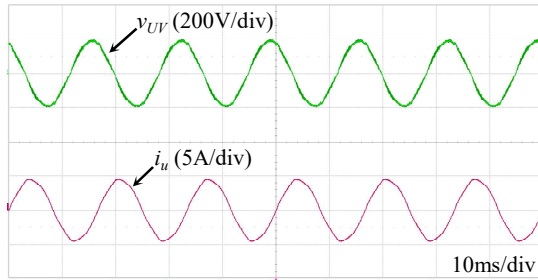


Fig. 11. Output waveforms.

들이 저감된 것을 알 수 있다. 그림 11의 출력 파형은 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법과 제안하는 입력 필터를 적용한 매트릭스 컨버터가 원하는 전압 및 전류를 출력할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법을 적용한 직접형 매트릭스 컨버터를 위한 입력 필터가 제안되었다. 스텝리스 전류 커뮤테이션 기법 적용에 따라 발생하는 과전류를 막기 위해 기존에 사용되던 LC 구조의 입력 필터를 CL 구조로 변경하였다. 또한 과전류가 흐르는 시간을 줄이기 위해 GaN 소자를 적용하였다. 유도 전동기 구동 실험 결과를 통해 제안하는 입력 필터가 고조파 저감은 물론 단락 전류의 크기를 제한함을 확인하였다. 결론적으로 제안하는 입력 필터는 양방향 스위치의 구조 및 출력 전류의 극성 측정 여부와 무관한 스텝리스 커뮤테이션 기법을 사용할 수 있게 한다. 이는 매트릭스 컨버터의 구현을 단순화하여, 전동기 구동 분야에서 매트릭스 컨버터의 활용성을 증대시킬 것으로 기대된다.

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B2009425).

References

- [1] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 2, pp. 276-288, Apr. 2002.
- [2] P. W. Wheeler, J. Clare, and L. Empringham, "Enhancement of matrix converter output waveform quality using minimized commutation times," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 1, pp. 240-244, Feb. 2004.
- [3] A. Arias, L. Empringham, G. M. Asher, P. W. Wheeler, M. Bland, M. Apap, M. Sumner, and J. C. Clare, "Elimination of waveform distortions in matrix converters using a new dual compensation method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 4, pp. 2079-2087, Aug. 2007.
- [4] M. Hamouda, H. F. Blanchette, and K. Al-Haddad, "Indirect matrix converters' enhanced commutation method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 2, pp. 671-679, Feb. 2015.
- [5] S. Nagai, Y. Yamada, N. Negoro, H. Handa, M. Hiraiwa, N. Otsuka, and D. Ueda, "A 3-phase AC/AC matrix converter gan chipset with drive-by-microwave technology," *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-14, Jan. 2015.
- [6] I. Sarkar, S. K. Show, and P. Syam, "Stepless current commutation in matrix converter," in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, PEDES (Drives and Energy Systems)*, pp. 1-6, Dec. 2012.
- [7] C. Klumpner, P. Nielsen, I. Boldea, and F. Blaabjerg, "A new matrix converter motor (MCM) for industry applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 2, pp. 325-335, Apr. 2002.
- [8] Y. Yoon and S. Sul, "Carrier-based modulation technique for matrix converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1691-1703, Nov. 2006.