

전류형/전압형 컨버터를 이용한 대전력 하이브리드시스템용 출력필터 구조 연구

김태식, 곽상신*, 권우현
경북대학교, *대구대학교

A Study of Output Filter Design for Current/Voltage Source Converter in High-Power Hybrid System

Tae-Sik Kim, Sang-Shin Kwak*, Woo-Hyen Kwon
Kyungpook National University, *Daegu University

ABSTRACT

본 논문에서는 전류형 인버터(CSI)와 전압형 인버터(VSI)를 조합하여 유도성 부하에 정현파 전류를 공급하는 시스템에서, LC 소자를 추가함으로써 전압형 인버터의 VA rating을 줄일 수 있는 방법을 제안하였다. 전력제어용 스위칭 소자인 SCR은 대용량인 장점이 있는 반면에 턴오프 제어가 되지 않고, 비선형 특성으로 인해 고조파가 발생한다. 이러한 단점을 개선하기 위해 전압형 인버터를 사용하여, SCR를 OFF하고 부하에 정현파 전압/전류를 제공한다. 또한, 출력단에 수동 LC 필터를 추가하여 전압원 인버터의 VA rating을 저감시키는 구조를 연구하고 이를 Psim을 이용한 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

일반적으로 부하전류 인버터(Load Commutated Inverter)에 기반한 유도전동기 운전은 펌프, 컴프레서, 팬 등 매우 높은 힘이 필요한 곳에 적용되었다. 이러한 구동 시스템은 사이리스터를 이용한 전류형 인버터(Current Source Inverter)를 사용함으로써 경제적이고 신뢰성이 뛰어난 효과를 얻을 수 있는데, 사이리스터의 동작은 자연 전류(Natural commutation)를 이용한다. 이것은 단순함, 강인성, 가격 효율성, 그리고 낮은 스위칭 손실을 가진다.

LCI 기반의 유도전동기 제어는 지난 수십 년 동안 연구되었고, 중·대전력 시스템에 적용할 수 있도록 성능이 개선되었다. 그러나 일반적인 LCI 기반 시스템의 사용은, 몇 가지 심각한 문제를 가지고 있다. 첫째는 시스템이 사이리스터 기반 토폴로지이므로, 사이리스터를 위한 안전한 전류(Safe Commutation)이 보장되어야 하고, 모든 영역에서 진상 역률(Leading Power Factor)가 되어야 한다. 자연 전류를 위해 진상 역률이 요구되는 것은 출력 측에 추가적인 커패시터를 유도 전동기와 병렬로 연결함으로써 조정할 수 있으나, 유도전동기의 용량 증가에 따라 더 큰 용량의 커패시터가 요구되고 커패시터의 값이 불합리하게 커질 수 있다. 아울러 출력 측 커패시터와 유도전동기 인덕턴스의 상호 작용에 의한 공진현상이 일어날 수 있고, 높은 주파수 영역에서의 급격한 운전성능 저하 및 불안정성을 초래할 수 있다. 그리고 전동기의 저속 운전 영역에서 발생하는 저차 하모닉이 많이 포함된 준방형파(Quasi-Square wave) 전류 파형은, 유도전동기의 고정자 누설 인덕턴스의 전압 스파이크 뿐만 아니라 상당히 큰 전류 하모닉과 손실을 발생시킬 수 있

고, 기계가 빨리 고장 날 수 있는 잠재적인 위험이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 것으로, 출력 측 커패시터를 대신하여 전압형 인버터(Voltage Source Inverter)를 사용하는 방법이 있다. 이것은 LCI와 VSI를 병렬로 연결하여 LCI 기반 유도 전동기 운전에 적용하는 것으로, 일반적인 LCI 기반 유도 전동기 구동시스템에서 커패시터로 인해 발생하는 문제를 효율적으로 개선할 수 있다. VSI를 이용함으로써 LCI의 안정된 동작을 위한 진상 역률각을 만들 수 있고, 출력 커패시터를 사용함으로써 발생하는 공진현상과 고 주파수 영역에서의 불안정한 동작을 차단할 수 있다.

VSI를 이용한 시스템은 언급한 바와 같이 많은 장점을 가지나 커패시터를 사용한 것에 비해 비용이 많이 든다. 특히 VSI의 VA rating에 고저에 따라 시스템 구성 비용에 차이가 생긴다.

본 논문에서는 LCI와 VSI를 조합한 하이브리드 시스템을 구성하고, 부하로는 유도전동기와 비슷한 환경으로 R-L소자를 이용한다. 여기에서 VSI를 사용함으로써 생기는 높은 VA rating을, 출력단에 수동 LC필터를 추가하여 저감시키는 방법을 제안하였다. 이를 Psim을 이용한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 본론

2.1 일반적인 LCI 기반 시스템

<그림 1>은 일반적인 LCI 기반 유도 전동기 운전의 구성을 나타낸 것이다.

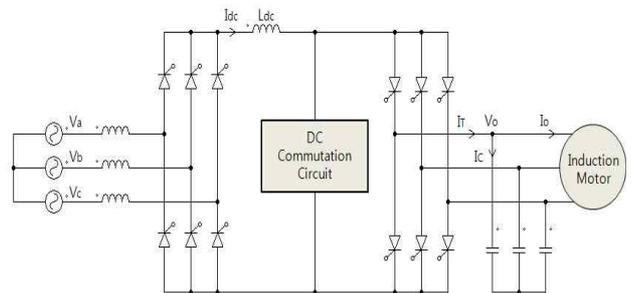


그림 1 일반적인 LCI 기반 시스템
Fig. 1 Conventional LCI-based system

이 시스템은 입력측의 3상 위상제어 정류기와 dc-link 인덕터, 그리고 출력측 CSI로 구성된다. dc-link 인덕터를 통해 유도전동기에 전류가 공급되고, 이는 위상제어 정류기에 의해 제어된다. dc-link 인덕터는 전류 하모닉을 줄이고 LCI의 입력을 확보한다. 그리고 제어 정류기의 점화각(Delay angle)에 의해 부하 전류의 진폭과 dc 전류 진폭을 제어한다.

LCI를 구성하는 사이리스터 소자의 안정적인 On/Off 제어를 위해, LCI 출력전류인 I_T 는 유도전동기의 상 전압인 V_O 에 앞서야 한다. 유도전동기의 상 전류는 전동기의 특성에 의해 항상 상 전압의 위상보다 뒤진다. 유도전동기 상 전류의 위상 이동을 위해 출력 커패시터가 추가함으로써 진상 역률을 가질 수 있고, 따라서 LCI의 안정적인 전류(Safe Commutation)를 확보할 수 있다.

<그림 2>는 출력측에 커패시터를 이용하여 전류의 위상 이동과 진상 역률각 θ 에 이르게 하는 것을 나타낸다.

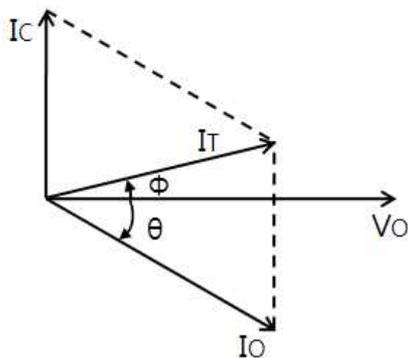


그림 2 일반적인 LCI 기반 시스템의 벡터도
Fig. 2 Vector diagram of Conventional LCI-based system

또한 출력 커패시터는 높은 주파수에서 전류 하모닉을 위한 낮은 임피던스 통로 역할을 함으로써, 인버터에서 나오는 출력 전류파형을 정현파 형태로 부드럽게 만든다. 그러나 전동기의 낮은 속도 영역에서는 커패시터로 충분한 진상각을 만들 수 없다. 따라서 DC Commutation 회로를 추가하여 전동기의 낮은 속도에서도 동작이 가능하게 한다.

출력 커패시터와 DC Commutation 회로가 포함된 일반적인 LCI 기반 시스템의 문제점은 유도 전동기의 용량이 커짐에 따라 커패시터의 크기가 커져야 하고, 대전력 시스템에서 사용할 때 신뢰성이 떨어진다. 그리고 출력 커패시터와 전동기 인덕턴스의 상호 작용으로 인해 공진현상이 야기될 수 있다. 아울러 높은 주파수 영역에서 시스템이 불안정하며, DC Commutation 회로에 의해 전동기의 낮은 속도 영역에서 토크 진동이 발생할 수 있다.

1.2 LCI와 VSI를 조합한 하이브리드 시스템

<그림 3>은 일반적인 LCI 기반 유도 전동기 운전 시스템에서 출력 커패시터를 대신하여 VSI를 연결한 시스템을 나타낸다. 이 시스템은 3상 위상제어 정류기와 dc-link 인덕터와 연결된 LCI, 그리고 3상 VSI로 구성된다. 여기서 VSI는 LCI와 병렬로 연결된다.

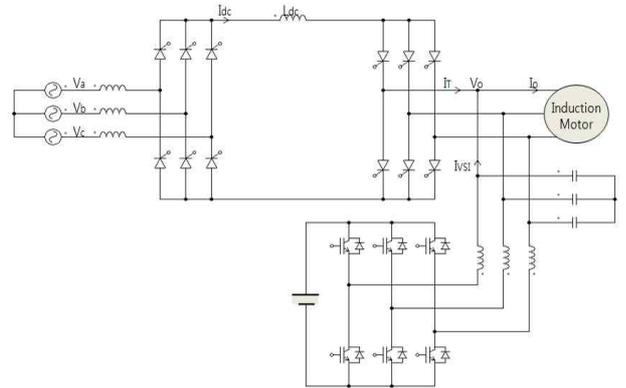


그림 3 LCI·VSI 하이브리드 시스템
Fig. 3 Hybrid system of LCI & VSI

VSI의 주요 기능은 LCI의 안정적인 동작을 위한 전류 각을 제공하고, 유도전동기의 속도를 조절하기 위해 전동기의 정현파 상 전압을 인가하는 역할을 한다. 이때 유도전동기의 속도는 순간적으로 조정되는 출력 전압 진폭과 VSI의 주파수에 의해 조절된다. 그리고 VSI의 동작에 의해 LCI의 안정적인 동작을 위한 진상 역률은 유도 전동기의 전체 속도 영역에서 얻을 수 있다. 일반적인 LCI 기반의 유도전동기 구동 시스템에 포함된 출력 커패시터와 DC commutation 회로 없이 동작하므로, 커패시터와 DC commutation 회로로 인해 발생하는 문제점을 해결할 수 있다.

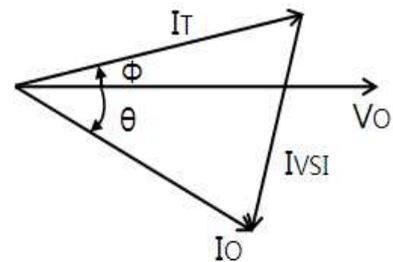


그림 4 하이브리드 시스템의 벡터도
Fig. 4 Vector diagram of system

<그림 4>는 하이브리드 시스템에서의 전류 벡터도이다. θ 는 LCI의 안전한 전류를 위한 진상 역률각이고, θ 는 유도전동기의 전압, 전류간의 위상차를 나타낸다. LCI는 전동기 부하에 유효전력을 공급하고, VSI는 유효전력을 제공함과 동시에 LCI의 출력전류와 전동기의 상전압 간 위상을 이동시킨다.

하이브리드 시스템이 많은 장점을 가지고 있지만, 커패시터를 사용하는 일반적인 LCI 기반 시스템과는 달리 VSI를 사용함으로써 시스템 구성에 드는 비용이 올라가는 단점이 발생된다. 그러므로 하이브리드 시스템의 가격 효율을 위해 VSI Power rating을 최소화 할 필요가 있다.

1.3 LC 필터를 추가한 하이브리드 시스템

<그림 5>는 본 논문에서 제안된 시스템으로, 기존의 LCI와 VSI를 병렬로 연결한 하이브리드 구조에 LC필터를 추가한 형태이다.

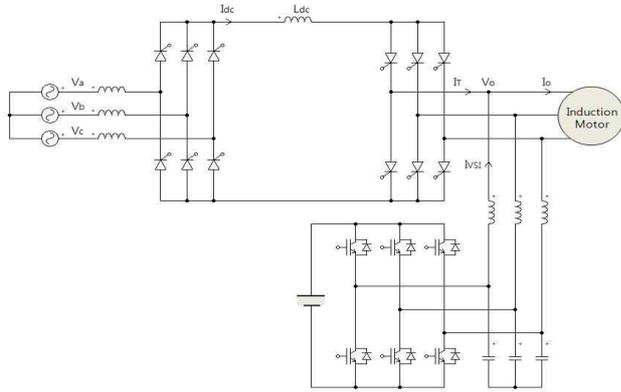


그림 5 제안된 하이브리드 시스템
Fig. 5 Proposed Hybrid system

하이브리드 시스템을 이용함으로써 여러 가지 장점을 유지할 수 있는 것과 함께, VSI를 사용함으로써 발생하는 시스템 구성 비용이 증가되는 문제를 개선하기 위해 제안되었다. 이것은 출력 측에 LC 소자를 추가하여 VSI의 VA rating을 줄일 수 있다. 따라서 더 작은 용량의 VSI를 사용할 수 있으므로 시스템 구성 비용을 감소시킬 수 있다.

출력 LC 필터 소자의 값은 아래의 <표 1>에 명시하였다.

표 1 출력 측 LC 필터값
Table 1 LC filter parameters in output

소자명	값
L	1[nH]
C	100[uF]

1.4 모의 실험

Psim을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 시스템의 타당성을 검증하였다. 출력 부하는 유도전동기와 비슷한 특성을 가질 수 있도록 R-L 부하를 이용하였고 각각의 크기는 저항은 5[Ω], 인덕터는 10[mH]이다.

먼저 기존의 LCI와 VSI를 조합한 하이브리드 시스템에서의 LCI 출력전류(I_T)와 부하전류(I_O), 그리고 VSI 측 전류(I_{VSI}) 파형은 다음과 같다.

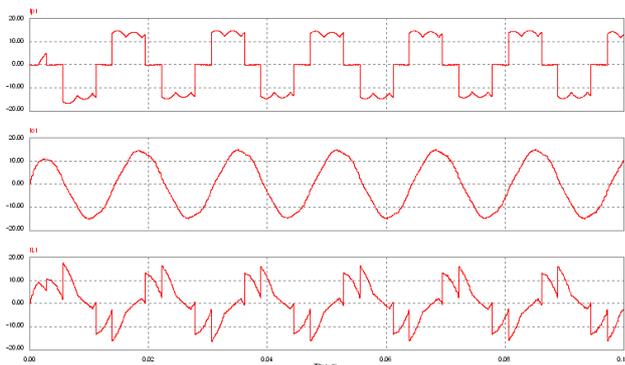


그림 6 기존 하이브리드 시스템의 전류파형 (I_T , I_O , I_{VSI})
Fig. 6 Current waveform in Hybrid system (I_T , I_O , I_{VSI})

다음은 하이브리드 시스템에 <표 1>과 같은 LC 필터를 추가하여 구성된, 제안된 시스템에서의 LCI 출력전류(I_T)와 부하전류(I_O), 그리고 VSI 측 전류(I_{VSI}) 파형이다.

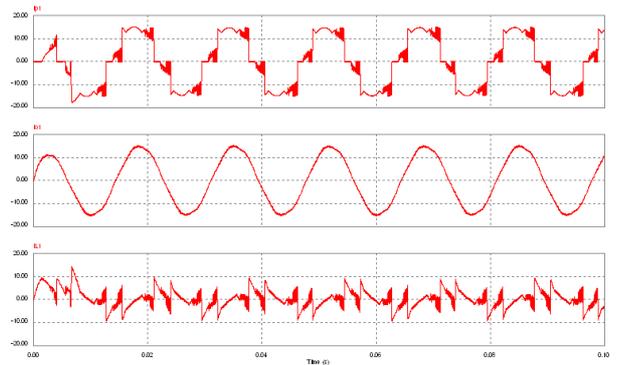


그림 7 제안된 시스템의 출력 전류파형 (I_T , I_O , I_{VSI})
Fig. 7 Current waveform in proposed system (I_T , I_O , I_{VSI})

위의 Psim 시뮬레이션 결과를 비교해보면, 부하전류의 파형은 정현파 형태로 동일하게 나타난다. 출력 측에 LC 필터를 추가하였을 때, LCI 출력전류 I_T 는 약간의 왜곡이 발생하였으나 기존의 하이브리드 시스템에서의 전류와 거의 동일한 값을 가진다. 그리고 VSI 측 전류 I_{VSI} 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

일반적인 LCI 기반 시스템은 안정된 동작을 위해 출력 측에 커패시터를 추가하여 사용한다. 커패시터로 인해 공진현상과 시스템의 불안정 등 많은 문제점이 발생하고, 이는 LCI와 VSI를 조합한 하이브리드 시스템을 사용함으로써 개선할 수 있다. 그러나 VSI의 사용으로 시스템 구성 비용이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 하이브리드 시스템의 출력 단에 LC 수동필터를 추가하여 VSI의 VA rating을 저감시키는 구조를 제시하였고, Psim 시뮬레이션을 통해 시스템의 원활한 동작을 확인하였다.

본 연구는 2009년도 한국연구재단 (기초연구사업)의 지원 (2009-0068746)과 2009년 교육과학기술부로부터 지원 (지역거점연구단육성사업/노화극복·웰빙을 위한 융합의료기술개발사업단)받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] H.A. Toliyat, and S. Kwak, "A Hybrid Solution for Load-Commutated-Inverter-Fed Induction Motor Drives", IEEE Trans, Industry Applications, Vol. 41, No. 1, pp. 83-90, 2005. Jan/Feb
- [2] J. -H. Sung, S. Park, and K. Nam, "New hybrid parallel active filter configuration minimising active filter size", IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 147, No. 2, pp. 93-98, 2000. March
- [3] H. Fujita, and H. Akagi, "A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters" IEEE Trans, Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1020-1025, 1991. Nov/Dec