

복소 벡터를 이용한 3상 인버터 전류제어기 설계 및 해석

이태진, 조종민, 차한주
충남대학교 전기공학과

Analysis and Design of Current Control for Three Phase Inverter Using Complex Vector

Taejin Lee, Jongmin Jo, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 3상 인버터에 사용되는 전류제어기 모델링을 복소 벡터를 이용하여 해석한다. 동기좌표계에서 다중 입·출력 구조로 구성되어 있는 제어기 모델링을 복소 벡터 표기를 이용하여 단일 입·출력 구조로 나타낼 수 있어 제어기 설계 및 해석이 간편하다는 장점이 있다. 동기좌표계에서 RL부하는 커플링 성분이 존재한다. 동기주파수 50Hz, 200Hz일 경우 일반적인 PI 전류제어기 특성을 확인했으며, 동기 주파수가 200Hz이며 커플링 성분인 L 값이 $\pm 30\%$ 인 조건에서 디커플링 및 복소 벡터 전류제어기의 특성을 비교했다. 디커플링 제어기의 특성은 오버슈트가 발생하고 긴 정착시간이 걸리지만 복소 벡터 전류제어기는 커플링 성분의 오차에 관계없이 안정적으로 제어 수행이 가능하다. 시스템의 파라미터의 불확실성에 대해 복소 벡터 전류제어기가 강인한 특성을 가진다.

1. 서론

3상 AC 시스템에서 널리 사용되고 있는 PI 전류제어기는 3상 좌표계를 d q축 변환을 통해 동기좌표계에서 DC 값으로 표현하여 제어를 수행한다. 플랜트가 인덕턴스 기반의 모델인 경우 동기좌표계에서 d q축에 각각 커플링 성분이 존재한다. 낮은 주파수영역에서는 커플링 성분에 의해 발생하는 오차를 무시할 수 있지만, 높은 주파수에서는 오차가 비례적으로 증가하므로 커플링 성분을 제거하는 것은 중요한 부분이다. 전류제어기는 다중 입·출력 구조로 구성되어 있으므로 커플링 성분을 고려한 제어기 설계 및 해석은 복잡하나, 복소 벡터는 단일 입·출력 구조로써 커플링 성분까지 고려하여 설계 및 해석이 간편하다는 장점을 가진다.

본 논문에서는 커플링이 고려된 전류제어기를 복소 벡터로 나타내며, 주파수 응답 특성 및 단위 응답을 통해 제어기의 특성을 확인한다. 커플링 성분을 제거하기 위한 두 제어기가 언급되며, 또한 파라미터 값의 차이에 따라 나타나는 특성을 비교한다. 복소 벡터를 이용한 전류제어기 해석 및 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK을 통해 나타낸다.

2. 복소 벡터 동기좌표계 모델링

2.1 스칼라 형태의 동기좌표계 PI 전류제어기

그림 1은 스칼라 형태의 동기좌표계 PI 전류제어기이며 다

중 입·출력 구조로 구성되어 있으므로 커플링 성분을 고려한 제어기 설계 및 해석이 복잡하다.

전류제어기 모델링의 플랜트는 RL 부하로 고려하였으며, 파라미터는 $R=0.25\Omega$, $L=1.1mH$ 이다. 제어기 이득은 영점 극점 상쇄기법의 ($R/L=k_i/k_p$)조건을 충족시키는 값으로 선정하였으며, 각 제어기의 특성을 정확하게 비교하기 위해 제어기 대역폭은 200Hz로 설정하였다.

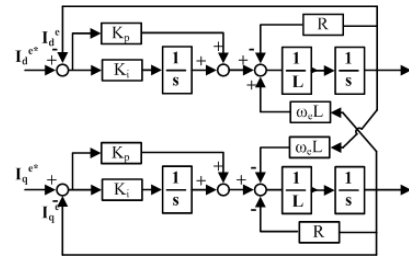


그림 1. 스칼라 형태의 동기좌표계 PI 전류 제어기
Fig 1. Scalar block diagram of PI Current Controller in synchronous reference frame

2.2 복소 벡터 형태의 동기좌표계 PI 전류제어기

복소 벡터 형태는 다중 입·출력을 단일 입·출력으로 나타낼 수 있기 때문에 주파수 응답특성 및 근계적법 해석에 간편하다. 스칼라 형태의 동기좌표계를 복소 벡터 형태로 나타내면 식 (1)과 같이 복소평면에서 직각좌표 및 극좌표 형식으로 표현된다. 여기서 F 는 $|f_{dq}|$ 이고, $\theta = \tan^{-1}(f_q/f_d)$ 을 의미한다.

$$f_{dq} = f_d + jf_q = Fe^{j\theta} \quad (1)$$

그림 2는 스칼라 형태의 제어기 구조를 복소 벡터 제어기 구조로 나타냈으며 점선의 여부에 따라 커플링 성분만을 포함한 PI전류제어기와 디커플링 PI 전류 제어기로 구분 할 수 있다.

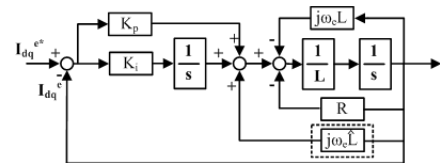


그림 2. 디커플링 PI 전류제어기 블록도
Fig 2. block diagram of Decoupling PI Current Controller

그림 3은 복소 벡터 동기좌표계 PI 전류제어기의 단위 응답 특성이다. 50Hz인 경우 10ms내에 정상상태에 도달하지만 200Hz인 경우 큰 오차가 발생하며 정상상태까지 도달하는데

약 40ms가 걸린다. 플랜트의 극점과 제어기의 영점이 상쇄가 되면 전류제어기가 이상적으로 동작하지만 동기주파수가 점차 증가하게 되면 제어기 영점과 플랜트 극점이 서로 멀어지게 되어 시스템이 불안정하게 된다.

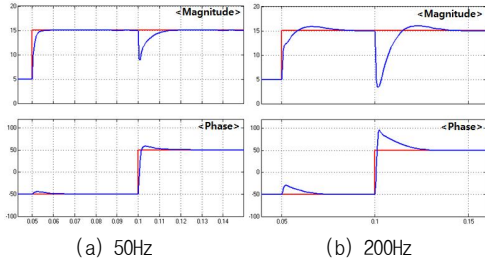


그림 3. PI 전류제어기의 단위 응답
Fig 3. Step response of classical PI Current Controller

그림 4는 복소 벡터 동기좌표계 디커플링 PI 전류제어기에 대한 단위 응답 특성이다. 동기주파수 200Hz 일 때 $L=1.1\text{mH}$ 기준으로 (a)는 L 값이 130%인 경우이고, (b)는 기준이 되는 L 값이며, 전향보상 값 \hat{L} 은 1.1mH이다. $L \neq \hat{L}$ 인 경우에 디커플링 제어기는 오버슈트가 발생하며, (b)에 비해 긴 정착시간이 걸린다는 것을 확인 할 수 있다.

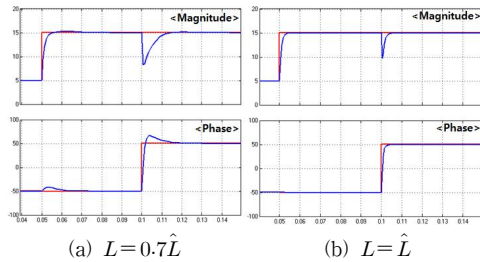


그림 4. 동기주파수가 200Hz 일 때, 디커플링 PI 전류제어기의 단위 응답 특성
Fig 4. Step response of Decoupling PI Current Controller in Synchronous Frequency 200Hz

2.3 복소 벡터 전류제어기

그림 5는 복소 벡터 PI 전류제어기로서 제어기 내의 적분기에 발생하는 오차를 보상하는 구조이다. 디커플링 PI 전류제어기는 $L = \hat{L}$ 조건이 성립해야 커플링 성분이 제거되지만, 복소 벡터 PI 전류제어기는 시스템의 파라미터의 불확실한 경우에도 정상적인 제어 수행이 가능하다. 디커플링 PI 전류제어기 경우 파라미터의 불확실성으로 인해 발생한 오차는 제어기의 적분기가 오차를 부담하게 되지만, 복소 벡터 PI 전류제어기는 제어기 내의 적분기에서 간섭 성분을 보상함으로써 인덕턴스 오차에 강한 특성을 가진다.

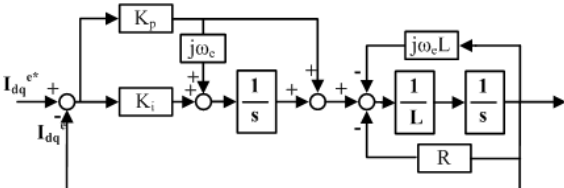
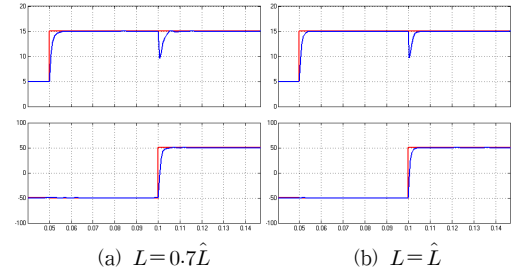


그림 5. 복소벡터 PI 전류제어기 블록도
Fig 5. Complex Vector PI Current Controller block diagram

그림 6은 복소 벡터 PI 전류제어기의 단위 응답 특성이며 그림 4와 같은 조건이다. L 값에 관계없이 (a),(b)

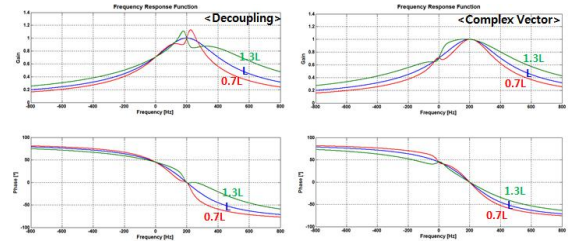
모두 안정적으로 제어를 수행하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) $L=0.7\hat{L}$ (b) $L=\hat{L}$
그림 6. 동기 주파수가 200Hz 일 때, 복소 벡터 PI 전류제어기 단위응답

Fig 6. Complex vector PI Current Controller Step Response in Synchronous Frequency 200Hz

그림 7은 디커플링 및 복소 벡터 PI 전류제어기의 동기 주파수 200Hz에서 \hat{L} 을 L 에 비해 $\pm 30\%$ 로 고려한 경우의 주파수 응답특성이며 선형 스케일로 나타낸다. 디커플링 전류제어기는 \hat{L} 값의 변동에 따라 크기 1을 기준으로 1.11과 1.13의 크기에 해당하는 오버슈트가 발생하지만, 복소 벡터 전류제어기는 오버슈트 없이 정상적으로 동작하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) Decoupling controller (b) Complex Vector Controller
그림 7. 디커플링 및 복소 벡터 PI 전류제어기 주파수 응답 특성 비교

Fig 7. Decoupling and Complex Vector PI Current Controller Compare of Frequency Response Function

3. 결론

동기좌표계에서 RL부하 기반 PI 전류제어기는 다중 입출력의 형태이기 때문에 설계 및 해석에 어려움이 있다. 복소 벡터 표기는 단일 입출력의 구조로 나타낼 수 있어 설계 및 해석을 간편하게 할 수 있다는 장점이 있다. 동기좌표계에서 존재하는 커플링 성분에 대해서 동기주파수 50Hz, 200Hz의 조건에서 일반적인 PI 전류제어기 특성을 확인했으며, 동기 주파수가 200Hz이며 커플링 성분인 L 값이 $\pm 30\%$ 인 조건에서 디커플링 및 복소 벡터 전류제어기의 특성을 비교했다. 시스템의 파라미터의 불확실성에 대해서 디커플링 전류제어기에 비해 복소 벡터 전류제어기가 강한 특성을 가진다.

참고 문헌

- [1] Fernando Briz, "Analysis and Design of Current Regulators Using Complex Vector", Proceedings of the IEEE, Vol. 36, No. 4, pp. 817-825, 2000, May/June..
- [2] Ke Dai, "Comparative Study on Current Control for Three Phase SVPWM Voltage Source Converter in Synchronous Rotating Frame Using Complex Vector Method", Proceedings of the IEEE, Vol. 2, pp. 695-700, 2003, June.