

삼상 DC/AC 인버터의 디지털 제어

이진목, 권경민, 손경민, 최은진, 임재관, 최재호
충북대학교

Digital Controller Design for Three-phase AC/DC Inverter

Jinmok Lee, Kyoung-Min Kwon, Kyoungmin Son, Cuienzhen, Jaekwan Im, Jaeho Choi
Chungbuk National University

Abstract -본 논문에서는 단독부하형 삼상인버터의 디지털 전압제어를 설계한다. 단독부하운전은 선형부하의 변동이나 비선형 부하에서도 안정적인 전압을 공급하는 것이 목적이다. 삼상 인버터를 선형 제어기로 제어하기 위해서 이상동기회전자표계로 제어하지만 두 개의 간섭항 때문에 MIMO 시스템으로 되어 해석적인 제어를 설계하기 어려워 대부분의 연구에서는 시행착오법으로 제어를 설계하였다.

본 논문에서는 삼상 인버터의 축변환시에 발생하는 간섭항의 영향을 상대이득행렬로 분석하여 간섭항의 영향을 분석하고 삼상 인버터 시스템을 SISO 시스템으로 만들어 전압제어기만을 갖는 최소 차수의 제어기를 해석적으로 설계하며 응답속도를 향상시키기위해서 오버슈트와 정정시간을 조절할 수 있는 극배치기법으로 설계한다. 설계한 제어기는 시뮬레이션과 실험을 통해서 강인성을 보인다.

1. 서 론

지금까지 화석연료에 대한 과도한 의존으로 고유가의 자원위기와 기후변화의 환경위기를 동시에 초래하고 있다. 특히 우리나라는 총 에너지의 97%를 해외 수입에 의존하고 있으므로 유가의 급변으로 인한 경제충격이 심하다. 게다가 온실가스 감축을 통한 저탄소형 산업구조의 전환이 최대의 현안과제로 부각되고 있다. 에너지·자원 사용의 최소화하고 CO2배출의 환경부하를 줄이기 위해서는 태양광, 풍력, 수소연료전지 등의 신재생에너지의 사용을 늘리는 것이 매우 중요하다. 지금까지 신재생 에너지는 대부분 계통연계운전으로 에너지를 계통으로 주입하여왔으나 앞으로는 IT기술의 집목을 통한 스마트그리드나 소규모 단위의 자체 에너지 생산 및 소비 구조의 마이크로그리드와 같은 지능형 구조의 에너지 체계로 변환을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 소규모 단위의 에너지 구조 체계는 생산한 에너지를 부하에 직접공급하는 단독부하운전을 하고 남거나 모자라는 에너지는 서로 연계하여 공급하거나 공급받게된다. 소규모 단위의 에너지 구조체계에서 부하에 안정적으로 전원을 공급하는 단독부하운전은 매우 중요하다[1].

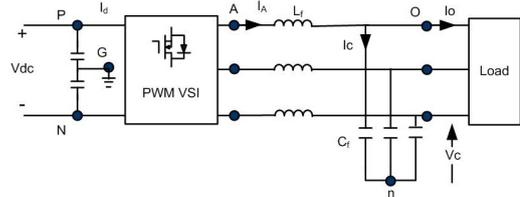
단독부하운전에서는 선형부하의 투입과 이탈과 같은 변동에서나, 비선형 부하에서도 안정적인 전압을 공급하는 것이 중요하다. 지금까지 안정한 인버터를 설계하기 위해서 몇 가지 연구가 있었다. 첫 번째로 설비용량을 증가시키는 방법이 있으나 이는 투자비용의 증가와 낮은 효율의 단점을 가지고 있고, 두 번째 방법은 부가적인 필터를 설계하는 방법도 있으나 무게와 부피, 무효전력이 증가하는 문제점이 있었다. 그러므로 최근에는 선형부하의 변동이나 비선형부하에서 강인한 제어를 설계하는 연구가 진행되고 있다. 강인한 제어를 설계하기위해서 전압제어기에 전류제어기를 추가하는 이중루프제어기, 출력전압의 왜곡을 보상해주는 전향 보상제어기, 출력전압의 왜곡분배에 대응하는 주파수에서 전압제어기의 이득이 커지는 비례 공진제어기에 대한 연구가 이루어져왔다. 그러나 삼상 인버터의 특성상 이상동기회전자표계로 제어하는 경우에 간섭항 때문에 MIMO 시스템으로 되어 해석적인 제어를 설계하기 어려워 대부분의 연구에서는 시행착오법으로 제어를 설계하였다.

본 논문에서는 삼상 인버터의 축변환시에 발생하는 간섭항의 영향을 상대이득행렬(RGA: Relative Gain Array)으로 간섭항의 영향을 분석하고 삼상 인버터 시스템을 SISO 시스템으로 만들어 전압제어기만을 갖는 최소 차수의 제어기를 해석적으로 설계한다. 본 논문에서 설계하는 제어기는 과도상태에서 오버슈트를 최소화하며 정정시간을 조절할 수 있는 제어기로서 극배치기법으로 설계하고 Matlab을 이용하여 과도상태 응답을 검증하고 PSIM과 실험을 통해서 제어기의 강인성을 보인다.

2. 본 론

VSI 삼상 인버터는 그림 1과 같다. 삼상 인버터가 단독부하형으로 사용될 경우에는 CVCF모드로 운전되며 부하의 변동이나 비선형 부하에서도 안정적인 출력을 생산하는 것이 목적이므로 전압제어를 기본으로

한다.



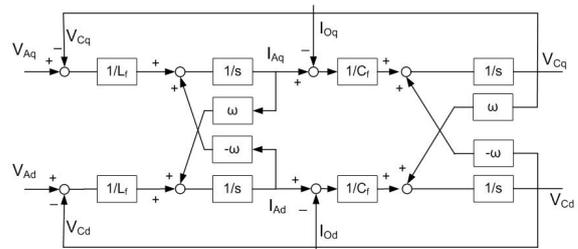
<그림 1> Three-phase VSI inverter

2.1 삼상 인버터 모델링

삼상 인버터를 제어하기위한 모델링은 이상동기회전자표계로 변환하면 식 (1)과 (2)를 얻을 수 있으며 두 식을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 삼상인버터의 d-q 모델은 두 개의 간섭항이 존재한다. 간섭항은 시스템을 MIMO로 만들기 때문에 제어를 설계하는데 어려움이 있다[2].

$$\begin{bmatrix} sV_{Cq} \\ sV_{Cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cq} \\ V_{Cd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Aq} - I_{Oq} \\ I_{Ad} - I_{Od} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} sI_{Aq} \\ sI_{Ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Aq} \\ I_{Ad} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nkq} - V_{Cq} \\ V_{knd} - V_{Cd} \end{bmatrix} \quad (2)$$



<그림 2> d-q model of three-phase inverter

간섭의 영향을 분석하기위해서 d-q모델을 상태방정식으로 변환하여 식 (3)과 같은 상태 전달함수를 이용하여 식 (4)와 같이 상대이득행렬을 구한다. 식 (4)의 결과에서와 같이 간섭의 영향이 매우 적으므로 무시할 수 있다.

$$y = \frac{1}{s^4 + 2\left(\frac{1}{LC} + \omega^2\right)s^2 + \left(\frac{1}{LC}\right)^2 + \omega^4 - \frac{2\omega^2}{LC}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{LC}s^2 - \frac{\omega^2}{LC} + \left(\frac{1}{LC}\right)^2 & -\frac{2\omega}{LC}s \\ \frac{2\omega}{LC}s & \frac{1}{LC}s^2 + \left(\frac{1}{LC}\right)^2 - \frac{\omega^2}{LC} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$A = \lambda_{ij} = [G(0)]_{ij} [G^{-1(0)}]_{ji} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 2에서 두 개의 간섭항을 무시하면 식 (5)와 같은 SISO 시스템의 전달함수를 얻을 수 있다.

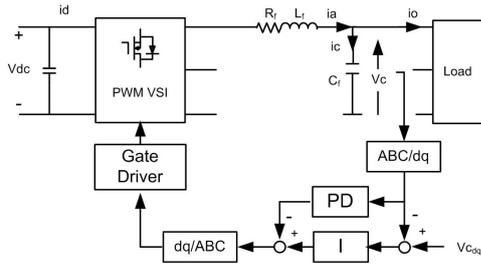
$$V_{Cd} = \frac{1}{(s^2 L_f C_f + 1)} (V_{Ad}) \quad (5)$$

2.2 제어기 설계

삼상 인버터의 전달함수 식 (5)에 그림 3과 같은 2차유도의 IPD 제어기를 포함한 전체시스템 전달함수는 식 (6)과 같다. 식 (6)에서 보는 바와 같이 4차의 특성방정식을 갖으며 영점은 추가되지 않으므로 영점으로 인한 언더슈트나 댐핑의 영향이 없는 장점을 가지고 있다.

$$T(s) = \frac{Y}{R} = \frac{GC_1}{1 + GC_2} \quad (6)$$

$$= \frac{LCT_i T_d s^4 + \frac{T_i LC}{K} s^3 + \frac{T_i T_d}{KN} (KN + K + 1) s^2 + \frac{T_i KN + T_i}{KN} s + 1}{1}$$

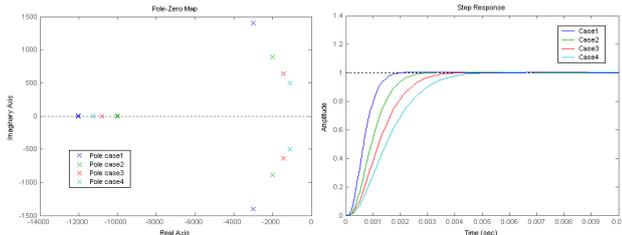


〈그림 3〉 Controller of three-phase inverter

4차의 특성방정식을 오버슈트가 없으며 정정시간이 1.2ms ~ 3.0ms를 만족하는 제어기를 극배치기법으로 설계하면 표 1과 같이 4가지 경우에 대해서 ω , ζ , m 를 설계할 수 있다. 설계한 제어기의 극의 위치와 각각의 단위계단응답은 그림 4와 같다.

〈표 1〉 Controller specification

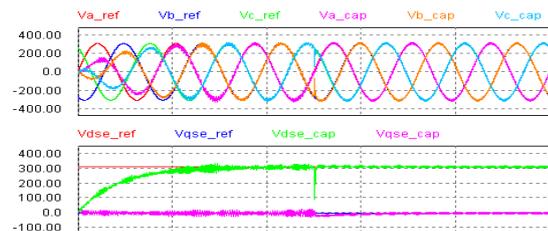
Case	T _{set} (ms)	over shoot	Omega (rad/sec)	Zeta	m
1	1.2	0	3317.11	0.906	4
2	1.9	0	2188.61	0.914	5
3	2.4	0	1573.07	0.914	7.5
4	3.0	0	1232.77	0.914	10



〈그림 4〉 (a) Pole-zero map (b) Unit-step response

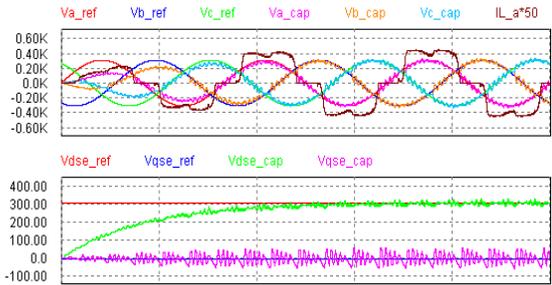
2.3 시뮬레이션 및 실험

오버슈트를 최소화하고 시간응답을 만족하는 설계된 제어기의 검증을 위해서 L:2mH와 C:3uF의 필터를 갖는 삼상 인버터를 제작하였다. 제작한 인버터는 TI사의 TMS320VC33을 이용하였으며 제어주기는 20kHz의 샘플링 주기와 10kHz의 스위칭 주기를 갖는다. PSiM을 이용하여 Case 1에 대하여 시뮬레이션한 결과가 그림 5와 6에서 나타나있다.

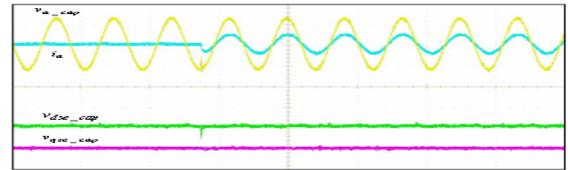


〈그림 5〉 Simulation waveform of Linear load change

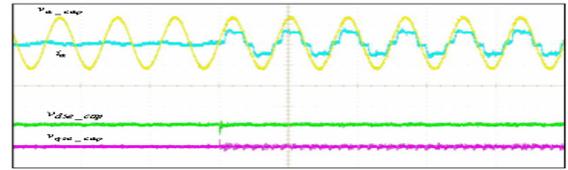
과도상태에서 오버슈트는 발생하지 않았으며 정정시간도 0.8ms로 유사한 결과였으며 비선형 부하에서도 안정된 출력을 얻을 수 있었다. 실험 결과는 그림 7과 8에서 보여주고 있다. 선형부하의 변화에서도 출력은 안정적이었으며 비선형부하의 변동에서도 마찬가지로 안정된 출력을 유지하였다.



〈그림 6〉 Simulation waveform of nonlinear load change



〈그림 7〉 Experimental waveform of Linear load change



〈그림 8〉 Experimental waveform of Nonlinear load

3. 결 론

본 논문에서는 선형부하의 변동이나 비선형 부하에서도 안정적인 전압을 공급하는 단독부하형 삼상인버터의 디지털 전압제어기를 설계하였다. 삼상 인버터를 선형 제어기로 제어하기 위해서 이상동기회전자표계로 제어하지만 두 개의 간섭항 때문에 MIMO 시스템으로 되어 해석적인 제어기를 설계하기 어려워 대부분의 연구에서는 시행착오법으로 제어기를 설계해왔으나 상대이득행렬의 분석으로 간섭항의 영향이 매우 적음을 입증하였으며 이로부터 시스템을 SISO 시스템으로 만들었다. 또한 전압제어기만을 갖는 최소 차수의 제어기를 해석적으로 설계하며 응답속도를 향상과 안정된 출력을 유지하기위해서 최소의 오버슈트와 1.2ms ~ 3.0ms의 정정시간을 갖도록 극배치기법으로 설계하였으며 이를 디지털 제어기로 변환하였다. 설계한 제어기는 시뮬레이션과 실험을 통해서 강인성함을 보였다.

이 연구는 산업자원부와, 에너지관리공단이 지원한 신·재생에너지 기술개발사업(10kW급 상업용 고분자 전해질 연료전지 시스템 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Kim and J. Choi, "Improved Digital Control Scheme of Three Phase UPS Inverter Using Double Control Strategy," IEEE APEC'97, vol. 2, pp. 820-824, 1995.
- [2] J. Lee and J. Choi, "Decoupling Voltage Controller Design for Three-phase DC/AC Inverter," in Conf. IEEE, Power and Energy, 2008.