

# DC/AC 전력 변환기의 직류단 캐패시터 최소화에 대한 연구

이욱진, 설승기

서울대학교 전기,컴퓨터공학부

## Abstract

DC 전력을 AC 전력으로 변환시키는 인버터의 직류단 캐패시터는 직류단의 안정화, 정전시 필요한 에너지의 저장 등의 목적을 가지고 있다. 큰 사이즈의 직류단 캐패시터는 주로 전해 캐패시터를 사용하는데, 전해 캐패시터는 그 부피가 클 뿐 아니라 수명 또한 여타 반도체 소자에 비하여 짧아 전체 전력변환 시스템의 수명을 단축시킨다. 따라서, 직류단 캐패시터의 크기를 줄이기 위하여 많은 연구가 진행되어왔다. 이 논문에서는 직류단의 전압 안정도를 해치지 않는 최소한의 캐패시터의 크기에 대하여 살펴보고, 그 이하 크기의 캐패시터를 사용할 수 있도록 하는 제어 방법을 제안한다.

## 1. 서론

DC의 전압원을 AC로 변환하는 인버터에는 입력 전력과 출력 전력의 순시적인 차이를 흡수하기 위한 에너지 저장 소자로 직류단(DC-Link)에 대용량의 전해(Electrolytic) 캐패시터가 사용 된다. 이러한 전해 캐패시터는 그 자체의 수명 문제뿐 아니라, 초기 충전 전류를 억제하기 위한 초기충전 회로를 필수적으로 수반 하게 된다. 또한, AC전압을 정류하여 DC전압을 얻는 다이오드 정류기를 입력단에 사용할 경우, 큰 캐패시터로 인해 입력 전류에 많은 고조파가 함유되는 문제를 가지고 있다. 그로 인해 큰 용량의 전해 캐패시터를 수십  $\mu\text{F}$ 정도의 상대적으로 작은 용량의 필름 캐패시터로 줄이는 연구들이 진행되어 왔다 [1,2].

그러나 일정 전력(Constant Power) 부하에 전력을 공급하는 인버터에 작은 용량의 캐패시터를 사용할 경우, 부하의 음의 임피던스(Negative Impedance) 특성에 의하여 직류단 전압이 불안정해지는 현상들이 알려져 있다[3,4,5]. 이를 해결하기 위해 [5]에서는 전동기의 모델을 이용하여 직류단 전압을 안정화 시키는 방법을 사용하였으나, 이 방법은 전동기의 모델에 의존적인 단점이 있다. 이 논문에서는 직접 인버터의 출력 파워를 조절하기 위하여 측정된 부하 전류를 이용하여 지령 전압을 출력함으로써 시스템의 불안정성 문제를 해결하는 제어 방법을 제안한다.

## 2. 작은 직류단 캐패시터로 인한 불안정성

### 2.1 회로 구성

그림 1은 본 논문에서 가정하고 있는 일반적인 DC/AC 전력 변환 장치의 회로 구성이다. 인버터는 PWM을 통하여 DC 전압을 AC 전압으로 변환하는 장치이지만,

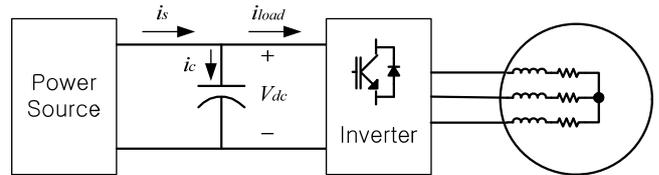


그림 1. 일반적인 DC/AC 전력변환기의 회로 구성

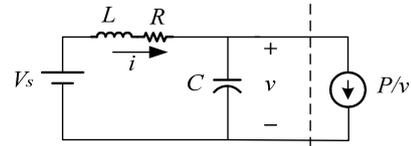


그림 2. 간략화된 DC 전력원과 정전력 부하의 회로 구성

PWM을 무시하고 부하를 일정 전력을 소모하는 전류원으로 모델링하면 그림 2와 같이 단순화 할 수 있다. 이러한 전력 변환 장치에서 일정 전력 부하는 동적으로 음의 임피던스를 가지는 특성을 갖는데, 이로 인해 입력전원의 임피던스 (L과 R)에 대하여 캐패시턴스 (C) 가 특정값 이상으로 커져야지만 직류단 전압이 안정하게 된다. 이 현상을 설명하기 위하여 그림 2의 회로 방정식을 구해 보면 식(1)과 같다.

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = V_s - Ri - v \\ C \frac{dv}{dt} = i - P/v \end{cases} \quad (1)$$

식(1)의 전류와 전압을 아래 식 (2)를 이용하여 정상상태의 값과 맥동하는 값으로 나누면 식 (3)과 같다.

$$\begin{cases} i = \bar{i} + \tilde{i} \\ v = \bar{v} + \tilde{v} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L \frac{d(\tilde{i} + \tilde{i})}{dt} = -R(\tilde{i} + \tilde{i}) - (\tilde{v} + \tilde{v}) \\ C \frac{d(\tilde{v} + \tilde{v})}{dt} = (\tilde{i} + \tilde{i}) - \left(\frac{P}{\bar{v}} - \frac{P}{\bar{v}^2} \tilde{v}\right) \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 비선형항인  $\frac{P}{\bar{v} + \tilde{v}}$  를 동작점에서 선형화하면,

아래의 식(4)로 된다.

$$\begin{cases} L \frac{d\tilde{i}}{dt} = -R\tilde{i} - \tilde{v} \\ C \frac{d\tilde{v}}{dt} = \tilde{i} + \frac{P}{\bar{v}^2} \tilde{v} \end{cases} \quad (4)$$

이 시스템의 특성방정식은 아래 식 (5)과 같이 된다.

$$P(s) = s^2 + \left(\frac{R}{L} - \frac{P}{C\bar{v}^2}\right)s + \left(\frac{\bar{v}^2 - RP}{LC\bar{v}^2}\right) \quad (5)$$

이 시스템이 안정한 조건을 구해보면 아래와 같은 최소 캐패시터 크기에 대한 조건식을 얻을 수 있다.

$$C > \frac{LP}{R\bar{v}^2} \quad (6)$$

위 식으로부터, 직류단 전압이 안정한 상태에 있기 위해서 필요한 캐패시터의 크기는 출력 부하의 전력과 전압원의 인덕턴스에 비례하고, 전압원의 저항 및 정상상태 전압의 제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다.

## 2.2 직류단 전압 안정화 방법

일반적인 삼상 삼선식의 인버터에서 인버터로부터 부하로 공급되는 전력은 아래 식 (7)과 같이 인버터 출력 전압과 부하 전류식으로 표현할 수 있다.

$$P_{out} = \frac{3}{2} \text{Re}(\mathbf{V}_{dq}^\omega \cdot \mathbf{I}_{dq}^{\omega*}) \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{V}_{dq}^\omega$  는 임의의 속도,  $\omega$  ,로 회전하는 d-q 좌표축에서의 복소수 입력 전압이고  $\mathbf{I}_{dq}^{\omega*}$  는 같은 좌표축에서의 입력전류의 켈레복소수(Conjugate)이다. 또 'Re'는 복소수의 실수부를 뜻한다. 부하 전류의 측정이 가능하다고 가정하면, 인버터의 출력 전압을 조정함으로써 인버터의 출력 전력을 조절할 수 있다. 따라서, 부하가 필요로 하는 전압에 부가적인 전압을 더하거나 빼서 인버터를 통하여 출입하는 전력을 조절할 수 있다. 이러한 부가적인 전력을  $\tilde{p}$  라고 하면,  $\tilde{p}$  를 얻기 위해 필요한 전압( $\mathbf{V}_{vc}^\omega$ )은 측정된 부하 전류를 이용하여 전류와 동상(In Phase)의 전압을 인가할 경우 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{V}_{vc}^\omega = \frac{2}{3} \left( \tilde{p} \mathbf{I}_{dq}^\omega / |\mathbf{I}_{dq}^\omega|^2 \right) \quad (8)$$

이 부가적인 전력( $\tilde{p}$ )을 직류단의 전압 변동분( $\tilde{v}$ )의 상수배(k배)로 놓으면 식(4)의 특성 방정식은 아래와 같이 바뀌게 된다.

$$P(s) = s^2 + \left(\frac{R}{L} - \frac{P}{C\bar{v}^2} + \frac{k}{C\bar{v}}\right)s + \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{kR\bar{v} - RP}{\bar{v}^2}\right) \quad (9)$$

위 식으로부터 직류단 전압이 안정하게 되는 조건을 구하게 되면 아래 식 (10)과 같다.

$$k > \frac{P}{\bar{v}} - \frac{RC}{L}\bar{v} \quad (10)$$

위 식으로부터 알 수 있듯이, 위 부등식을 만족하는 레환 제어기의 비례 이득 k를 적용하면, 작은 캐패시터 용량으로 인해 생기는 직류단 전압 불안정 문제를 해결할 수 있다.

실제적으로 직류단 전압을 측정하고 최종적으로 인버터 전압을 합성하기까지의 시간 지연으로 인하여 제어기 이득을 높이는 것에 제한이 있다. 그러나 시스템의 공진 주파수보다 충분히 빠르게 스위칭을 할 경우, 위 조건식을 만족하도록 제어기 이득을 결정할 수 있다.

## 2.3 전압의 합성

2.2절에서 설명한 방법을 구현하기 위하여 필요한 전압  $\mathbf{V}_{vc}^\omega$  는 여러 방향의 전압 벡터가 고려될 수 있으나, 인버터의 출력 전압이 제한되어 있으므로 전류 벡터가

위치하는 방향, 즉 동상으로  $\mathbf{V}_{vc}^\omega$  의 방향을 선정하는 것이 가장 작은 전압을 사용한다는 점에서 가장 유리하다. 부하 전류를 제어하기 위한 전류 제어기의 출력 전압을  $\mathbf{V}_{cc}^\omega$  라고 할 때, 최종적으로 부하에 인가되는 전압은  $\mathbf{V}_{cc}^\omega$  와  $\mathbf{V}_{vc}^\omega$  의 합이 된다.

또한, 디지털 제어기를 사용하는 인버터의 특성으로 인해 출력 전압은 부하 전류의 샘플링 시점으로부터 한 제어주기 후에 전압이 출력된다. 따라서, 식 (8)로부터 계산된 전압과 실제 지령되고 있는 전력의 요구량( $\tilde{p}$ )에는 차이가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 전동기 모델과 지난 주기의 전압 지령을 이용하여 실제 전압이 출력되는 시점의 전류를 예측하여 식(8)에 적용하여야 한다.

인버터가 출력할 수 있는 전압은 직류단 전압의 크기에 의하여 제한을 받는다. 따라서 전류의 변화가 급격한 과도 상태에서는 부하 전류 제어기의 출력 전압이 인버터의 출력 전압 제한을 넘는 경우가 생겨 식 (8)의 전압을 추가할 수 없는 경우가 생기게 된다. 따라서 안정된 직류단 전압을 보장하기 위하여 전류 제어기의 출력 전압을 인버터 출력 전압 제한 이하로 미리 제한할 필요가 있다. 이 전압 제한을 그림 3과 같이 인버터 출력 전압 제한의 80~90% 정도로 설정(점선으로 표시된 원)하면 부하 전류의 제어 성능에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 직류단 전압을 안정화 시킬 수 있다.

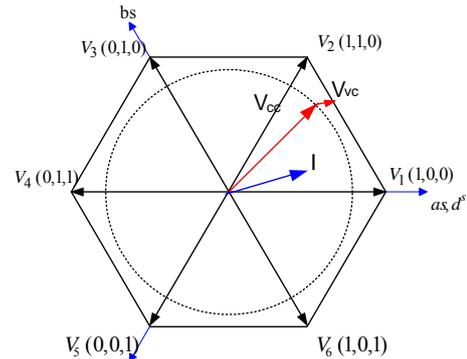


그림 3. 인버터의 전압 제한을 고려한 전류 제어기의 출력 전압 제한

## 3. 모의 실험

### 3.1 모의 실험 조건

위에서 설명한 직류단 전압 불안정의 현상을 모의하기 위하여 22kW 유도 전동기를 이용한 모의실험을 하였다. 모의 실험에 사용된 전동기의 상수 및 전원측의 임피던스는 각각 표1과 표2에 정리되어 있고, 사용된 DC 전압원은 310V였다. 전류 제어기는 동기좌표계 PI 제어기를 사용하였으며 제어기의 대역폭은 2000 rad/sec이다[6].

식(6)의 조건에 의하면, 직류단 전압이 안정하기 위한 최소의 직류단 캐패시터의 크기는 2289 $\mu$ F이다. 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz, 샘플링은 20kHz, 전동기의 속도는 1700rpm으로 고정하였다.

### 3.2 모의 실험 결과

그림 4는 조건식 (6)을 만족시키는 3000 $\mu$ F의 캐피시터를 사용하였을 경우, 계단 토크 지령에 따른 직류단 전압의 파형(순시 전압 및 샘플링된 전압)과 동기좌표계 q축

전류의 과형이다. 과도상태에서 직류단 전압의 변동이 있긴 하지만 안정한 것을 알 수 있다.

그림 5는 조건식 (6)을 만족시키지 못하는 작은 캐패시터 값(1000 $\mu$ F)을 사용하였을 경우 계단 토크 지령에 따른 직류단 전압의 과형과 동기좌표계 q축 전류의 과형이다. 인버터의 출력 전력이 커짐에 따라 직류단 전압이 불안정해져 발산하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 40 $\mu$ F의 매우 작은 캐패시터를 사용하고 식(10)의 이득 k를 80으로 한 경우의 과형이다. 직류단을 안정하게 하는 캐패시터의 크기보다 매우 작은 캐패시터를 사용함에도 불구하고 직류단 전압이 안정함을 알 수 있다.

표1. 모의 실험에 사용된 유도기

Rated Power	22 [kW]
Rs	0.044 [Ohm]
Rr	0.0252 [Ohm]
Lm	12.9 [mH]
Ls	13.45 [mH]
Lr	13.37 [mH]
Pole	4

표2. 모의 실험에 사용된 전력원의 임피던스

Inductance (L)	100 [mH]
Resistance (R)	10 [mOhm]

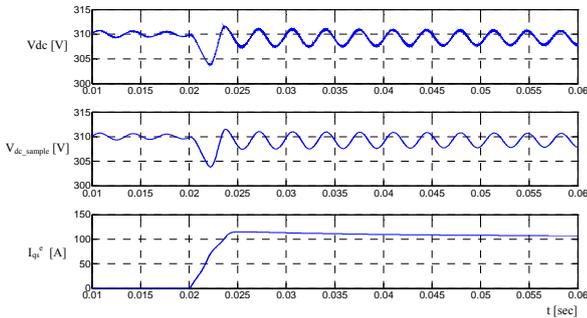


그림 4. 3000 $\mu$ F의 직류단 캐패시터를 사용하였을 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

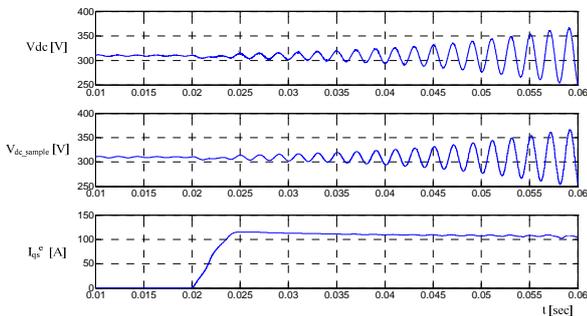


그림 5. 1000 $\mu$ F의 직류단 캐패시터를 사용하였을 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

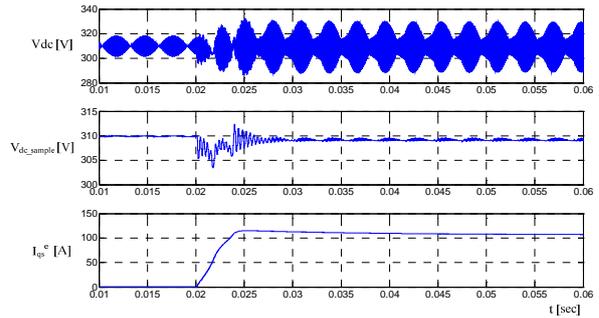


그림 6. 40 $\mu$ F의 직류단 캐패시터를 사용하고 제안된 제어 방법을 적용한 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

#### 4. 결론

인버터의 직류단에는 전압을 일정하게 유지하기 위한 에너지 저장 소자로써 대용량의 캐패시터가 사용된다. 일정한 부하 전력을 출력하는 인버터의 직류단 전압이 안정한 상태로 있을 수 있는 최소의 캐패시터 크기는 전원단의 임피던스에 따라 결정되게 된다. 그러나, 제안된 제어 방법을 적용할 경우, 직류단 전압을 안정적인 크기로 유지시키는데 필요한 캐패시터의 크기를 1/50이하로 줄일 수 있고, 그 결과 큰 용량의 전해 캐패시터를 크기가 작고 수명이 긴 필름 캐패시터로 대체할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Siyoung Kim, Seung-Ki Sul, and Thomas A. Lopo, "AC/AC Power Conversion Based on Matrix Converter Topology with unidirectional Switches ", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 36, No. 1, pp. 139-144, 2000, Jan.
- [2] Bernhard Piepenbreier and Lothar Sack, "Regenerative Drive Converter with Line-Frequency Switched Rectifier without DC Link Components", Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, Vol. 5, pp. 3917-3923, 2004, June.
- [3] Ali Emadi, Alierza Khaligh, Claudio H. Rivetta and Geoffrey A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives", IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol. 55, No. 4, pp. 1112-1125, 2006, July.
- [4] M.Belkhat, R. Cooley and A. Witulski, "Large signal stability criteria for distributed systems with constant power loads", Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, Vol. 2, pp. 1333-1338, 1995, June.
- [5] Marko Hinkkanen, Lennart Harnfors and Jorma Luomi, "Induction Motor Drives Equipped With Diode Rectifier and Small DC-Link Capacitance", Proceedings of EPE, pp. 1-10, 2007, Sept.
- [6] 설 승기, 전기기기제어론, 개정판 4 장 2 절, 2007 년 8 월, 홍릉 과학 출판사