

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 μF 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

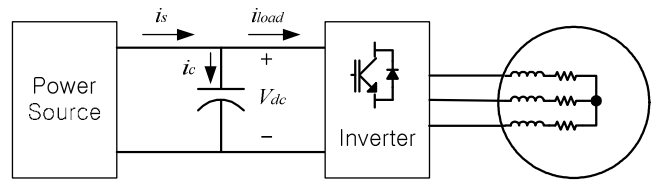


그림 1. 일반적인 DC/AC 전력변환기의 회로 구성

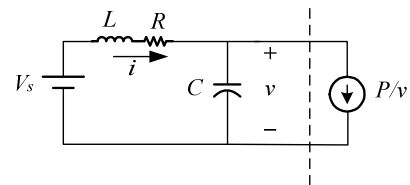


그림 2. 간략화된 DC 전력원과 정전력 부하의 회로 구성

전력 변환 장치의 회로 구성이다. 인버터는 PWM을 통하여 DC 전압을 AC 전압으로 변환하는 장치이지만, 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 캐패시터스 (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.

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

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

아래의 식(4)로 된다.

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

이 시스템의 특성방정식은 아래 식 (5)과 같이 된다.

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

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

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

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}^ω 는 임의의 속도, ω ,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}^ω)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.

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

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

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

위 식으로부터 알 수 있듯이, 위 부등식을 만족하는 궤환 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}^ω 는 여러 방향의 전압 벡터가 고려될 수 있으나, 인버터의 출력 전압이 제한되어 있으므로 전류 벡터가 위치하는 방향, 즉 동상으로 \mathbf{V}_{vc}^ω 의 방향을 선정하는 것이 가장 작은 전압을 사용한다는 점에서 가장 유리하다. 부하 전류를 제어하기 위한 전류 제어기의 출력 전압을 \mathbf{V}_{cc}^ω 라고 할 때, 최종적으로 부하에 인가되는 전압은 \mathbf{V}_{cc}^ω 와 \mathbf{V}_{vc}^ω 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.

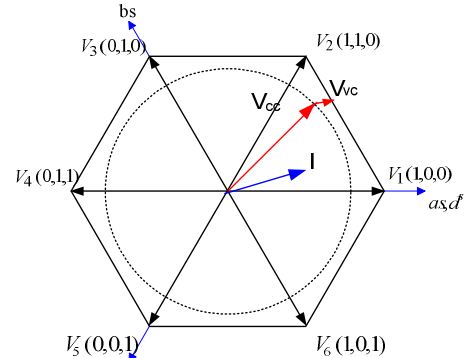


그림 3. 인버터의 전압 제한을 고려한 전류 제어기의 출력 전압 제한

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 μ F이다. 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz, 샘플링은 20kHz, 전동기의 속도는

1700rpm으로 고정하였다.

3.2 모의 실험 결과

그림 4는 조건식 (6)을 만족시키는 3000 μ F의 캐피시터를 사용하였을 경우, 계단 토크 지령에 따른 직류단 전압의 파형(순시 전압 및 샘플링된 전압)과 동기좌표계 q축 전류의 파형이다. 과도상태에서 직류단 전압의 변동이 있긴 하지만 안정한 것을 알 수 있다.

그림 5는 조건식 (6)을 만족시키지 못하는 작은 캐피시터 값(1000 μ F)을 사용하였을 경우 계단 토크 지령에 따른 직류단 전압의 파형과 동기좌표계 q축 전류의 파형이다. 인버터의 출력 전력이 커짐에 따라 직류단 전압이 불안정해져 발산하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 40 μ F의 매우 작은 캐피시터를 사용하고 식(10)의 이득 k를 80으로 한 경우의 파형이다. 직류단을 안정하게 하는 캐피시터의 크기보다 매우 작은 캐피시터를 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] |

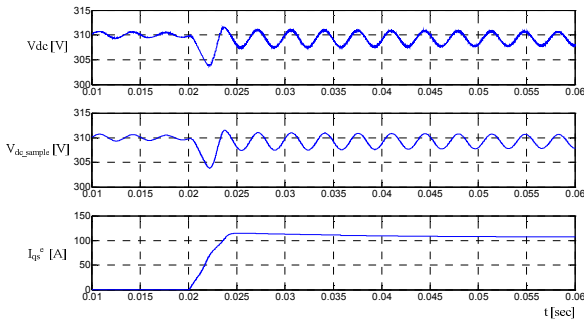


그림 4. 3000 μ F의 직류단 캐피시터를 사용하였을 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

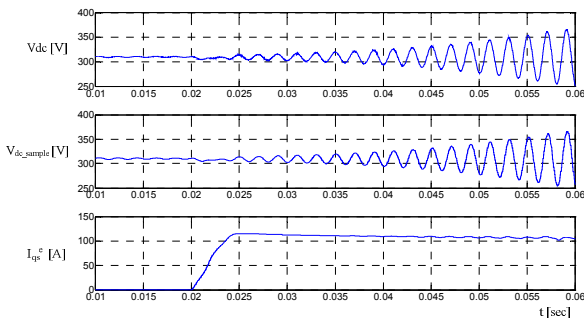


그림 5. 1000 μ F의 직류단 캐피시터를 사용하였을 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

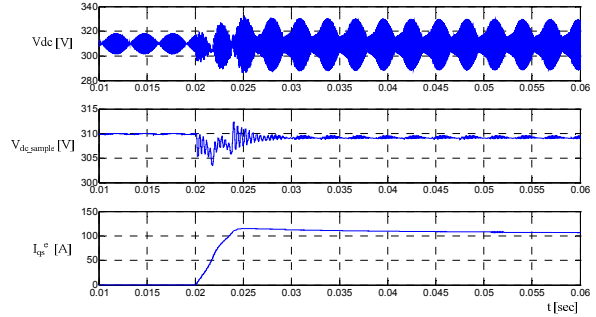


그림 6. 40 μ F의 직류단 캐피시터를 사용하고 제안된 제어 방법을 적용한 경우의 직류단 전압 및 동기좌표계 q축 전류

4. 결론

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