

유도 전동기 구동 시스템을 위한 PWM전압원 인버터 DC-링크 필터 설계

김광섭*, 서범석, 현동석
한양대학교 전기공학과

Minimum DC-Link Filter in Three-phase PWM Voltage Source Inverter for Induction Motor Drive

Kwang-Seob Kim*, Bum-Seok Suh and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - Given the constraint of the AC input power factor and the DC-link voltage and current ripple in voltage source inverter, minimizing the size and cost of the DC-link filter components is very important. This paper presents a procedure for the selection of DC-link filter element values in a three-phase PWM voltage source inverter-fed induction motor drive system, which can not only satisfy the requirements for the system performance but also minimize the filter size.

1. 서론

전력용 반도체 소자의 용량과 스위칭속도의 비약적인 진보에 의해 중소용량뿐만 아니라 대용량 PWM전압원 인버터를 사용한 유도전동기 구동시스템의 수요가 날로 급증하고 있으며 성능향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 이러한 PWM인버터 시스템의 설계시 DC-링크 필터값의 선정은 매우 중요한 요소라 할 수 있는데 크게 다음과 같은 두가지 측면을 고려하여 설계를 해야만 한다. 첫째는 인버터 입력전압의 맥동과 공진 주파수 등의 시스템 특성에 DC-링크 필터가 미치는 영향에 대한 것이고, 두번째는 필터 크기에 의한 AC 입력측 역률의 변화에 대한 것이다. 그러나 기존의 연구 결과에서는 위의 두 가지 사항을 동시에 고려한 필터 설계 기준과 구체적인 설계방법이 제시되지 않고 있다[1-3]. 따라서 본 논문에서는 유도전동기 구동시스템을 위한 3상 PWM전압원 인버터의 DC-링크 필터 설계시 고려해야할 사항의 제정립과 구체적인 설계절차를 제안한다.

2. 제안하고 있는 DC-링크 필터 설계방법

2-1. 인덕턴스 용량산정

역률을 고려하고 필터 L의 전류가 연속모드가 되는 L값을 계산한다. 3상 다이오우드 정류기의 경우 L값은 DPF (Displacement Power Factor)에는 거의 영향을 주지 않는다. 최악의 경우가 0.98정도이다[1].

따라서 $PF = \frac{I_{S1}}{I_S} \times DPF$ 이므로 정류기의 입력전류의 고조파

성분을 고려하면 역률을 알 수 있다. 커패시터의 용량이 아주 커서 전압맥동을 무시할 수 있다고 가정하고

$L_O = L_{O-N} \times \frac{V_{REF}}{I_{REF} \cdot f_{REF}}$ 를 이용하면 L_{O-N} 이 0.1일때 역

률이 약 0.96이 되므로 L이 무한대값을 가질 경우와 근사화가 가능하다[3]. L_O 값은 출력과 전압, 주파수가 주어질 때 위의 식을 이용해서 구할 수 있다.

연속모드일때 전류맥동이 가장 크고, 역률도 L값이 증가함에 따라 증가한다. 따라서 유도전동기의 운전조건에서 최대의 역률이 나타날 수 있는 L값을 선정하고 그때의 전류맥동에 의한 전하량을 계산한다. 연속모드가 되는 L_{min} 값은

$$L_{min} = \frac{0.012786737V_{LL}}{\alpha I_{load}} \quad \text{---- (1)}$$

을 이용해서 구할 수 있다.

실제 커패시터는 유한한 값을 가지기 때문에 앞에서 맥동이 전혀 없다는 가정을 수정해야만 한다. 정상상태에서 전하량의 변화에 대한 식을 살펴볼 때 거의 정현파에 가깝게 나타나기 때문에 ΔQ 는 cosine의 파형이 된다. 그래서

$$V_C = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} - \Delta V \cos 6\theta \text{ 로 모델링 할 수 있다.}$$

$$\sqrt{2}V_{LL} \cos \theta_e = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} - \Delta V \cos 6\theta_e$$

$$\int_{\theta_e}^{\theta} di = \frac{1}{\alpha L} \int_{\theta_e}^{\theta} (\sqrt{2}V_{LL} \cos \theta + \Delta V \cos 6\theta - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}) d\theta$$

$$i(\theta) = \frac{1}{\alpha L} (\sqrt{2}V_{LL} \sin \theta + \frac{\Delta V}{6} \sin 6\theta - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \theta + const.) \text{---- (2)}$$

따라서 인덕턴스를 통해 흐르는 전류맥동은 다음과 같다.

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} = i(\theta_e) - i(-\theta_e)$$

$$= \frac{2}{\alpha L} [\sqrt{2}V_{LL} \sin \theta_e + \frac{\Delta V}{6} \sin 6\theta_e - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \theta_e]$$

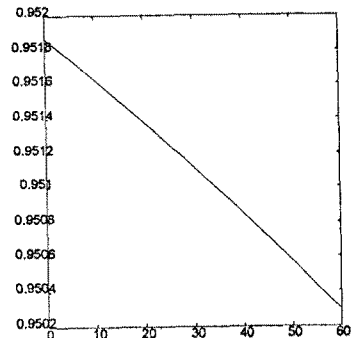


그림 1. 전압맥동에 따른 AC 입력 역률

이때 커패시터 전압의 맥동에 따른 AC 입력 역률은 그림 1에서와 같이 맥동이 커지면 역률은 감소함을 알 수 있다. (선간전압3300[V], 주파수 60Hz, 인덕턴스1m, 부하전류1000[A])

2-2. 커패시터 용량산정

C가 아주 커서 V_C 의 맥동을 무시할 수 있고 연속모드이면 $V_C = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$ 의 값을 가진다고 할 수 있으며 인덕턴스L의 전류맥동, $i_{L,ripple}$ 에 의한 ΔQ 값을 계산하면 다음과 같다.

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad \sqrt{2} V_{LL} \cos \theta_e = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$$

$$i(\theta) = \frac{V_{LL}}{\omega L} (\sqrt{2} \sin \theta - \alpha \theta + 0.0127867)$$

$$\Delta Q = \int_{\alpha}^{\pi} (i(t) - I_{load}) dt = \frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\pi} (i(t) - I_{load}) d\theta$$

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}}{\omega^2 L} \left[\sqrt{2} - \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{\alpha^2 \pi^2}{72}} \right] \left(\sqrt{2} \geq \alpha \geq \frac{V_C}{V_{LL}} \geq \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) \quad (3)$$

식(2)에서 커패시터가 유한한 값을 가질때 전압맥동을 고려한 전하량은 다음과 같다.

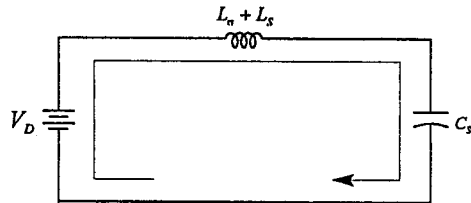
$$(const. = \sqrt{2} V_{LL} \sin \theta_e + \frac{\Delta V}{6} \sin 6 \theta_e - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \theta_e)$$

$$I_{load} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i(\theta) d\theta = \frac{const.}{\omega L}$$

$$\Delta Q = \frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\pi} (i(\theta) - I_{load}) d\theta$$

$$= \frac{1}{\omega^2 L} \left[\left(\sqrt{2} - \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{\sqrt{2}\pi}{24} V_{LL} + \frac{\Delta V}{18}} \right) \right] \quad \dots (4)$$

필터 전류맥동은 다시 두가지 성분으로 나누어질 수 있다. 첫째는 Free wheeling mode에서 motoring mode로 전환할때 스너버 커패시터 충전 전류성분에 의한 전하량이다.



(a)

C_S : snubber capacitance L_σ : leakage inductance

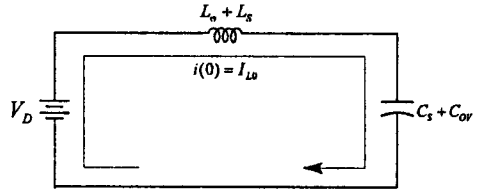
L_S : snubber inductance

위의 회로는 부하전류가 환류하고 있다가 스위칭소자로 전류(commutation)할때의 등가회로이다. 인덕턴스 초기전류와 스너버 커패시턴스 초기전압은 0이다. 그때 충전전류에 의한 전하량은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$i = \sqrt{d} \sin \alpha \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\Delta Q_{CS} = 2 \int_0^{\pi/4} i(t) dt = \int_0^{\pi/4} \frac{\pi \sqrt{LC}}{2} (V_d \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \alpha x) dt$$

$$= 2 V_d C_S$$



(b)

C_S : snubber capacitance L_σ : leakage inductance

L_S : snubber inductance C_{OV} : overvoltage capacitance

이 그림은 (a)에서 최대충전 전류를 초기값으로 가지고 과전압이 발생할때의 등가회로이다.

$$i = i_c = (C_S + C_{OV}) \frac{dV_{OV}}{dt}$$

$$\Delta Q_{OV} = 2 \int i_c dt = 2(C_S + C_{OV}) \int \frac{dV_{OV}}{dt} dt = 2(C_S + C_{OV}) \Delta V_{OV}$$

$$\Delta Q_{inv} = \Delta Q_{CS} + \Delta Q_{OV}$$

둘째는 인버터 출력전압의 고조파성분에 의한 전류맥동성분이 있다. 인버터 시스템내에서는 에너지 축적소자가 없고 손실도 없다고 가정할 때 인버터 출력전압의 고조파 성분에 의한 인버터 입력전류맥동과 전하량을 에너지보존의 법칙을 이용하여 구한다. 기본파 출력전류성분에 의한 DC-링크전류는 직류값을 가지므로[4] 이 성분을 제외한 나머지 고조파성분에 의한 전류맥동은 그림 2의 고조파 등가회로를 이용해서 구할 수 있다 [5].

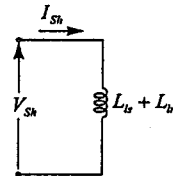


그림 2. 고조파 등가 회로

$$V_{D'k}^* = V_{An} i_{An} + V_{Bn} i_{Bn} + V_{Cn} i_{Cn}$$

$$(V_{Kn}: \text{line-to-neutral voltage, } k = A, B, C)$$

$$V_{An} = (V_{A1} + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{Ah}), V_{Bn} = (V_{B1} + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{Bh}), V_{Cn} = (V_{C1} + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{Ch})$$

$$V_{Kn} = \sqrt{2} |V_{Kn}| \sin(\alpha x) \quad (K = A, B, C)$$

$$i_{Kn} = \sqrt{2} |i_{Kn}| \sin(\alpha x - \psi) \quad (K = A, B, C)$$

$$i_{ripple} = \frac{V_{An} i_{An} + V_{Bn} i_{Bn} + V_{Cn} i_{Cn} - (V_{A1} i_{A1} + V_{B1} i_{B1} + V_{C1} i_{C1})}{V_D}$$

$$Q_{ripple} = \int i_{ripple} dt$$

위에서 구한 세가지의 전하량을 모두 더한 전하량과 커패시터 전압맥동이 주어지면 필터용량을 계산할 수 있다.

$$\Delta Q_{eq} = \Delta Q + \Delta Q_{inv} + \Delta Q_{ripple} = C \Delta V$$

그림 3, 4는 위의 식을 이용하여 전류맥동과 전하량을 계산한 예이다. 180도통의 경우에 DC전압이 2000[V], 출력주파수 60HZ, 부하전류 200[A], 등가회로에서 누설 인덕턴스 1m, 부하역률 0.966 그리고 six-step switching인 경우를 고려하였다.

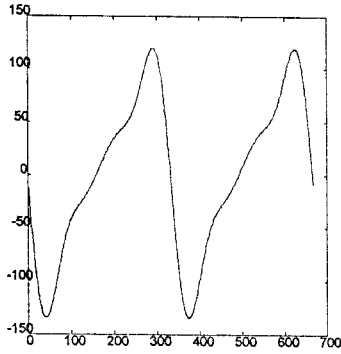


그림 3. 고조파 성분에 의한 전류맥동

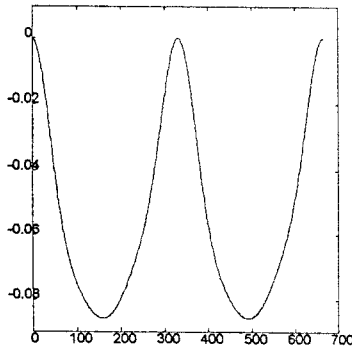


그림 4. 전류 맥동에 의한 전하량

2-3. 공진주파수를 고려한 필터용량

위에서 구한 L과 C값에 의한 공진주파수가 인버터 입력전류의 최저주파수보다 낮아 필터에서 연속적인 공진이 일어나지 않도록 해야한다[2].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < 2Nf_I$$

N: The number of pulses per half-cycle at the line-to-line voltage of the inverter output

2-4. 제동영향을 고려한 필터용량

인버터 출력전류의 변화(기동시나 부하변동에 따른 출력변화)에 따른 DC-링크 커패시터 전압맥동을 고려해야 한다. 이러한 인버터 입력측의 전압맥동들은 출력전압에 그대로 나타나고 또 각단의 소자에 직접적인 스트레스를 줄 수 있기 때문에 적절한 고려를 해야 한다.

3. DC-링크필터 설계를 위한 순서도

다음의 순서도는 전체적인 필터 설계순서를 계략적으로 보여주고 있다. 공진주파수를 고려할때 앞에서 구한 인덕터와 커패시터값의 비를 일정하게 하고 각각의 값을 같은 비로 증가시킨다. 그 다음에 두 값의 곱을 일정하게 함으로써 공진주파수보다 작은 값을 가지도록 하면서 부하변동에 따른 영향을 고려한다. 이때는 앞에서 부하역률과 전류맥동을 고려한 인덕터값을 최소값으로 보고 인덕터의 값을 감소시키면서 동시에 커패시터값을 증가시켜 공진주파수의 조건을 만족시키도록 한다.

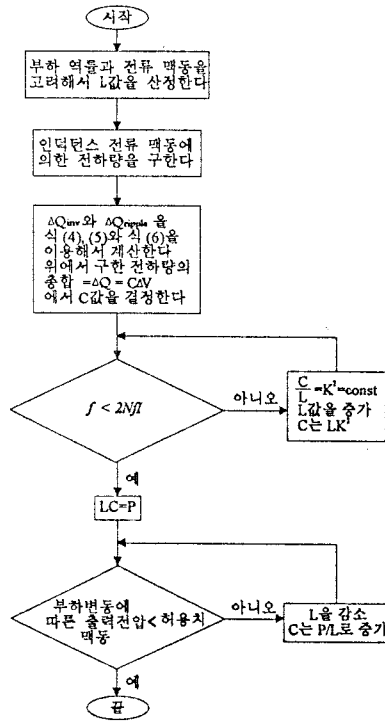


그림 5. 필터설계를 위한 순서도

4. 결론

유도전동기 구동용의 전압원 인버터 시스템에서 DC-링크 필터는 적절히 설계되지 않는다면 시스템의 특성에 많은 영향을 줄 수 있다. 지금까지 전압원 인버터를 위한 DC-링크 필터 설계시 고려해야 할 사항과 설계기준에 대해 여러가지 방법이 제시되어왔다. 그러나 3상 PWM 전압원 인버터 시스템에서의 필터설계를 위해 전반적인 기준사항을 고려한 구체적인 설계과정이나 방법의 제시가 부족하였다.

본 논문에서는 AC입력 역률, DC-링크에서의 전압과 전류 맥동, 제동(damping)영향, 그리고 공진주파수 등을 동시에 고려한 필터 설계 절차에 대해 자세히 기술하였다. 본 논문에서 제안하고 있는 방법은 3상 PWM 전압원 인버터의 필터 설계 방법으로 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- [1] SHASHZ B. DEWAN, "Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply", *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. IA-17, no. 3, pp. 282-288, May/June, 1981.
- [2] K. S. RAJASHZKARA et al., "DC-link Filter Design Considerations in Threc-Phase Voltage Source Inverter-Fed Induction Motor Drive System.", *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. IA-23, no. 4, pp. 673-680, July/August, 1987.
- [3] Arthur W. Kelly et al., "Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum power factor.", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 332-341, April, 1992.
- [4] Mohan et al., "Power Electronics CONVERTERS, APPLICATIONS and DESIGN", *JOHN WILEY & SONS, Inc.*, 1989.
- [5] B. K. Bose, "POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES", *PRENTICE-HALL*, 1986.