

3상 인버터 시스템에서 주파수 특성을 고려한 필름 콘덴서의 DC-link 적용 방법에 관한 연구

박현수

경일대학교 전기공학부

The study on DC-link Film Capacitor in 3 Phase Inverter System for the Consideration of Frequency Response

Hyun-Soo Park

Division of Electrical Engineering, Kyungil University

요약 대용량 3상 시스템 에어컨은 최근 들어 소비 전력 저감을 위해 인버터 회로를 포함하고 있다. 인버터 회로는 교류를 다이오드를 통해 정류하고 DC-link 전원부 콘덴서에 의해 평활된 직류를 사용한다. 이 때 평활에 사용되는 DC-link 전원부 콘덴서는 전압 리플, 전류 리플 조건을 만족하기 위해 전해 콘덴서가 일반적으로 사용된다. 콘덴서의 용량을 줄이게 되면 회로부의 크기 및 무게, 비용을 줄일 수 있게 된다. 본 논문에서는 최소점 추정 PLL(Phase Locked Loop) 위상 제어와 평균 전압 d축 전류제어 기법을 조합하여 입력 리플 전류를 약 90% 저감하는 알고리즘을 제안한다. 입력 리플 전류의 감소로 인해 DC-link 콘덴서의 전류 리플도 감소하므로 콘덴서의 용량을 줄일 수 있지만 전해 콘덴서의 경우 등가 직렬 저항(ESR : Equivalent Series Resistance)이 크기 때문에 발열로 인한 수명의 한계를 가진다. 본 논문에서는 전해 콘덴서 대신 DC-link 단에 전류 리플을 고려한 필름 콘덴서를 선정하는 방법을 제안한다. 필름 콘덴서의 정전 용량 선정, 내압 선정, RMS(Root Mean Square) 전류 용량, RMS 전류 주파수 해석을 고려해 콘덴서의 용량을 선정할 경우 1680 μ F의 전해 콘덴서를 20 μ F로 용량을 낮추어 설계함으로써 전원부 콘덴서의 크기 및 무게, 비용을 줄였으며 전동기 구동을 통해 동작을 확인하였다.

Abstract A large-capacity three-phase system air conditioner recently includes an inverter circuit to reduce power consumption. The inverter circuit uses a DC voltage that comes from DC-link power capacitor with the function of rectifying, which means AC voltage to DC voltage using a diode. An electrolytic capacitor is generally used to satisfy the voltage ripple and current ripple conditions of a DC-link power capacitor used for rectifying. Reducing the capacitance of the capacitor decreases the size, weight, and cost of the circuit. This paper proposes an algorithm to reduce the input ripple current by combining the minimum point estimation phase locked loop (PLL) phase control and the average voltage d axis current control technique. When this algorithm was used, the input ripple current decreased by almost 90%. The current ripple of the DC-link capacitor decreased due to the decrease in input ripple current. The capacitor capacity can be reduced but the electrolytic capacitor has a heat generation problem and life-time limitations because of its large equivalent series resistance (ESR). This paper proposes a method to select a film capacitor considering the current ripple at DC-link stage instead of an electrolytic capacitor. The capacitance was selected considering the voltage limitation, RMS (Root Mean Square) current capacity, and RMS current frequency analysis. A 1680 μ F electrolytic capacitor can be reduced to a 20 μ F film capacitor, which has the benefit of size, weight and cost. These results were verified by motor operation.

Keywords : DC-link, Film Capacitor, Frequency Response, Inverter, RMS current

*Corresponding Author : Hyun-Soo Park(Kyungil Univ.)

Tel: +82-53-600-5525 email: greenbee@kiu.kr

Received January 24, 2018

Revised (1st March 21, 2018, 2nd March 26, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

가전 기기의 보급 확산으로 인해 가정 내 전력 소모는 증가함에 따라 가전 기기의 에너지 효율 규제는 점차 강화되는 추세이다. 효율 규제를 만족하기 위해 최근 출시되는 에어컨, 냉장고, 세탁기는 인버터 회로가 포함된 전동기 시스템을 탑재하는 비율이 높아지고 있다.[1]인버터 회로가 포함된 전동기 시스템은 유도 전동기에 비해 제어가 복잡하지만 전동기의 속도를 가변할 수 있기 때문에 On/Off 제어를 하는 유도 전동기에 비해 기동 시 소비되는 전력을 줄일 수 있어 효율 면에서 유리하다.

인버터 회로가 포함된 전동기 시스템은 일반적으로 단상 또는 3상의 교류 전압을 다이오드 정류기를 통해 정류한 DC-link 전압을 전해 콘덴서를 통과시켜 직류 전압으로 변환하는 회로로 구성되어 있다.

DC-link 전압을 평활 하는 용도로는 용량이 큰 전원부 전해 콘덴서가 많이 사용되며 부하에 사용되는 전류를 공급하고 부하의 전압 리플을 줄여 직류에 가깝게 만드는 역할을 한다. 알루미늄 전해 콘덴서는 1 μ F에서 5000 μ F의 용량을 가지며 사용온도 범위는 섭씨 -40에서 85도이다.[2]

빌딩에서 사용되는 시스템 에어컨의 경우 5KW 이상의 소비전력을 가지며 3상 전원을 사용하고 많은 전류를 소모하므로 DC-link 전원부 전해 콘덴서의 용량도 1000 μ F에서 2000 μ F 사이로 구성되는데 인버터 회로물의 20% 이상의 면적을 차지하며 방열판 및 전력 반도체와 더불어 가장 무겁고 재료비 비중을 큰 부품 중의 하나이다. 따라서 인버터 회로의 면적 및 무게를 줄이고 재료비의 비용을 개선하기 위해 제안된 방법으로 DC-link 전원부 콘덴서 용량을 줄이는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.

DC-link 콘덴서 용량이 줄어들게 되면 DC-link 전압 리플이 증가하며 입력 전류 리플 역시 증가하게 된다. 그림 1의 (a)는 큰 용량의 콘덴서가 사용되었을 경우 DC-link 전압을 나타낸 것이고 그림 1의 (b)는 적은 용량의 콘덴서가 사용되었을 경우 DC-link 전압을 나타낸 것이다. 콘덴서 용량이 줄어들수록 전압 리플이 커지는 것을 볼 수 있다.

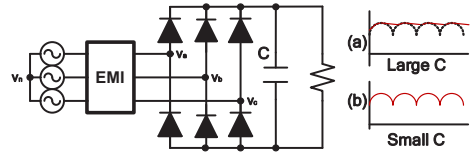


Fig. 1. Voltage waveform of DC-link (a) Large capacitor (b) Small capacitor

DC-link 콘덴서 용량이 줄어들게 되면 입력 전류 리플이 증가함과 동시에 DC-link 콘덴서의 리플 전류도 늘어나게 된다. 전해 콘덴서의 경우 직렬 등가 저항(ESR)의 값이 크기 때문에 콘덴서의 용량이 줄어들게 되면 허용되는 리플 전류의 값 역시 줄어들게 된다. 표 1은 동일 전압 스펙을 가진 DC-link 전해 콘덴서의 전류 리플 스펙이다.[3]

전해 콘덴서의 전류 리플의 양이 작아 용량을 줄일 경우 사용할 수 없다. 이 경우 콘덴서의 전류 리플에 강한 플라스틱 필름 콘덴서를 사용할 수 있다. 플라스틱 필름 콘덴서는 소형 경량의 특징을 가지며 신뢰성이 좋고 전기적 특성이 좋으며 장수명 및 전류 리플에 대응이 가능하다.[4]

Table 1. Current ripple specification of 600V electrolytic capacitor

Capacitance	Rated ripple current (Arms/85 $^{\circ}$ C,120Hz)
180 μ F	1.1A
1800 μ F	6.5A

하지만 콘덴서의 전류 리플을 만족한다고 하더라도 DC-link 전압 리플에 대응해야 하며 입력 전류 리플이 고조파 규제를 만족해야 하기 때문에 인버터 제어 알고리즘을 통해 전압 리플 및 고조파 규제를 만족하는 입력 전류 리플을 줄이는 알고리즘이 제안되었다.[5]

본 논문에서는 인버터 제어 알고리즘의 q축 전류 및 위상 제어를 통해 입력 전류 리플을 줄이는 알고리즘을 제안해 고조파 규제를 만족시키며 DC-link 단에 정전 용량, 한계 전압, 주파수 특성의 3단계 선정 알고리즘을 사용해 용량이 크지 않으면서도 시스템 안정도를 만족시킬 수 있는 필름 콘덴서 선정 방법에 대해 제안하며 제안된 방법을 통해 직/병렬 혼합 형태로 최적의 콘덴서를 선정하고 설계하는 방법을 실 예를 들어 설명할 것이다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

본 논문에 사용된 인버터 회로가 포함된 압축기 시스템의 구성은 그림 2와 같다. 빌딩 등에 사용되는 시스템 에어컨의 인버터 압축기 시스템으로 10KW의 용량을 가지며 3상 전원으로 구성된다.

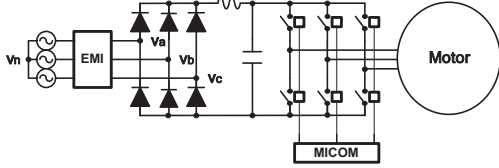


Fig. 2. Block diagram of proposed inverter system

일반적으로 3상의 경우 다이오드 정류기를 통한 전파 정류 출력 파형은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} v_{an} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t) \\ v_{bn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ v_{ab} &= \sqrt{6} V \cos(\omega t - \frac{\pi}{3}) = \sqrt{6} V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ v_{ab\text{평균}} &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} v_{ab} d\omega t = \frac{3\sqrt{6} V}{\pi} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에 의하면 선간 전압의 최대값은 단상 실효 전압의 $\sqrt{6} = 2.45$ 배의 크기를 가지며 선간 전압의 최소값은 단상 실효 전압의 $\sqrt{6} \cdot \sqrt{3}/2 = 2.12$ 배의 크기를 가지며 선간 전압의 평균값은 2.34 배의 크기를 가지게 된다. 3상 전파 정류의 경우 2.12 배의 전압이 기본적으로 확보되기 때문에 리플 성분을 보상하는 제어를 인

버터 제어 알고리즘을 통해 구현한다.

인버터 제어 알고리즘은 그림 3에 나타내었으며 크게 세가지 부분으로 구성되어 있다. d축 전류 생성부는 인버터 구동을 위해 기본적으로 필요한 부분이며 새롭게 추가된 부분은 q축 전류 생성부 및 위상 추정부이다. q축 전류는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$i_{qs}^{*} = 2 \times i_{qs_SC}^{*} \cdot \sin^2 \theta_{grid} \quad (2)$$

$i_{qs_SC}^{*}$ 는 Speed regulator의 출력이며 전동기 구동에 영향을 거의 미치지 않는 q축 전류를 사용해 입력 리플 전류를 보상하는 방법을 사용하였다. 식 (2)를 보면 계통의 위상각을 연산하는 부분이 필요하다. 위상각을 얻는 방법은 DC-link 전압을 측정한 다음 최소점을 추출하고 이를 기준으로 PLL을 구동하면 PLL 출력에서 안정된 계통 주파수와 위상을 추출해 사용할 수 있다. 이를 최소점 추정 PLL 위상 제어라 명명하며 3상 전원에 대해 본 논문에서 새롭게 제안하는 방법이다. q축 전류 보상 및 최소점 추정 PLL 위상 제어를 사용할 경우 입력 전류 리플의 RMS 개선 정도를 표 2에 나타내었다. 입력 전류 리플이 50% 이상 개선됨을 알 수 있다.

Table 2. Input current ripple improvement by proposed algorithm

Algorithm	Input ripple current (Arms)
old method	25A
proposed method	14A

제안하는 시스템의 DC-link 콘덴서의 정전 용량을 낮출 경우 538.8V~466.4V의 전압 리플을 가진다. 본 논문에서 사용된 시스템 스펙을 표 3에 나타내었다.

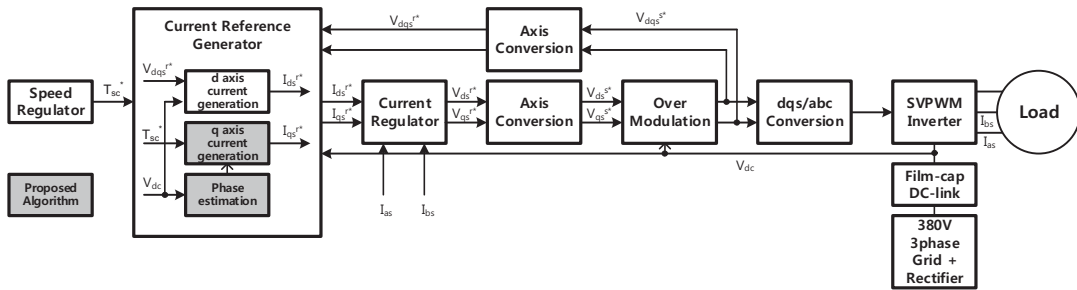


Fig. 3. Control block diagram of proposed inverter system

Table 3. System specification

Parameter	Value	[Unit]
Input Voltage	380	[Vac]
Input Frequency	60	[Hz]
Input Current (@ 380 Vac)	20	[A] [RMS]
Maximum DC link Voltage	538.8	[V]
Maximum Power	10.7	[kW]

2.2 필름 콘덴서 선정 방법

본 논문에서는 필름 콘덴서를 선정함에 있어 네가지 기준으로 설계하는 방법을 제안한다. 첫 번째는 콘덴서의 정전 용량을 선정하는 방법이고 두 번째는 콘덴서의 내압을 결정하는 방법이며 세 번째는 RMS 전류 마진을 고려한 전류 용량 선정이고 네 번째는 주파수 특성을 고려한 주파수별 전류 용량 선정이다.

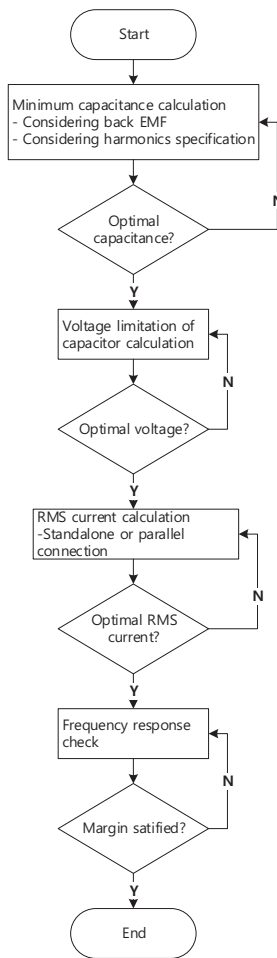


Fig. 4. Proposed film capacitor selection flowchart

이러한 알고리즘을 그림 4에 흐름도 형태로 도시하였다. 첫 번째 선정 절차는 정전 용량인데 정전 용량은 입력 전류의 고조파 조건을 만족해야 한다. q축 전류 보상을 통해 입력 전류 리플이 줄어들어 고조파 조건을 만족하는 정전 용량이 줄어들게 되며 전원단 부터 전동기까지 구동 시뮬레이션을 통해 최소 정전 용량을 선정하였다. 제안된 시스템의 경우 5-40uF까지 정전 용량을 바꾸어가며 시뮬레이션을 진행하였다. 기존 시스템의 경우 1680uF의 정전용량을 사용하였다.

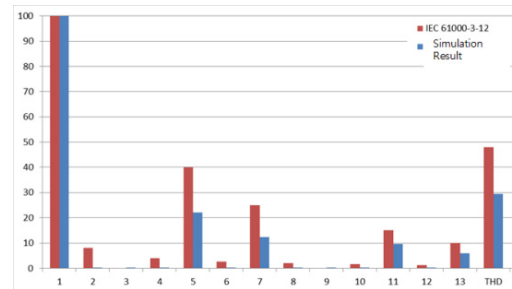


Fig. 5. Harmonics simulation

red : IEC 61000-3-12 specification

blue : film capacitor(20uF) current harmonics result

그림 5는 이론상 최대 전력인 10.7KW를 인가한 후, 정전 용량을 5uF에서부터 단계적으로 증가시키면서 고조파 성분이 규격을 만족하는가를 살펴본 결과인데 정전 용량이 증가하면서 20uF가 되면 고조파 규격인 IEC 61000-3-12를 만족하게 되는 결과를 보인 것이다. 이보다 작은 정전 용량의 경우는 고조파 규격의 마진이 부족하여 최소 20uF 이상의 정전 용량이 필요하게 된다.

두 번째 선정 절차는 필름 콘덴서의 한계 전압을 결정해야 한다. DC-link의 전압이 538.8V가 최대 전압이고 전압 단에는 약 70%의 마진을 두고 설계를 진행했기 때문에 $538.8/0.7=765V$ 이상의 내압을 가지는 필름 콘덴서를 선정해야 한다. 양산되는 필름 콘덴서 중에 내압은 450V, 700V, 900V, 1100V의 네 가지 종류가 있어 900V 또는 1100V의 내압을 가지는 콘덴서가 사용이 가능하다. 또 하나 고려해야 될 부분은 계통 전압 변동이 심한 국가도 있으며 이 경우 계통 전압 변동율을 20%까지 대응한다. 이를 고려하면 $765/0.8=962V$ 의 내압이 필요하게 된다. 따라서 전압 마진 및 입력 전압의 변동율을 고려해 1100V의 내압을 가지는 필름 콘덴서를 선정하였다.

세 번째 선정 절차는 콘덴서로 유입되는 RMS 전류의 양에 따라 콘덴서를 선정해야 한다. 시스템 구동 시 최대 전력 조건을 산정한 다음 콘덴서에 유입되는 RMS 전류를 산정하여 전류 조건을 상회하는 콘덴서를 선정해야 한다.

최대 전력 조건의 시뮬레이션에서 얻어진 RMS 전류 값을 표 4에 나타내었고 필름 콘덴서의 RMS 전류 스펙을 표 5에 나타내었다.

Table 4. RMS current simulation result

	20uF	40uF
Ripple RMS current	14.0A	11.4A
20% margin RMS current	17.5A	14.25A

Table 5. RMS current specification of film capacitor

10uF	20uF	30uF	40uF
10.8A	12.5A	17.5A	22.5A

RMS 전류의 경우는 20%의 마진을 두어 설계한다. 20uF 콘덴서를 사용할 경우 $14/0.8=17.5A$ 의 전류 스펙을 가져야 하고 40uF 콘덴서를 사용할 경우 $11.4/0.8=14.25A$ 의 전류 스펙을 가져야 하며 이는 표 4의 하단에 명기하였다. 표 5에 의하면 20uF의 필름 콘덴서의 RMS 전류 스펙은 12.5A이기 때문에 17.5A의 RMS 전류가 유입되는 경우에는 단일로 사용할 수 없다. 만약 10uF 필름 콘덴서를 병렬로 2개 사용할 경우 $10.8A \times 2 = 21.6A$ 의 RMS 전류 허용치를 가지게 되고 20uF의 용량은 10uF의 필름 콘덴서 2개를 병렬로 연결해 사용할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 40uF의 용량의 경우는 20uF의 필름 콘덴서 2개를 가지고 구현하거나 40uF의 단일 필름 콘덴서를 사용해서 구현할 수 있으며 모두 RMS 전류 스펙을 만족하게 된다. 다만 정전 용량이 커지기 때문에 비용적인 면을 고려하면 10uF 2개를 사용해 구현하는 것이 최적의 설계 조건이다.

RMS 전류 용량에 따라 직/병렬로 소자들을 구성하는 방법에 대해 표 6에 정리했다. 비용과 면적을 고려할 경우 가능한 적은 수의 소자와 최소 용량을 사용하는 것이 제안된 방법이므로 10uF 2개를 병렬 연결하여 사용하는 방법을 채택하였다.

Table 6. RMS current margin in parallel or standalone connection

Capacitance (Sim. RMS Current)	Connection (S:Standalone P:Parallel)	Capacitor current spec.	Cost
20uF (17.5A)	20uF 1ea S	12.5A X	O
	10uF 2ea P	21.16A O	△
40uF (14.25A)	40uF 1ea S	22.5A O	X
	20uF 2ea P	25A O	X

최종적으로 고려할 부분은 전류의 주파수 특성이다. 필름 콘덴서에 들어가는 전류의 주파수 성분에 따라 콘덴서 내부의 저항과 연동해 열로 발산되기 때문에 주파수 특성에 따른 전류치를 모두 고려해야 된다. 이를 위해 20uF일 경우의 최대 전력 조건에서 콘덴서로 유입되는 RMS 전류를 FFT 분석하여 각 주파수별 성분을 확인했으며 이를 그림 6에 나타내었다.

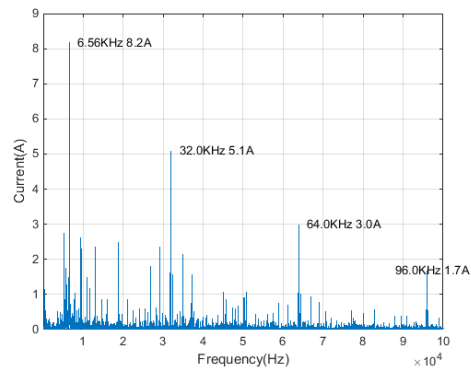


Fig. 6. Current ripple analysis in case of 20uF capacitor

필름 콘덴서의 전류의 주파수 특성은 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 나타낸 각 주파수별 전류가 모두 마진 안에 들어오는 것을 확인할 수 있으며 이를 표 7에 정리하였다. 모든 주파수에 대해 20% 이상의 마진이 있음을 확인할 수 있었다.

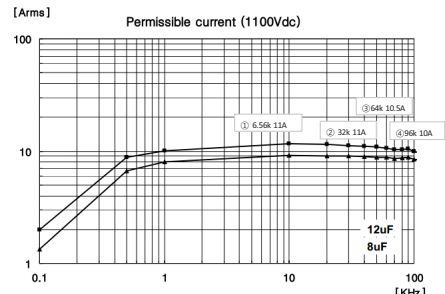


Fig. 7. Current ripple specification of film capacitor

본 논문에서 제안하는 제어 방법 및 설계 과정을 통해 최소 20uF 이상의 용량을 가지며 한계 전압은 1100V의 내압 특성을 가지며 RMS 전류를 이에 맞는 필름 콘덴서는 10uF를 2개 병렬로 연결해 마진을 확보하고 주파수 특성을 고려하는 방향으로 설계가 진행되어야 한다는 것을 알 수 있다.

Table 7. Frequency margin in case of 20uF capacitor

Frequency	specification	Simulation
6.56KHz	11A	8.2A
32KHz	11A	5.1A
64KHz	10.5A	3.0A
96KHz	10A	1.7A

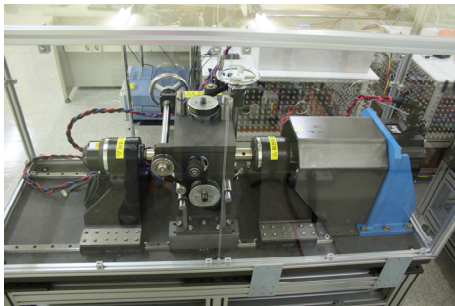


Fig. 8. Experimental Dynamo set

그림 8은 본 논문에서 제안하는 방법을 실험하기 위한 다이내모 세트이며 기존 1680uF 콘덴서를 20uF의 콘덴서로 바꾸고 7200rpm까지 구동을 문제없이 진행할 수 있었다. 그림 9는 7200rpm으로 구동 시 인버터 A상전류 및 DC-link 전압을 실측한 결과이다.

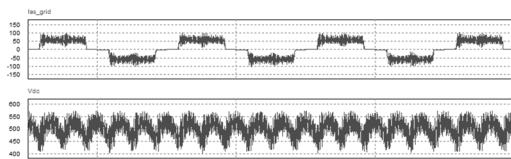


Fig. 9. Leg A current and DC-link voltage at 7200rpm experiment

3. 결론

필름 콘덴서는 콘덴서의 리플 전류가 큰 어플리케이션에 사용이 가능하고 가볍고 신뢰성이 높다는 장점을

가지고 있으나 전해 콘덴서에 비해 값이 비싸기 때문에 최소한의 용량으로 설계가 되어야 한다. 본 논문에서 제시하는 q축 전류 제어 알고리즘과 최소 정전 용량 산정 방식, 그리고 필름 콘덴서의 한계 전압 선정 방법, RMS 전류와 주파수에 따른 RMS 전류 분석을 통해 가장 적은 용량을 가지면서도 효율적으로 시스템을 동작 시킬 수 있는 필름 콘덴서를 선정할 수 있었다.

이와 같은 설계 방법은 3상뿐만 아니라 단상 인버터 설계에도 활용할 수 있으며 향후 에어컨, 냉장고, 세탁기 뿐만 아니라 전기 자동차와 같은 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Chosun Biz. news article, http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2016/01/18/2016011802879.html?rsMobile=false
- [2] Hyung-Ki Park, Chung-Seog Choi, "Examination of the Cause of Damage to Capacitors for Home Appliances and Analysis of the Heat Generation Mechanism", *Korea Safety Journal*, vol. 26 no. 6, pp. 13-20, 2011
- [3] Samyoung Film Cap. production specification, http://www.samyoung.co.kr/download/guide/part_number.pdf
- [4] M. Salcone, J. Bond, "Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications", *Proc. IEEE Int. Electric Mach. Drives Conf.*, pp. 1692-1699, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075431>
- [5] Hyun-Sam Jung, Seung-Jun Chee, Seung-Ki Sul, Young-Jae Park, Hyun-Soo Park, Woo-Kyu Kim, "Control of Three-Phase Inverter for AC Motor Drive With Small DC-Link Capacitor Fed by Single-Phase AC Source", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 50, no. 2, pp. 1074-1082, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2288238>

박 현 수(Hyun-Soo Park)

[정회원]



- 1995년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2017년 2월 : 삼성 전자 수석연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경일대학교 전기공학부 교수

<관심분야>

전기자동차, 인버터 제어