

대용량 고전압 부하의 무효전력 및 고조파 보상을 위한 낮은 DC 전압을 갖는 새로운 능동 파워 필터

정 구 호°, 조 규 형
한국 과학 기술원 전기 및 전자과

New active power filter with low DC voltage for compensation of reactive power and harmonics of high power/voltage load

Gu H. Jung° and Gyu H. Cho
Dept. of Electrical Engineering, KAIST

Abstract

This paper presents a new active power filter with low DC voltage for compensating reactive power and harmonics of three-phase high power/voltage harmonic producing load. It has a structure of converter connected in series with power factor correction capacitor. Appropriate size and number of filter capacitor are determined by an equation and applied to simulation of 10kvar 6-pulse SCR rectifier.

I. 서 론

3상 부하의 무효전력 및 고조파를 보상하기 위해, 현재 그림 1과 같이 연계 리액터와 전압형 인버터가 직렬로 연결된 병렬 방식의 능동 파워 필터가 널리 사용되고 있다. 이 방식은 간단한 구조 및 전류원으로서의 넓은 주파수 대역폭의 장점을 갖고 있어, 이에 관련된 많은 제어 방법이 제안되어 왔다[1]. 여기서, 시스템은 부하에 따라 용량성 혹은 유도성의 가변 임피던스로 동작하고, 전원 전압과 전류는 단위 역률의 동상이 된다. 그러나, 인버터의 DC 전압을 커패시터 동작시의 단자 전압 V_T 과 연계 리액터 양단 전압의 합 이상으로 설정하여야 하므로, 고내압의 스위칭 소자를 사용하는 고비용의 능동 필터

시스템이 된다. 덧붙여, 만일 대용량 고전압 부하의 경우는 IGBT 대신에 고비용의 GTO 소자를 사용해야 하므로 시스템의 단가 및 제작비가 상승하게 된다.

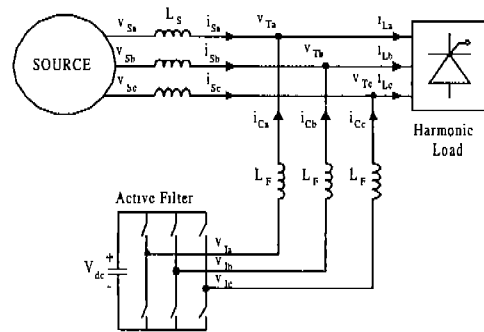


그림 1. 병렬 방식의 능동 파워 필터

그러하여, 본 논문은 이런 DC 커패시터 전압의 문제를 해결하기 위해, 현재 대용량의 산업 시설에서 저렴한 비용 때문에 주로 사용하는 역률 개선 커패시터와 병렬 능동 필터를 직렬로 결합한 새로운 능동 파워 필터를 제안한다. 이로 인해, 인버터 시스템은 전원 전압에 비해 상당히 낮은 DC전압을 갖게 되어 저 비용의 구조로 부하의 무효전력 및 고조파를 제거하는 것이 가능하게 된다. 또한, 본 논문은 부하용량에 대한 적절한 크기와 수의 커패시터를 선택한 후, 이를 10kvar

6펄스 사이리스터 정류기 부하에 적용한 모의실험을 통해 제안된 필터의 유용성을 확인한다.

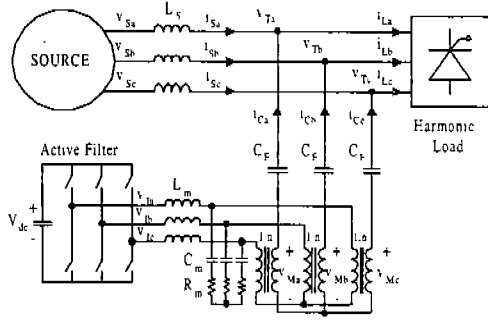


그림 2. 공진필터가 없는 간단한 구조의 능동필터

II. 제안된 능동필터

저자는 병렬 능동 필터의 높은 DC 전압 문제를 해결하기 위해, 최근에 역률 개선 커패시터와 병렬 능동 필터를 테브닝 이론에 의해 직렬 결합한 구조의 그림 2와 같은 부하의 고조파 제거용 능동 필터를 제안하였다 [3]. 이것은 대부분의 단자 전압이 필터 커패시터 C_F 에 걸리고, 기존의 하이브리드 필터와는 달리 5차, 7차, 고조파 공진 필터를 사용하지 않아 특성 계수 Q 를 조정할 필요가 없으며, 큰 부피의 인덕터가 없어 저비용의 시스템을 만들 수 있는 장점이 있다[2][3]. 물론 기존의 하이브리드 방식에 비해 컨버터의 크기가 커지고 무효전력을 보상하지 못하는 단점이 있지만, 국가별로 상이한 전원 주파수 및 부품의 노후화에 거의 영향을 받지 않고 간단히 제품 내에 능동필터를 구축할 수 있게 된다.

그러나, 그림 2의 능동필터는 부하의 고조파는 제거할 수 있으나 무효전력을 보상하지 못하는 단점을 갖고 있으며, 만일 무효전력까지 보상하기 위해서는 인버터는 가변 등가 커패시터로 동작하며 이때 인버터 출력 전압 V_M 은 다음 식과 같이 변동하게 된다.

$$V_M = V_T \left(1 - \frac{C_{eq}}{C_F}\right) = V_T (1 - k) \quad (1)$$

여기서 C_{eq} 는 3상 유도성 부하를 보상하기 위한 필터 커패시터와 인버터의 동작에 의한

능동필터의 상(phase)당 가변 용량을 의미한다. 이때, 최대값의 C_{eq} 는 C_{max} 로서 표현되며, 최대 용량성 무효전력 $Q_{C,max}$ 는 다음과 같다.

$$Q_{C,max} = 3 \cdot 2\pi f C_{max} \cdot V_T^2 \quad (2)$$

한편, 식 (1)에서 $C_F (= C_{unit})$ 가 C_{max} 의 0.5 크기로 가정하면, 그림 3(a)에서와 같이 인버터 출력전압 V_M 은 C_{eq} 가 0일 때는 $+V_T$ 가 되고, C_{eq} 가 C_{max} 일 때는 $-V_T$ 의 값이 된다. 이때, 양의 V_M 값은 V_T 와의 동상을, 음의 값은 역상을 의미한다. 결국 C_F 가 한 개의 커패시터로 구성된 이런 구조의 능동필터에서는 낮은 인버터 전압을 얻는 것은 불가능하다.

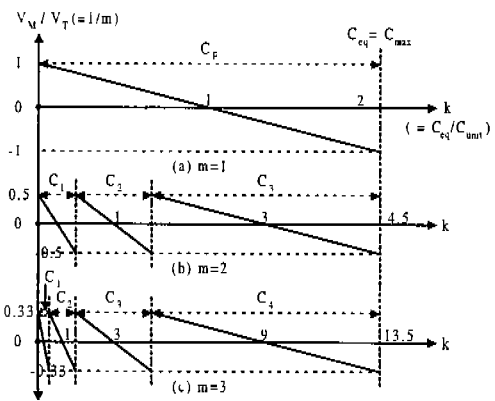


그림 3. m 의 변화에 따른 커패시터군의 동작영역 및 최대 인버터 출력전압의 제한.

그리하여, 본 논문에서는 이러한 높은 DC 전압의 문제점을 해결하기 위해, 한개의 필터 커패시터 대신에 그림 4와 같이 병렬 연결된 커패시터군을 이용하였다. 여기서 각각의 커패시터는 적절한 동작 영역에서 직렬 연결된 양방향 사이리스터 스위치에 의해 상전압의 최대, 최소의 피크점에서 턴온되며 영전압에서 턴오프된다. 물론 여러개의 커패시터를 사용하는 것은 소용량의 경우 고비용의 시스템이 될 수 있지만, 대용량의 경우는 현재 높은 상전압 때문에 사용하는 GTO소자 대신에 저가격의 IGBT소자로 대체할 수 있고, 더불어 부하의 고조파까지 보상할 수 있다는 점에서 큰 장점이 있다고 생각한다. 또한 본 방식은 저비용의 수동소자 방식과 빠른 과도응답의 인버터 방식을 결합한 구조로 되어 있다.

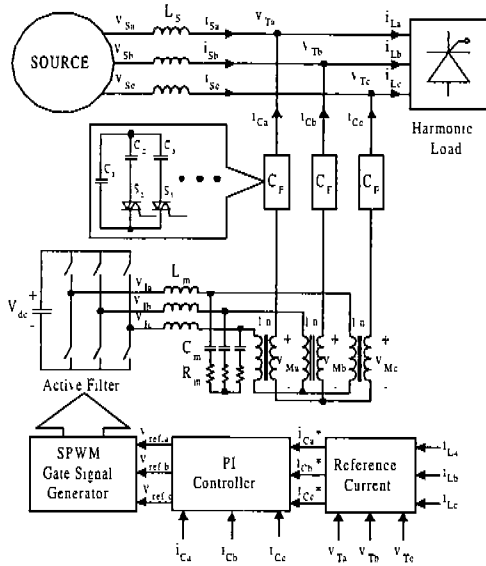


그림 4. 무효전력 및 고조파 보상을 위한 낮은 DC전압을 갖는 제안된 능동필터

한편, 전체 시스템의 제어는 단자 전압과 부하의 전류로부터 DQ이론에 의해 보상할 무효전력 및 고조파의 성분을 포함하는 3상 전류 $i_{C,abc}^*$ 를 얻은 후, 이를 10KHz 사인파 PWM과 PI 제어기를 이용한 부궤한 루프를 통하여 보상한다.

III. 커패시터 선택 및 주파수 해석

우선 그림 3에서와 같이 전압비 계수 m 과 용량비 계수 k 을 다음 식으로 정의한다.

$$\text{전압비 계수 } m = \frac{V_T}{V_M}, \quad (3)$$

$$\text{용량비 계수 } k = \frac{C_{eq}}{C_{unit}}. \quad (4)$$

여기서 C_{eq} 는 능동필터의 등가 커패시터이고, C_{unit} 은 m 에 따른 적절한 커패시터들의 크기를 얻기 위한 단위 커패시터이다. 한편, 계수 m 에 따른 상당 필요한 커패시터 갯수는 $m+1$ 이고, 크기는 다음 식에 의한다.

$$\begin{aligned} C_{max} &= C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_{m+1} \\ &= \left(1 + \frac{1}{m}\right) \cdot C_{unit} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4} + 2 + \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3^2 + 2 \cdot 3^{m-2}\right) \quad (5) \end{aligned}$$

만일 $m=2$, 즉 인버터 전압 V_M 이 단자 상전압 V_T 의 0.5가 되기를 원한다면, 식 (5)에 의해 3개의 커패시터 C_1, C_2, C_3 가 필요하며 각각의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{unit} &= C_{max} \cdot \frac{2}{9}, \quad C_1 = \frac{1}{4} C_{unit}, \\ C_2 &= \frac{3}{4} C_{unit}, \quad C_3 = 2C_{unit}. \quad (6) \end{aligned}$$

그림 3(b)는 $m=2$ 일때의 각각의 커패시터의 동작 영역을 보여준다. 여기서 C_1 은 C_{eq} 가 0에서 $0.5C_{unit}$ 일 때 동작하며, C_2 는 C_{eq} 가 $0.5C_{unit}$ 에서 $1.5C_{unit}$ 일 때 그림 4의 스위치 S_2 에 의해서 턴온되며, C_3 는 C_{eq} 가 $1.5C_{unit}$ 에서 $4.5C_{unit}(=C_{max})$ 일 때 스위치 S_3 가 턴온되어 동작한다. 이때, 각각의 동작영역에서 인버터의 최대 출력전압 V_M 은 단자 상전압 V_T 의 0.5 크기를 넘지 않는다.

또한, 그림 3(c)의 $m=3$ 인 경우도 그림 3(b)와 같이 비슷한 결과가 나타나며, 이때 상당 커패시터의 수는 4개가 된다.

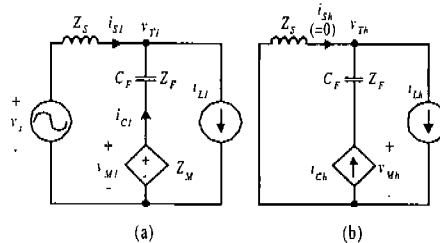


그림 5. 주파수에 따른 제안된 능동필터의 상당 등가회로

그림 5는 제안된 필터의 주파수에 따른 등가회로이며, 기본 주파수에서는 필터 커패시터 C_F 와 전압원 역할의 인버터로 구성된 가변 커패시터로 동작한다. 반면, 고조파 주파수에서는 부하의 고조파 전류를 보상하기 위한 필터 인덕터 L_m 및 인버터로 구성된 전류원 I_C 와 직렬로 C_F 가 연결되며, 이때 출력전압 V_M 의 고조파 성분 V_{Mh} 은 I_C 에 기이한 C_F 양단의 전압강하와 동일하다.

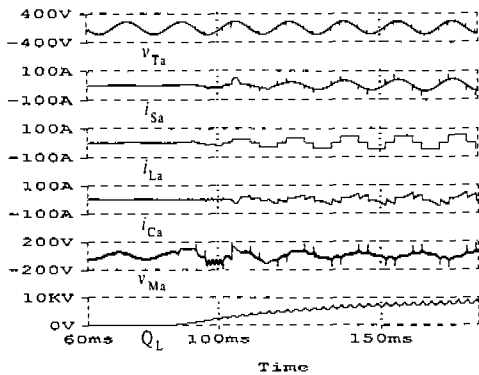
IV. 모의 실험

제안된 시스템의 실용성은 10kvar 용량의 6펄스 사이리스터 정류기에 대한 모의실험을

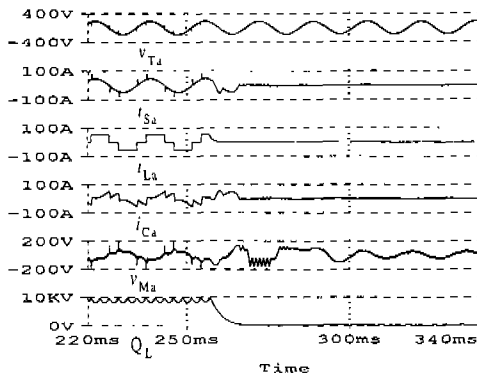
통하여 확인된다. 이때, 모의실험시 사용한 시스템의 상수들은 표 1과 같다.

의미	기호	값
전원 주파수	f	60 [Hz]
정격 부하 용량[1 p.u.]	VA	10[kVA]
전원 선간 전압[1 p.u.]	V_s	220[V _{rms}]
인버터 DC 전압	V_{dc}	100[V _{dc}]
전원 임피던스	L_s	100[μ H]
필터 커패시터 1	C_1	30.5[μ H]
필터 커패시터 2	C_2	91.5[μ H]
필터 커패시터 3	C_3	244[μ H]
인버터 필터 인덕터	L_m	1 [mH]
트랜스포머 권선비	n	1

표 1. 모의실험시 사용한 시스템 상수



(a) 무부하 -> 최대 부하(10kvar)



(b) 최대 부하(10kvar) -> 무부하

그림 6. 10kvar 6펄스 사이리스터 정류기 부하에 대한 a상의 모의 실험 결과 파형, V_{Ta} : 단자 상전압, i_{Sa} : 전원전류, i_{La} : 부하전류, i_{Ca} : 보상전류, V_{Ma} : 인버터 출력전압, Q_L : 부하의 무효전력.

여기서는 $m=2$ 에 대한 커패시터의 수 및 크기를 계산하였으며, 최종 모의 실험파형은 그림 6과 같다. 그림 6(a)은 무부하에서 최대 부하(10kvar)로 천이할 때의 파형으로서 부하의 무효전력 및 고조파 성분이 제안된 필터에 의해 거의 보상되며, 인버터 출력전압 V_{Ma} 은 정상상태시 약 80V 정도를 유지하고 과도상태시 약 110V 정도까지 상승하지만 약 1주기 만에 정상 상태에 도달하게 된다. 또한, 그림 6(b)의 최대부하에서 무부하의 상황에서도 그림 6(a)와 비슷하게 약 1주기의 과도응답 시간을 갖는다. 이로부터 제안된 시스템의 낮은 DC 전압 및 빠른 과도 응답이 확인 되었다.

V. 결론

본 논문은 기존의 병렬 능동필터의 높은 DC 전압이라는 단점을 해결하기 위해 필터 커패시터군과 직렬로 연결된 인버터 구조의, 낮은 DC 전압을 갖는 3상 대용량 고전압 부하의 무효전력 및 고조파를 보상하는 새로운 능동필터를 제안하였다. 또한, 적절한 크기 및 수의 필터 커패시터가 간단한 수식에 의해 계산되었으며, 마지막으로 제안된 필터의 유용성이 10kvar 6펄스 정류기 부하에 대한 모의실험을 통해 확인되었다.

참고 문헌

- [1] Gu H. Jung, Guk C. Cho, Soon W. Hong and G. H. Cho, "DSP Based Control of High Power Static VAR Compensator Using Novel Vector Product Phase Locked Loop", IEEE/PESC Annual Meeting, PP. 238-243, 1996
- [2] M. Rastogi, N. Mohan, A. Edris, "Filtering of Harmonic Currents and Damping of Resonances in Power Systems with a Hybrid-Active Filter", IEEE/APEC Annual Meeting, PP. 607-612, 1995
- [3] G. H. Jung, G. H. Cho, "New Active Power Filter with Simple Low Cost Structure without Tuned Filters", IEEE/PE SC Annual Meeting, PP. 217-222, 1995