

전력조류 제어에 의한 병·직렬 능동전력필터 시스템

강민형, 양이우, 김영석
인하대학교 전기공학과

Unified Active Power Filter System of control Power Flow

Min-Hyung Kang, lee-Woo Yang, Young-Seok Kim
Dept. of Electrical Engineering of Inha University.

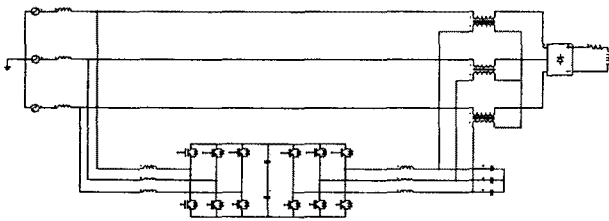
Abstract - This paper presents control algorithms for unified active power filter. The algorithm is based in the performance function. The performance function is defined, and the compensation voltage reference is calculated for harmonics voltage and the compensation current reference is calculated for power factor. The proposed control algorithm can be applied to 3-phase 3-wire system and has a superior compensation characteristics for both harmonic current sources and harmonic voltage sources.

1. 서론

능동 전력필터는 일반적으로 병렬형 능동 전력필터와 직렬형 능동 전력필터로 구분되는데, 병렬형 능동 전력필터는 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하에 큰 인덕턴스 성분이 존재하는 경우 부하측이 고조파 전류원으로 작용하게 되고, 일정dc 전류가 흐르게 되어 적절한 보상이 가능하게 되지만, 커패시턴스와 같은 성분이 존재하여 용량성 부하가 될 경우에는 부하측이 고조파 전압원으로 작용하고, 능동 전력필터가 주입하는 보상 전류가 부하측에도 흐르게 되므로 고조파를 제거할 수 없음을 물론 직렬 공진에 의해 오히려 다이오드 정류기에 흐르는 고조파 전류를 증대시켜 과전류를 초래할 위험이 있다.

이에 병렬형 능동전력필터에 직렬리액터를 삽입하여 이를 보완하고자 하였으나, 이는 전압강하를 일으킬 뿐만 아니라 비경제적이다. 이러한 문제들을 해결하고자 직렬형 능동 전력필터가 새로이 연구되었다. 직렬형 능동 전력필터는 시스템에 결합변압기를 이용하여 직렬로 접속되어 고조파에 대해 큰 임피던스로 작용하여 이를 차단시키는 효과가 있다. 이로 인해 용량성 부하에 대해서도 효과적인 고조파 보상을 가능하게 했으며, 또한 각종 사고에 의한 전원 전압의 상승, 강하 등의 전원 전압 변동기에 대해서도 우수한 보상 특성을 보여준다.

본 논문에서는 병렬형 능동 전력필터와 직렬형 능동 전력필터를 병용하여 전력 품질 개선을 도모하고자 통합된 능동 전력필터 시스템을 그림 1에 제시하였다. 각 능동 전력필터는 그 특성을 고려하여 고조파 보상과 역을 보상에 대해 각각 개별적인 동작을 하도록 제어된다. 각 능동 전력필터를 제어하기 위해 성능함수를 이용한 알고리즘을 제안하고, 제안된 알고리즘의 타당성과 유효성을 입증하고자 실험을 실시하였다.



〈그림 1〉 3상 3선식 병·직렬 능동 전력필터 시스템

2. 본론

본 절에서는 성능 함수를 이용한 3상3선식 병렬-직렬 능동전력필터 통합 시스템에서의 제어 알고리즘과 각 능동 전력필터의 보상 원리에 대해 알아본다.

2.1 직렬형 능동 필터의 보상 원리

본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 능동 전력필터로부터 발생된 무효전력을 순시 무효전력이라 정의한다

$$q_k = v_{ck} \cdot i_{sk} \quad (k = a, b, c) \tag{1}$$

식 (1)에서 k 는 3상의 각 상을 나타내는 a,b,c이며, v_{ck} 는 능동 전력필터가 발생시키는 각 상의 보상 전압, i_{sk} 는 각 상의 전원 전류를 나타낸다.

$$\sum_{k=a,b,c} q_k = v_{Ca}i_{sa} + v_{Cb}i_{sb} + v_{Cc}i_{sc} = 0 \tag{2}$$

능동 전력필터에서 발생하는 보상 전압은 또한 다음의 식 (3)을 만족한다.

$$v_{Ca} + v_{Cb} + v_{Cc} = 0 \tag{3}$$

능동 전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식 (3)을 만족하면서 다음에 정의하는 성능 함수를 최소화시키는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \tag{4}$$

식 (4)의 성능함수를 최소화하는 v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc} 를 식 (2)의 식 (3)을 이용하면서 다음의 미분식 식 (5)를 통해 유도해 내야한다.

$$\frac{dL}{dv_{Ca}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cb}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cc}} = 0 \tag{5}$$

식 (5)를 통해 유도된 v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc} 는 제안된 능동 전력필터의 보상 지령 전압으로 다음과 같이 구해진다.

$$v_{Ca} = \frac{\sqrt{3}(i_{sb} - i_{sc}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})}$$

$$v_{Cb} = \frac{\sqrt{3}(i_{sc} - i_{sa}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})} \tag{6}$$

$$v_{Cc} = \frac{\sqrt{3}(i_{sa} - i_{sb}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})}$$

여기서,

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \{ (i_{sb} - i_{sc})v_{La} + (i_{sc} - i_{sa})v_{Lb} + (i_{sa} - i_{sb})v_{Lc} \} \tag{7}$$

식 (6)은 식 (2)의 조건을 만족함으로써 얻어진 결과식 이므로, 식 (7)의 순시 무효전력 q 는 기존의 'p-q 이론'에서의 순시 무효전력의 정의식인 식(8)에 식(9)와 식 (10)을 대입하여 연산함으로써 증명할 수 있다.

$$q = v_{La}i_{s\beta} - v_{L\beta}i_{sa} \tag{8}$$

$$v_{La} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[v_{L\alpha} - \frac{1}{2}v_{L\beta} - \frac{1}{2}v_{Lc} \right]$$

$$v_{L\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}v_{L\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Lc} \right] \tag{9}$$

$$i_{s\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sc} \right]$$

$$i_{s\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sc} \right] \tag{10}$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{La}i_{sb} + v_{Lb}i_{sc} + v_{Lc}i_{sa} - v_{La}i_{sa} - v_{Lc}i_{sb})$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \{ (i_{sb} - i_{sc})v_{La} + (i_{sc} - i_{sa})v_{Lb} + (i_{sa} - i_{sb})v_{Lc} \} \tag{11}$$

따라서, 보상 지령 전압 안에는 순시 무효전력의 직류성분과 교류성분 모두 포함하고 있으며, 고조파만 보상할 경우 순시 무효전력의 교류성분만을 보상 성분으로 사용하면 된다. 따라서, 고조파 보상을 위한 능동 전력필터의 최종 보사 지령 전압은 다음의 식 (12)와 같다.

$$v_{Ca} = \frac{\sqrt{3}(i_{sb} - i_{sc}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})}$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{C_a} &= \frac{\sqrt{3}(i_r - i_{s_1})\bar{q}}{2(i_{s_1}^2 + i_{s_2}^2 + i_{s_3}^2 - i_{s_1}i_{s_2} - i_{s_2}i_{s_3} - i_{s_3}i_{s_1})} \\ \dot{v}_{C_b} &= \frac{\sqrt{3}(i_a - i_{s_2})\bar{q}}{2(i_{s_1}^2 + i_{s_2}^2 + i_{s_3}^2 - i_{s_1}i_{s_2} - i_{s_2}i_{s_3} - i_{s_3}i_{s_1})} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 병렬형 능동 필터의 보상 원리

역율 보상을 위한 제어는 병렬형 능동 전력필터에서 수행하며, 보상 목적이 역율 개선에 있으므로, 순시 무효전력의 직류성분 \bar{q} 만을 구해 보상해 준다. 직렬형 능동필터의 보상치를 구하는 방법과 같은 이점에서 출발하여 보상치를 도출해내며, 역율 개선을 위한 병렬형 능동 전력필터의 보상 전류를 구하면 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{i}_{C_a} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s_2} - i_{s_1})\bar{q}}{2(i_{s_1}^2 + i_{s_2}^2 + i_{s_3}^2 - i_{s_1}i_{s_2} - i_{s_2}i_{s_3} - i_{s_3}i_{s_1})} \\ \dot{i}_{C_b} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s_3} - i_{s_1})\bar{q}}{2(i_{s_1}^2 + i_{s_2}^2 + i_{s_3}^2 - i_{s_1}i_{s_2} - i_{s_2}i_{s_3} - i_{s_3}i_{s_1})} \\ \dot{i}_{C_c} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s_3} - i_{s_2})\bar{q}}{2(i_{s_1}^2 + i_{s_2}^2 + i_{s_3}^2 - i_{s_1}i_{s_2} - i_{s_2}i_{s_3} - i_{s_3}i_{s_1})} \end{aligned} \quad (13)$$

2.3 시스템 구성 및 실험 결과

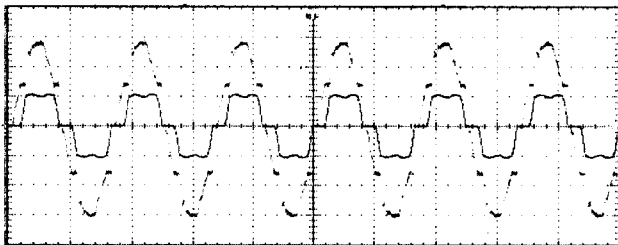
제안된 병.직렬 통합 시스템은 3상 3선식시스템이며, 두 개의 능동 전력필터는 3상 풀 브릿지 인버터로 구성되어 있고, 각 출력단에는 인버터에서 발생하는 스위칭 리플을 저감시키기 위해 인덕터와 커패시터가 연결되어 있다. 제안된 능동 전력필터의 타당성을 확인하기 위하여 3kVA 의 시스템을 제작하여 실험하였다. IGBT의 정격은 600V/50A 이며, DSP는 TMS320C6701을 사용하여 제어하였다.

〈표 1〉 시스템 회로 정수

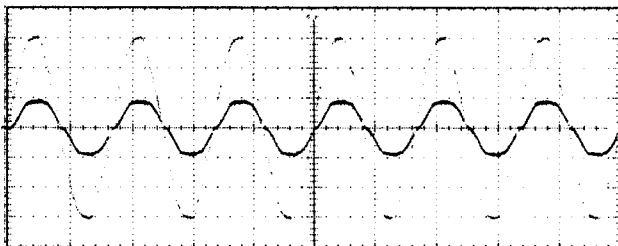
전원전압 V_s	100[V], 60[Hz]
전원 인덕턴스 L_s	0.1[mH]
결합 변압기 권수비	2:1
부하 인덕턴스	15[mH]
부하 저항	30[Ω]
인버터 DC link 커패시턴스	4700[uF]

그림 2는 보상 전 즉, 시스템에 능동 전력필터가 연결되지 않았을 경우의 파형이다. 부하에 의해 다량의 고조파가 포함되어 있고 역율 또한 저하되어 있음을 알 수 있다.

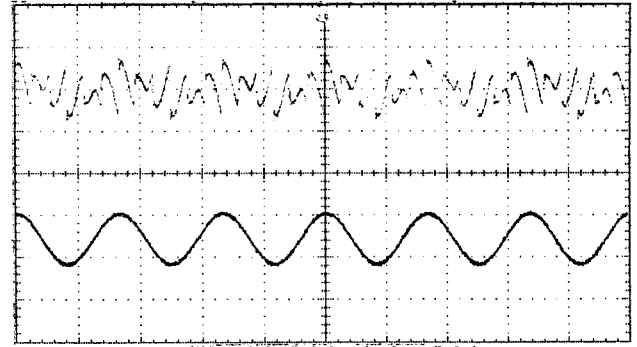
그림 3은 보상후의 파형들을 보여주고 있다. 고조파에 대한 보상과 역율 보상에 대해 효과적인 동작을 하고 있음을 증명한다.



〈그림 2〉 보상 전의 전원 전압과 전원 전류 파형



〈그림 3〉 보상 후의 전원 전압과 전원 전류 파형



〈그림 4〉 전압 레퍼런스 와 전류 레퍼런스

제안된 알고리즘에 의거하여 실험을 실시한 결과, 제시된 파형들에서 보는 것처럼 제안된 시스템은 고조파 보상 및 전압 보상과 역율 보상에 대해 효과적인 동작을 하고 있음을 알 수 있다. 전원 전압과 전류 전류에 대한 보상특성이 상당히 양호하여, a상 기준으로 볼 때 전원 전압의 경우 보상 전의 THD가 약 9.35%에서 보상 후 약 2.7%로 개선되었고, 전류 전류의 경우 보상 전 약 24.3%에서 보상 후 약 3.0%로 고조파 함유율이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 IEEE에서 요구하는 고조파 규제치를 충분히 만족하고 있음을 증명해 보이는 결과이다.

3. 결 론

본 논문에서는 부하의 특성에 따라 전원단에 유기되는 고조파를 억제하고 역율을 개선시키기 위해 보다 효과적인 시스템 및 알고리즘을 제안하였다. 또한 전원단 전압의 변동 문제 발생시에도 보상 작용할 수 있도록 대칭좌표법을 이용한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 능동 전력필터와 무효전력의 관계를 이용하여 성능함수를 정의하고, 이 성능함수를 최소화함으로써 전원측에 발생하는 고조파를 최소화하고 역율을 개선시킬 수 있으며, 대칭좌표법을 이용한 알고리즘의 적용으로 전원단에 발생한 전압 변동 문제를 해결할 수 있음을 실험 결과를 통해 증명하였다. 또한 성능함수를 이용하여 보상 지령치를 직접 도출하기 때문에 상변환을 이용하는 기존의 보상 알고리즘에 비해 비교적 연산이 간단한 것이 장점이라 하겠다. 제안된 알고리즘의 적용을 위해 직렬-병렬 능동 전력필터의 통합 시스템을 제시하였고, 이는 고조파 보상과 역율 개선에 대해 각각 별개의 동작을 하도록 제어되었으며, 제시된 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘 및 시스템이 우수한 보상 특성을 나타냄을 확인하였다. 최근 업무용이나 사무용 빌딩에 채택되고 있는 3상 4선식 전력계통에 설치하는 경우에도 알고리즘의 변형을 통해 적용 가능하며, 이때는 중성선의 특성에 대한 고려가 요구된다. 또한, 기존에 설치된 수동필터와 병용하여 운용할 시 더 우수한 보상 특성과 경제적인 기대효과가 예상되며, 전력 품질 개선에 크게 기여할 것이라 기대된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] L.Gyugyi, E.CStrycula, "Active ac Power Filter", Proc. IEEE IAS Annual Meeting, pp.529-533, 1976.
- [2] F.Z.Peng, G.W.Ott D.J.Adams, "Harmonic and Reactive Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire System", IEEE Trans. onpower Electronics, vol.13, no.6, pp.1174-1181,1998.
- [3] T.Furuhashi, S.Okuma, Y.Uchiakwa, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive power", IEEE Trans. on Industry Electronics, vol.37, no.1, pp.86-90, 1990.
- [4] H.Akagi, "New Trends in Active Filters for power Conditioning", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.32, no.6, pp.1312-1322, 1996.