

고조파 전류와 불평형부하 보상을 위한 직렬형 능동전력필터

박승호*, 정락교**, 김영석*
*인하대학교, **한국철도기술연구원

3-Phase 4-Wire Series Active Power Filter System for Harmonics and Unbalanced Loads Compensation

Seung-Ho Park*, Rak-Kyo Jeong**, Young-Seok Kim*
*Dept of Electrical Engineering of Inha University, **Korea Railroad Reserch Institute

Abstract - This paper proposes a control algorithm for 3-phase 4-wire series active power filter. This control algorithm compensates harmonics and neutral line currents which are generated by balanced or unbalanced nonlinear loads. The advantage of this control algorithm is direct extraction of compensation voltage references. Therefore, calculation time is shorten and the performance of series active power filter is improved. Compensation principle of the proposed control algorithm is presented in detail. Experimental results are shown to verify the effectiveness of the proposed control algorithm.

1. 서 론

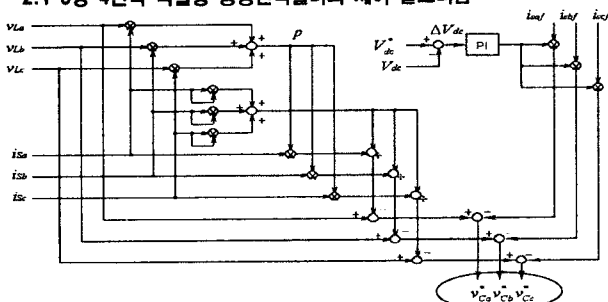
대형 컴퓨터시스템, HVDC 송전 시스템등의 산업용 시스템들이 산업화와 정보화를 거치면서 널리 보급되고, 사용되어지고 있다. 이러한 장치들은 전원단에 다이오드 정류기나 사이리스터 정류기등의 반도체 스위칭 디바이스를 사용함으로써 비선형부하로 동작하게 되고, 전원단에 심각한 고조파를 발생시키게 된다. 비선형 부하에 의해 발생된 고조파들은 전원전압을 왜곡시키고, 발전기나 송전선, 변압기 등의 전력계통 장치들의 VA용량 증대를 가져오게 된다. 또한, 각종 전기기기, 케이블, 진상콘덴서 등의 전력계통소자들에 열 및 소음을 발생시키고 더 나아가 절연과파 또는 수명단축을 초래한다. 특히 최근에는 컴퓨터, 복사기, 팩스, 에어컨등 고조파 전압원 형태의 부하들이 급속히 증가함으로써 고조파 전압원에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다.

이러한 고조파에 대한 대책으로 수동필터가 오래전부터 사용되고 있는데, 수동필터는 특정차수의 고조파만을 제거할 수 있기 때문에 전원단에 발생할 수 있는 광범위한 차수의 고조파 제거를 위해서는 각각의 주파수에 동조된 수동필터들이 설치되어야만 한다. 따라서, 전원단의 광범위한 고조파를 모두 제거하고자 하는 경우에는 부피가 증가하게 되고, 비용도 커지게 된다. 또한, 전력시스템의 전원측 임피던스와 공진을 일으킬 위험성도 항상 내재하고 있다.[1] 이러한 수동필터의 결점을 보완하기 위해서 1970년대 말부터 능동전력필터에 대한 연구가 시작되었다. 중성선이 없는 3상 3선식 시스템에 대한 능동전력필터는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 성공적으로 개발되었고, 실제 산업현장에 적용되고 있다.[2] 그러나, 기존의 3상 3선식 알고리즘은 상업용이나 업무용 빌딩에 채택되는 3상 4선식 시스템에 대해서는 그 성능을 확실히 보장해줄 수가 없기 때문에 3상 4선식 시스템에 대한 새로운 알고리즘이 요구되고 있다.[3]

본 논문에서는 고조파 전압원 부하를 가지는 3상 4선식 시스템에서 비선형 부하로부터 발생되는 고조파와 상전류의 약 1.5배에 이르는 중성선 전류를 효과적으로 제거하고 불평형부하에 있어서도 고조파 및 중성선전류를 제거하기 위한 직렬형 능동전력필터의 제어알고리즘을 제안하였다. 그리고 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘



<그림 1> 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘

본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 순시무효전력을 부하에서 발생하는 무효전력 대신에 능동전력필터에서 발생된 각 상의 전력을 순시 무효전력으로 정의한다. 이것은 능동전력필터가 순시 유효전력을 발생하지 않기 때문에 유효하다. 따라서 순시 무효전력 q_k 는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = v_{Ck} \cdot i_{Sk} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

직렬형 능동전력필터는 순시 유효전력을 발생하지 않으므로 능동필터에서 발생하는 모든 전력은 부하로 전달되지 않고 상 사이에서 회전하는 무효전력성분이 된다. 따라서, 식 (1)을 다음 식(2)와 같이 능동전력필터에서 발생하는 전력의 합을 0으로 놓을 수 있다.

$$v_{Ca} i_{Sa} + v_{Cb} i_{Sb} + v_{Cc} i_{Sc} = 0 \quad (2)$$

직렬형 능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)를 만족하면서, 다음에 정의하는 성능 함수를 최소화하는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \quad (3)$$

3상 4선식 시스템인 경우는 부하전압과 상전류에 영상분이 존재할 수 있기 때문에 3상 4선식 직렬형 능동전력필터에서는 부하전압에서 순시 유효전압을 발생하는 순시 유효전압벡터를 빼서 보상 기준전압을 구해낸다. 그림 1에서도 볼 수 있듯이 순시 유효전압벡터 V_p 는 전원전류와 동상인 부하전압의 벡터 성분을 나타내고, 순시 무효전압벡터 V_q 는 순시 유효전압벡터 V_p 에 수직인 전압벡터 성분을 나타낸다. 여기에서, 순시 유효전압벡터를 다음 식 (4)에서와 같이 벡터의 곱에 의해서 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{p(a,b,c)} &= \text{proj}_i v_L = \frac{v_L \cdot i_S}{\|i_S\|^2} i_S \\ &= \frac{v_{La} i_{Sa} + v_{Lb} i_{Sb} + v_{Lc} i_{Sc}}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)} \\ &= \frac{p}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} v_{pa} &= i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{pb} &= i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{pc} &= i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{Ca} &= v_{La} - i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cb} &= v_{Lb} - i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cc} &= v_{Lc} - i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

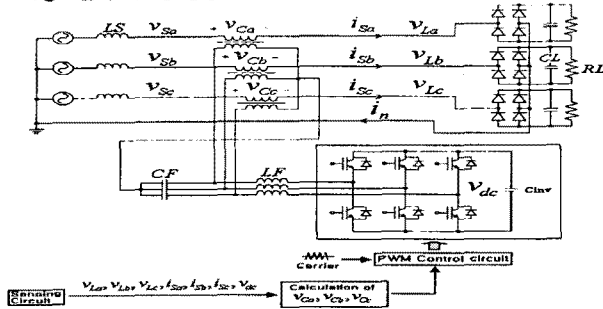
식 (3)의 성능함수는 식 (5)의 전압에서 최소가 되는데 이 보상 기준전압은 앞에서 언급했듯이 부하전압에서 순시유효전압을 빼줌으로써 얻을 수 있다. 식 (5) 및 (6)의 순시유효전력 p 는 다음 식 (7)과 같다.

$$p = v_{La} \cdot i_{Sa} + v_{Lb} \cdot i_{Sb} + v_{Lc} \cdot i_{Sc} \quad (7)$$

이상과 같이 기존의 직렬형 능동전력필터의 제어법에서는 상전류의 고조파를 연산해내고, 이 고조파전류에 특정한 계인을 곱하여 직렬형 능동전력필터의 최종적인 보상기준전압을 구해내었지만, 본 논문에서 제안된 성능함수를 이용한 제어법에서는 이러한 계인을 찾아내는 어려움 없이 부하전압과 전원 전류 값으로부터 연산에 의

하여 보상전압을 얻을 수 있다. 또한 고조파 성분을 보상해줌으로 인하여 추가적인 알고리즘 없이 3상 4선식 시스템에서 문제가 되는 영상분 보상이 가능하다.

2.2 3상 4선식 직렬형 능동필터 시스템



〈그림 2〉 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 시스템

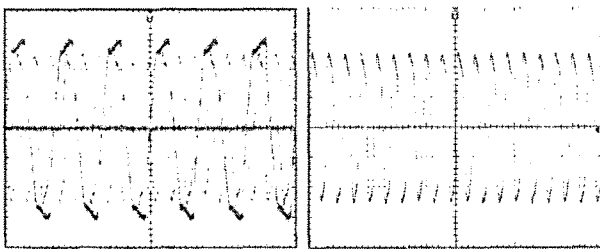
그림 2는 3상 4선식 직렬형 능동전력필터와 제어 알고리즘을 보여준다. 실험수행을 위해서 전형적인 고조파 전압원 형태의 3상 4선식 직렬형 능동전력필터를 구성하였다. 부하로는 단상 다이오드 정류기에 RC부하를 연결하여 고조파 전압원을 구성하였다. 그리고 부하와 전원사이에 중성선을 연결하여 3상 4선식 전력시스템을 구성하였고, 능동전력필터는 3상 Voltage Source Inverter를 변압기를 통해서 직렬로 3상 4선식 전력시스템에 결합하였다. 또한, 인버터의 출력단에는 스위칭 리플을 저감시키기 위해서 LC필터를 연결하였다. 그림 1에 나타난 제어 알고리즘은 위에 제시된 식들을 사용해서 구현하였다. 제어시스템을 효율적으로 구성하기 위해서 실시간 제어에 적합한 TI사의 TMS320C6701 DSP를 사용해서 20[kHz]의 속도로 인버터를 구동하였다. 표1에 시스템 구성을 위해 사용되어진 시스템 회로정수 값들을 나타내었다.

〈표 1〉 시스템 회로정수

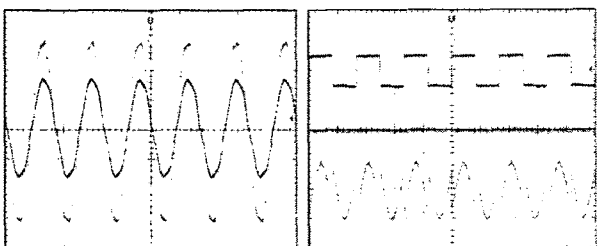
전원전압	110[Vrms]
전원측 인덕턴스	0.1[mH]
결합변압기 권수비	1:2
부하커패시터	2400[uF]
부하저항	[15Ω]
인버터 DC링크 콘덴서	4700[uF]
LC필터 인덕턴스[L]	4[mH]
LC필터 콘덴서[C _d]	0.5[uF]

2.3 실험결과

그림 3은 평형부하인 경우의 보상전 u상 전원전압과 3상 전원전류, 중성선전류 파형을 보여준다. 3상 전류의 THD는 약 57%이다. 그리고 중성선전류의 크기는 실효치가 약 18.8[A]로 상전류 실효치의 약 1.5배에 해당하는 큰전류가 흐름을 알 수 있다.

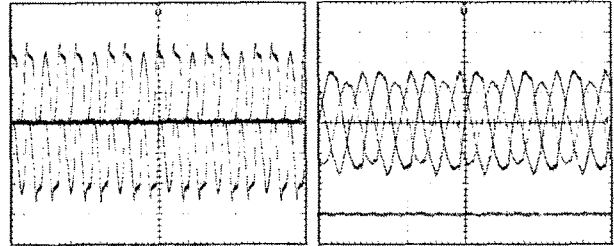


〈그림 3〉 평형부하인 경우의 보상전 u상 전원전압과 3상 전원전류 파형과 중성선전류
10[A]/div, 50[V]/div, 10[ms]/div



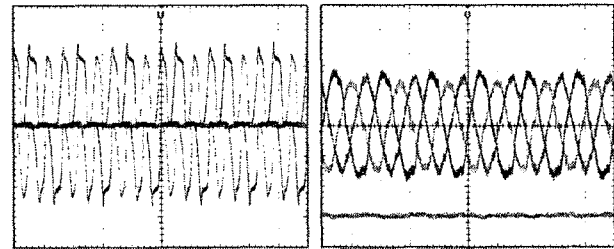
〈그림 4〉 평형부하인 경우의 보상후 u상 전원전압 u상 전원전류 파형과 부하전압 중성선전류 및 보상전압
10[A]/div, 50[V]/div, 10[ms]/div

그림 4는 3상 4선식 직렬형 능동전력필터를 써서 고조파와 무효전력을 보상한 경우의 파형을 보여주고 있다. 3상전류의 THD는 각각 A상 2.72%, B상 2.55%, C상 3.19%로 IEEE519의 규제치를 만족하는 우수한 보상결과를 보임을 알 수 있다. 중성선전류의 크기 또한 피크치가 ±1[A] 이내로 제한됨을 보여주고 있다. 이것은 중성선 전류의 감소율이 1/20 이상으로 직렬형 능동필터가 중성선 전류를 아주 효과적으로 제거할 수 있음을 보여주고 있다.



부하불평형(10Ω, 10Ω, 20Ω)
〈그림 5〉 불평형부하인 경우의 보상전 3상전원전류 파형과 보상후 3상 전원전류 및 중성선전류
5[A]/div, 10[ms]/div

그림 5는 2상 불평형 부하인 경우의 보상전 3상전류와 보상후 3상전류와 중성선전류 파형을 보여주고 있다. 부하불평형에 따른 3상전류의 불평형이 발생하여도 우수한 보상결과를 보임을 알 수 있다. 그리고 중성선 전류는 피크치가 평형부하인 경우와 마찬가지로 ±1[A] 이내로 제한되고 있음을 볼 수 있다.



부하불평형(10Ω, 15Ω, 20Ω)
〈그림 6〉 불평형부하인 경우의 보상전 3상전원전류 파형과 보상후 3상 전원전류 및 중성선전류
5[A]/div, 10[ms]/div

그림 6은 3상이 모두 불평형 부하인 경우의 보상전 3상전류와 보상후 3상전류와 중성선전류 파형을 보여주고 있다. 3상전류의 불평형이 발생하여도 고조파 보상 및 중성선전류제어에 우수한 역할을 함을 알 수 있다. 그리고 중성선 전류는 피크치가 평형부하인 경우와 마찬가지로 ±1[A] 이내로 제한되고 있음을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 직렬형 능동전력필터에 대한 새로운 알고리즘을 제시하였다. 평형부하인 경우와 불평형 부하인 경우에 대해서 실험을 수행하여 그 결과를 제시하였고, 실험결과를 통해서 고조파와 중성선전류, 불평형부하를 보상하는 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] F. Z. peng, et al. "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters" IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 26, No. 6, pp 983-990, 1990.
- [2] Mauricio Aredes, et al. "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies" IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp 311-318, 1997, March
- [3] F. Z. Peng, et al. "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire Systems" PESC '97 Record., 28th Annual IEEE, Vol. 2, pp 1089-1095, 1997.