

직.병렬 능동 전력필터 시스템을 이용한 불평형 전원전압 보상

강민형*, 김영조** 김영석*

*인하대학교 전기공학과, **유한대학 컴퓨터제어과

The Unbalanced Source Voltages Compensation Using by Unified Active Power Filter System

Min-Hyung Kang*, Young-Jo Kim** Young-Seok Kim*

*Dept. of Electrical Engineering of Inha University., **Dept. of Computer Aided Control of Yuhan College.

Abstract - 본 논문에서는 고조파 보상과 역률 보상을 실시하고, 전원 전압 불평형시 보상을 실시하는 직.병렬 능동전력필터에 관하여 연구하였다. 직렬형 능동전력필터에서는 고조파에 대한 보상 전압만을 발생하여 제어하고, 병렬형 능동전력필터에서는 역률에 대한 보상하는 전류만을 발생하여 제어한다. 또한, 불평형 전원 전압에 대한 보상은 직렬형 능동전력필터에서 실시하며, 고조파 보상과 역률 보상은 성능함수에 의해 계산되어지며, 불평형 전원 전압 보상은 대칭 좌표법을 이용하여 계산되어진다. 제시된 실험 결과들은 알고리즘의 타당성과 유효성을 검증한다.

1. 서 론

정보화와 산업화가 점점 더 고도화 되면서 컴퓨터를 이용한 전기, 전자 장비, 각종 고정밀 기기 등과 여러 가지 비선형 부하의 사용 급증은 기존에는 큰 문제시 되지 않았던 전력품질 이라는 요소를 전력 공급자 측이나 사용자 측에 커다란 문제점으로 대두 시키고 있다. 전력품질 저하의 문제는 크게 전류와 전압의 문제로 구별 할 수 있고, 그 중 전류의 문제로는 고조파와 역률 저하 등이 있으며, 전압의 문제로는 순간 정전, 순간 전압 강하, 순간 전압 상승, 3상의 전원전압 불평형 등이 있다. 전원 전압 불평형은 전압강하에 의한 문제와 전류 고조파에 의한 문제보다 직접적이고 그 규모도 크다 할 수 있다. 본 논문에서는 부하의 특성에 따라 전원단에 유기되는 고조파와 역률 저하를 보상하고, 불평형 전원전압 보상을 위한 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 역률을 개선시킬 수 있으며, 대칭좌표법을 이용한 알고리즘의 적용으로 전원단에 발생한 전압 변동 문제를 해결할 수 있음을 실험 결과를 통해 증명하였다. 직렬형 능동전력필터에서는 고조파 보상과 전원전압보상, 병렬형 능동전력필터에서는 역률 개선에 대해 각각 별개의 동작을 하도록 제어되었으며, 능동전력필터 각각의 장점을 취합하여 최적의 보상을 하기 위한 통합된 직.병렬 능동전력필터 12KVA 축소형 시스템을 구성후 제작하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘과 시스템의 유효성을 입증하였다.

2. 보상 원리

2.1 직렬형 능동 필터의 보상 원리

기존의 능동 전력필터의 제어에서 다루어왔던 순시 무효전력은 부하에 의해 발생된 무효전력을 의미했지만 본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 능동 전력필터로부터

발생된 무효전력을 순시 무효전력이라 정의한다. 따라서, 새롭게 정의된 순시 무효전력 q_k 는 능동 전력필터의 각 상에서 발생하는 전력으로 나타낸다.

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

식 (1)을 다음 식 (2)와 같이 능동 전력필터에서 발생 되는 전력의 합을 0으로 나타낼 수 있다.

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

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)와 식 (3)을 이용하면서 다음의 미분식 (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.

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

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

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

여기서,

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

식 (7)의 순시 무효전력 q 는 기존의 'p-q 이론'에서의 순시 무효 전력의 정의식인 식(8)에 식(9)와 식 (10)을 대입하여 연산함으로써 증명할 수 있다.

$$q = v_{La}i_{s3} - v_{L3}i_{sa} \tag{8}$$

$$v_{La} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[v_{L1} - \frac{1}{2}v_{L2} - \frac{1}{2}v_{Lc} \right]$$

$$v_{L3} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}v_{L2} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Lc} \right] \tag{9}$$

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[i_{s1} - \frac{1}{2} i_{s2} - \frac{1}{2} i_{s3} \right] \\ i_{s\beta} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} i_{s1} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s3} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{L\alpha} i_{s\beta} + v_{L\beta} i_{s\alpha} + v_{Lc} i_{s\alpha} - v_{L\alpha} i_{s1} - v_{L\beta} i_{s2}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \{ (i_{s1} - i_{s2}) v_{L\alpha} + (i_{s2} - i_{s3}) v_{L\beta} + (i_{s3} - i_{s1}) v_{Lc} \} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 고조파 보상을 위한 능동 전력필터의 최종 보사 지령 전압은 다음의 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} V^* C_{\alpha} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s1} - i_{s2})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \\ V^* C_{\beta} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s2} - i_{s3})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \\ V^* C_{c} &= \frac{\sqrt{3}(i_{s3} - i_{s1})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 병렬형 능동 필터의 보상 원리

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

$$\begin{aligned} i_{c\alpha}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{s1} - i_{s2})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \\ i_{c\beta}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{s2} - i_{s3})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \\ i_{c\gamma}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{s3} - i_{s1})\bar{q}}{2(i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 - i_{s1}i_{s2} - i_{s2}i_{s3} - i_{s3}i_{s1})} \end{aligned} \quad (13)$$

2.3 불평형 전원 전압 보상 원리

3상 전압이 평형 하다면 정상분 만이 나타나게 되지만, 불평형 할 경우에는 정상분 외에 역상분과 영상분이라는 성분이 나타난다. 그러므로 보상기에 의해서 역상분과 영상분을 보상해 준다면 불평형 한 전압은 평형한 상태로 회복될 것이며, 또한 정상분의 크기를 조정해 준다면 3상 전압의 크기를 원하는 만큼 조정할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_{ah} \\ V_{bh} \\ V_{ch} \end{pmatrix} &= V_1 \begin{pmatrix} \sin wt \\ \sin \left(wt - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(wt + \frac{2}{3}\pi \right) \end{pmatrix} + V_2 \begin{pmatrix} \sin wt \\ \sin \left(wt - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(wt + \frac{2}{3}\pi \right) \end{pmatrix} \\ &+ V_0 \begin{pmatrix} \sin wt \\ \sin wt \\ \sin wt \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서 첨자 1은 정상분, 첨자 2는 역상분 그리고 첨자 0은 영상분을 각각 나타낸다. 부하 전압도 식 (14)과 같이 정상분, 역상분 그리고 영상분으로 구성되고, 식 (15)의 Park's 변환식을 이용하여 회전좌표로 좌표 변환하면 식 (15)와 같이 나타난다.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos wt \cos \left(wt - \frac{2}{3}\pi \right) \cos \left(wt + \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin wt \sin \left(wt - \frac{2}{3}\pi \right) \sin \left(wt + \frac{2}{3}\pi \right) \\ \frac{1}{2} & & \frac{1}{2} \\ & & & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

변환된 결과인 식 (16)에서 볼 수 있듯이 V_q 의 성분을 필터링에 의하여 직류 성분과 교류 성분으로 분리하고, 그 중 교류 성분은 V_d, V_0 성분과 함께 불평형 전압을 보상하기 위한 지령전압이 되고, 직류 성분은 부하의 정격 전압과 비교하여 부하 전압조정을 위한 지령 전압을 구하는데 사용한다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} &= [P] \begin{pmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \\ V_{Lc} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ V_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -V_2 \sin 2wt \\ -V_2 \cos 2wt \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \sin wt \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 부하측 전압에 의해서 전원 전압의 불평형은 물론 부하 전압의 크기 조정까지 수행하고 있으며, 순시적으로 부하전압을 센싱하고 보상전압을 연산하여 보상해 주기 때문에 전압보상이 제한 제어의 형태로서 수행되어 지고 이것은 전원측 전압을 이용하여 불평형을 보상하는 경우보다 더 안정적인 부하측 전압을 평형상태로 만들어 줄 수가 있다.

2.4 시스템 구성 및 실험 결과

전력 품질 개선을 도모하고자 직렬형 능동 전력필터와 병렬형 능동 전력필터를 병용하여 통합된 능동 전력필터 시스템을 그림 1에 제시하였다. 부하는 고조파 전류원 부하로 설정하여 3상3선식 직.병렬 능동전력필터 시스템을 구성하였고, 직렬형 능동 전력필터는 3상 전압형 PWM 인버터를 교류 전원과 비선형 부하 사이에 3개의 결합변압기로 계통에 직렬 접속하여 구성하였고, 병렬형 능동 전력필터는 3상 전류형 히스테리시스 인버터를 부하와 병렬로 계통에 접속하였다.

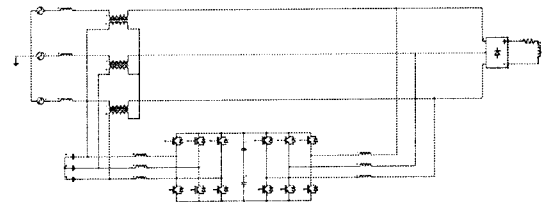


그림 1 직.병렬 능동전력필터

표 1에는 실험을 위해 12KVA의 축소형 모델로 제작된 3상 3선식 직.병렬 능동전력필터 시스템 회로 정수를 나타낸다.

표1 시스템 회로 정수

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

그림2는 직.병렬 능동전력필터의 보상 전 파형이고, 그림 3은 보상 전의 고조파 스펙트럼이다.

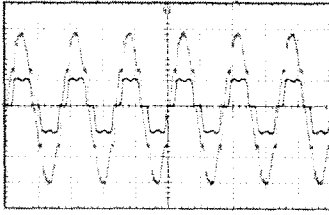


그림 2. 보상 전의 전원 전압과 전원 전류파형

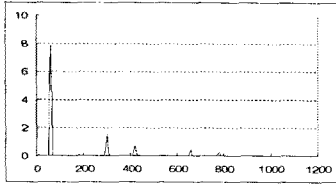


그림 3. 보상전 고조파 스펙트럼

그림 4는 직.병렬 능동전력필터의 보상 후 파형이고, 그림 5은 보상 후 고조파 스펙트럼이다.

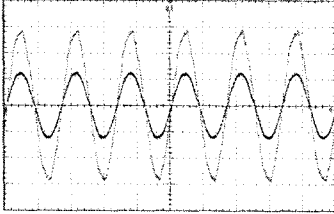


그림 4. 보상후의 전원 전압과 전원 전류파형

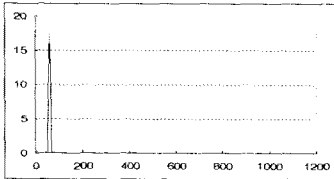


그림 5. 보상후의 고조파 스펙트럼

전원 전압의 불평형 조건을 만들기 위하여 전원측의 슬라이더스 변압기를 조정하였으며, 단상 전압 강하의 경우를 실험하였다.

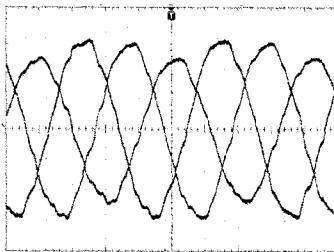


그림 6. 3상 불평형 전원 전압

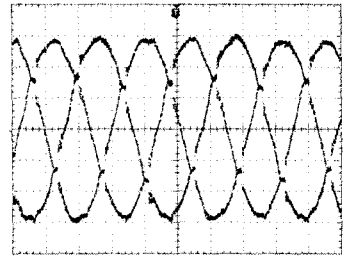


그림 7. 보상후 3상 부하 전압

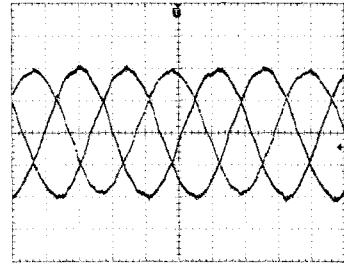


그림 8. 보상후 3상 전원 전류

3. 결 론

본 논문에서는 불평형 전원 전압 보상과 고조파를 억제하고 역율을 개선시키기 위해 보다 효과적인 시스템 및 알고리즘을 제안하였다. 전원 전압 불평형을 보상하기 위해 전원측의 3상 전압을 이용하고, 부하측 전압의 크기를 일정하게 유지하기 위해 부하의 3상 전압을 이용하던 기존의 방법에 비하여 제안하는 알고리즘은 더 효과적 이었고, 알고리즘 적용을 위해 직.병렬 능동전력필터의 통합 시스템을 제시하였다. 이는 고조파 보상과 역율 개선에 대해 각각 별개의 동작을 하도록 제어되었으며, 제시된 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘 및 시스템이 우수한 보상 특성을 나타냄을 확인하였고, 본 연구의 결과는 앞으로 전력 품질 개선을 위한 보상 시스템의 구성에 있어서 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 중소기업청의 지원에 의하여 연구 되었음. (S0504222-F0420410-10100020)

[참 고 문 헌]

- [1] L.Gyugyi, E.CStrycula, "Active ac Power Filter", Proc. IEEE IA S 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 Electronic s, 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.