

사이리스터 컨버터부하를 가지는 병렬형 능동전력필터 용량에 관한 연구

박노중, 정승기
 광운대학교 전기공학과

A Study on the capacity of shunt type active power filter with a thyristor converter load

Park No-joong, Joeng Seung-gi
 Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon univ.

Abstract The main drawback of parallel type active power filters(APFs) is the large capacity required for harmonic compensation. This paper evaluates the APF capacity requirement for harmonic/reactive power compensation for thyristor converter load. Theoretically achievable maximum power factor under partial load is evaluated. it is shown that the APF capacity can be considerably reduced by deliberately limiting the peak current, while maintaining the filtering performance with an acceptable total harmonic current level. the minimum capacity requirement of APF with current limiting is evaluated as a function of the firing angle of thyristor converter and short circuit ratio(SCR).

1. 서 론

지난 수 십년 동안 다양한 형태의 능동전력필터들이 개발되어왔다[1-4]. 그 중에서도 병렬형 능동전력필터는 비선형부하의 고조파전류에 의한 전원전압 및 전류 왜곡을 보상하기 위하여 고조파보상전류를 시스템에 주입하는 가장 직접적인 방법이다. 이러한 방법은 임의의 파형에 대한 정밀한 전류제어를 요구한다. 소전력 및 중전력 소자기술의 발달과 공간벡터 변조와 같은 펄스 폭 변조기술의 진보는 이러한 요구를 만족시키게 되었다. 그러나 몇몇의 성공적인 상업화에도 불구하고 큰 용량의 요구에 따른 높은 가격으로 인해 병렬형 능동전력필터는 많은 응용에서 사용되지 못하고 있다. 이에 기존의 병렬형 수동필터와 조합된 직렬형 능동전력필터나 몇 가지 변형된 형태[4]가 전력계통의 고조파문제의 해결책으로 제시되고 있다. 그러나 병렬형 능동전력필터는 고조파보상 뿐 아니라 유효전력의 흐름을 직접 다룰 수 있다는 매우 큰 장점을 가지고있다. 그러한 장점은 플리커현상[3]의 제거와 무효전력보상을 가능하게 한다.

능동전력필터가 연결된 지점에서 전압이 결정되어 있는 경우 능동전력필터의 용량은 선로에 공급되는 필터 전류의 최대값으로 결정된다. 능동전력필터전류는 고조파 성분으로 구성되어 있기 때문에 상당히 왜곡된 파형을 가지며 부하전류의 기본파성분 크기와 비교해 볼 때에도 매우 큰 값을 가질 수 있다. 일 예로, 캐패시터 직류링크를 가지는 다이오드 정류기의 전류 최대값은 기본파성분 크기의 수배에 달할 수 있다. 이러한 경우 고조파보상을 위한 능동전력필터의 전류용량은 대부분의 경우 지나치게 큰 정격을 요구하게 된다. 그러므로 병렬형 능동전력필터는 상대적으로 작은 전류를 가지는 사이리스터 컨버터부하에 주로 적용된다.[1,2,4] 최대 능동전력필터의 용량은 라인에 공급하는 고조파보상전류의 최대값을 제한함으로써 줄일 수 있다. 전류제한은 전력계통상에 잔류고조파를 남기게 된다. 그러나 계통에 사용되는 전력필터들의 목적은 선로의 고조파를 완전히 제거

하는 것이 아니라 허용 가능한 범위 안에서 고조파를 억제하는 것이다.[5] 그러므로 능동전력필터의 올바른 전류제한은 부하 공동접속점(PCC)에서 잔류고조파가 전력계통이나 다른 부하들에 별다른 영향을 주지 않도록 해야 한다. 이러한 관점에서 본 논문은 IEEE std 519의 고조파전류규제를 토대로 능동전력필터의 보상전류를 제한하여 필터의 용량을 줄일 수 있는 방법을 제안한다.

2. 병렬형 능동전력필터의 기본요구용량

이하 해석상의 불필요한 복잡성을 피하기 위해 다음의 가정들을 전제로 한다.

1. 부하 사이리스터 컨버터의 직류링크는 매우 큰 인덕턴스를 가지고 있어 리플이 없는 일정한 직류전류를 만들어 낸다.
2. 부하 사이리스터 컨버터의 전류중복기간 동안의 전류변화는 선형이다.
3. 능동전력필터의 전류제어는 이상적이다. 즉, 스위칭에서 발생하는 리플은 무시한다.

사이리스터 컨버터부하와 같은 비선형부하의 경우 부하 전류에 의해 전원전류는 심한 왜곡을 겪게 된다. 능동전력필터는 고조파보상전류를 공급하여 다른 부하에 좋은 품질의 전압을 공급할 수 있도록 해주며 그림1은 사이리스터 컨버터부하를 가지는 병렬형 능동전력필터의 시스템구성을 나타낸다

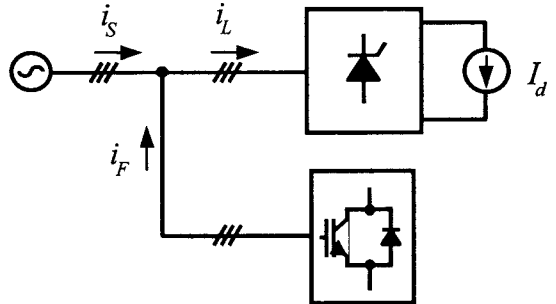


그림1. 사이리스터 컨버터부하를 가지는 병렬형 능동전력필터

전원단 인덕턴스를 고려하지 않는 경우의 전원전류(i_s), 능동전력필터 보상전류(i_F) 그리고 부하전류(i_L)를 그림2(a)에 나타내었으며 전원단 인덕턴스를 고려한 경우를 그림2(b)에 나타내었다. 점호각의 변화에 따라 전압과 전류의 위상차가 변화하지만 무효전력 보상을 고려하지 않으므로 문제가 되지 않는다.

전원단 인덕턴스를 고려하지 않는 경우 부하전류의 기본파성분은 그림2(a)에서 주어진 시간 기준점으로부터 다음으로 주어진다.

$$i_{L1} = I_0 \sin \omega t \quad (1)$$

여기서

$$i_0 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad (2)$$

이며 주어진 부하 컨버터의 직류출력전류는 I_d 이다.

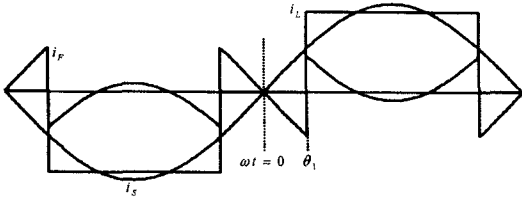


그림2(a) 전원단 인덕턴스가 없는 경우.

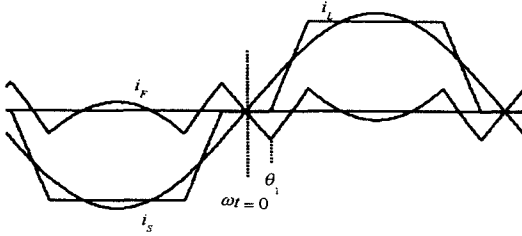


그림2(b) 전원단 인덕턴스가 있는 경우.

그림2. 전원전류, 부하전류 그리고 보상전류 파형

전력필터에 요구되는 전류용량은 보상전류 최대점이 되는 전류절환점, $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ 에서의 보상전류 크기로 주어진다.

$$i_{F,peak} = |i_F(\theta_{1-})| = |i_L(\theta_1) - i_{L1}(\theta_1)|$$

$$= I_0 \sin \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

$$\text{또는 } i_{F,peak} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_d = 0.55 I_d \quad (4)$$

이는 병렬형 능동전력필터가 고조파를 완전보상하기 위해서 부하컨버터 직류출력전류의 55%이상의 전류용량을 필요로 함을 의미한다. 이하에서는 부하컨버터 정격전류의 55%에 해당하는 전류용량을 전력필터의 기본정격이라 하겠다. 이 경우가 무효전력을 보상하지 않는 경우에 있어서 가장 큰 전류용량을 요구하는 최악의 조건이 된다. 실제적인 경우에는 전원단 인덕턴스에 의해서 부드러운 전류의 절환이 이루어지게 된다.

컨버터정격에 대한 컨버터 연결 지점에서의 시스템 단락용량의 비로 정의되는[5] 단락비를 도입하여 전원단 인덕턴스를 고려한다 즉,

$$\text{단락비}(SCR) = \frac{\text{시스템 단락용량}(MVA)}{\text{컨버터 정격}(MW)} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (5)$$

여기서, I_{SC} 는 최대단락전류를 I_L 은 최대부하 기본파 성분전류 실효치를 나타낸다. 이로부터 전원단 인덕턴스는 다음의 식으로 주어진다.

$$X_s = \omega L_s = \frac{V_{LL}}{SCR \sqrt{3} I_L} \quad (6)$$

여기서 V_{LL} 은 선간전압의 실효치를 나타낸다. 시스템 인덕턴스와 전류중복각 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$u = -\alpha + \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{2X_s}{\sqrt{2} V_{LL}} I_d \right) \quad (7)$$

단락비를 이용하여 전류중복각을 나타내면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$u = -\alpha + \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_d}{I_L SCR} \right) \quad (8)$$

여기서, α 는 점호각을 나타낸다. 전원단 인덕턴스를 고려하는 경우 중복전류를 선형으로

가정했으므로 식(1)에서 기본파성분의 크기는 다음으로 주어진다.

$$I_u = \frac{4\sqrt{3}}{\pi u} I_d \sin \frac{u}{2} = \frac{2}{u} I_d \sin \frac{u}{2} \quad (9)$$

그림2(b)에서 볼 수 있는 것처럼 최대보상전류는 $\theta_1 = \pi/6 - u/2$ 에서이며 식(10)과 같다.

$$i_{F,peak} = |i_{L1}(\theta_1)| = I_u \sin \left(\frac{\pi}{6} - \frac{u}{2} \right) \quad (10)$$

단락비와 부하컨버터의 점호각변화에 따른 최대 보상전류변화를 그림3에 나타내었다.

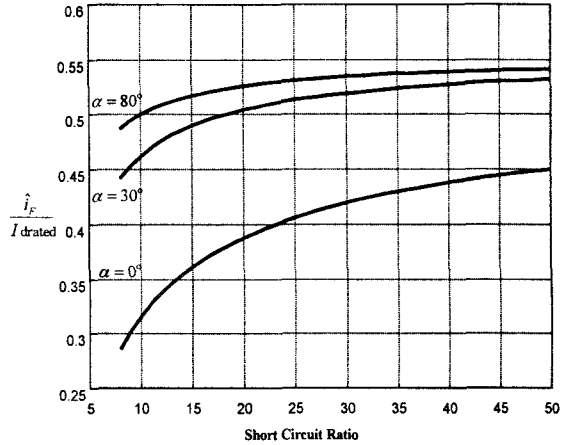


그림3 단락비에 따른 최대 보상전류

그림3에서 전원단 인덕턴스가 증가할수록 최대보상전류가 작아짐을 볼 수 있으며 점호각이 작은 경우 이러한 현상이 두드러지게 된다. 이러한 측면에서 실제의 싸이리스터 컨버터의 응용과는 부합된다 하더라도 전원단 인덕턴스와 점호각에 따라 상당한 능동전력필터의 전류용량 절감효과를 가져올 수 있다.

3. 무효전력보상과 병렬형 능동전력필터의 용량

고조파가 완전보상된 경우의 전원전류는 전원전압과 동상인 유효성분과 90° 위상차를 가지는 무효성분으로 나눌 수 있다. 능동전력필터는 무효성분을 전체 또는 부분 보상하여 역률을 개선시킬 수 있다. 이때 부하전류의 기본파성분은 식(11)로 주어지며 전류중복이 없음을 가정한다.

$$i_{L1} = I_0 \cos \alpha \sin \omega t + k I_0 \sin \alpha \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (11)$$

식(11)의 우측 첫 항은 전원에서 공급되는 유효성분을 두 번째 항은 전력필터에 의해 보상되는 무효성분을 나타낸다. 보상 정도에 따라 $k=0 \sim 1$ 사이의 값을 가지며 역률정의와 점호각을 이용하여 k 를 유도하면 식(12)와 같다.

$$k = \frac{1}{\tan \alpha} \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} \quad (12)$$

여기서 PF는 보상 후 결과적으로 얻을 수 있는 역률이다. 그림4는 부하전류와 보상 후의 전원전류 그리고 둘 사이의 차이에 해당하는 전력필터 보상전류의 전형적인 파형을 보여준다. 전류절환점에서 보상전류가 최대가 되므로 그림4로부터 $\omega t = \theta_1, \theta_2$ 에서 네 점의 전류값을 구하면 다음과 같다.

$$I_{L1-} = i_F(\theta_{1-}) = -i_s(\theta_1) \quad (13)$$

$$I_{L1+} = i_F(\theta_{1+}) = I_d - i_s(\theta_1) \quad (14)$$

$$I_{L2-} = i_F(\theta_{2-}) = I_d - i_s(\theta_2) \quad (15)$$

$$I_{2+} = i_F(\theta_{2+}) = -i_s(\theta_2) \quad (16)$$

따라서 전력필터의 전류용량은 식(17)로 주어진다.

$$i_{F, peak} = \max(\pm I_{1-}, \pm I_{1+}, \pm I_{2-}, \pm I_{2+}) \quad (17)$$

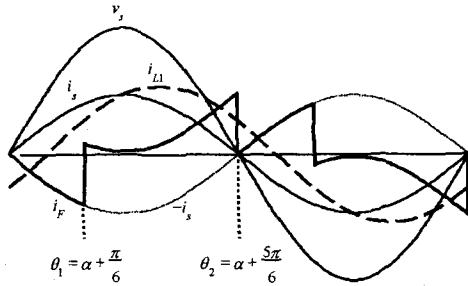


그림4 무효전류성분 보상을 가지는 전력필터전류

특정용량으로 설계된 전력필터는 부하전류 상태나 점호각에 따라 보상할 수 있는 무효전력양이 달라지게 되며 그 결과 역률도 달라지게 된다. 그림5는 부하전류의 고조파 및 무효성분전류를 완전보상하여 역률을 1로 만드는 데 필요한 전류를 나타내며 굵은 실선으로 나타나 있는 부분은 능동전력필터에 요구되는 전류용량을 나타낸다. 식(17)에 의해 만들어지는 전류용량곡선은 두 부분으로 구성되며 단위역률의 경우 점호각 60°에서 최대가 된다.

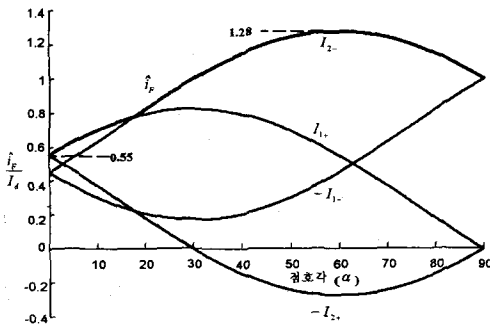


그림5 점호각에 따른 최대 보상전류변화.

그러므로 점호각 범위에 대하여 역률을 1로 보상하기 위한 전류용량은 부하전류의 $1 + \sqrt{3}/2\pi$ 배 또는 1.28배에 달한다. 그리고 앞서 정의한 기본정격의 2.3 배에 해당하는 용량이다. 또한 무효전류성분의 보상목적은 역률을 개선시키는 것이므로 역률이 DPF보다 크도록 만들어야 한다. 따라서 $PF \cdot \cos \alpha$ 를 만족시키는 점호각에서의 최대 필터전류만이 의미를 가지게 된다.

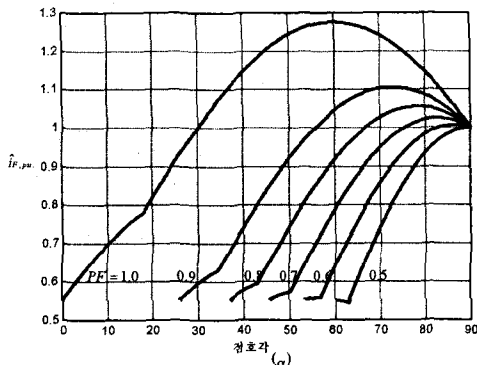


그림6 역률에 따른 전력필터 전류용량곡선

그림6에서는 역률과 점호각에 따른 전력필터용량인 최대필터 전류곡선을 나타낸다.

부하상태에 따라 전력필터에 요구되는 전류용량도 달라지게 된다. 그러므로 전력필터가 기본정격으로 설계된 경우 무효전력보상은 부하전류가 정격이하에서 운전되고 있는 경우에만 가능하게 된다. 특히, 점호각에 따라 부하전류의 직류출력전류가 감소하는 경우라면 특정용량으로 설계된 전력필터가 일정량의 무효전력을 보상할 수 있게 된다.

능동전력필터가 특정용량으로 설계되어 있는 경우 무부하에서 정격부하까지 부하전류의 상태가 변화할 때 최대로 보상할 수 있는 무효전력양을 알 수 있다. 다시 말해 최대 가능한 역률을 알 수 있다. 첫 번째로 부하전류 전 범위에 대하여 단위역률을 유지할 수 있는 점호각 범위가 존재하게 된다. 그리고 두 번째로 단위역률을 유지할 수 있는 부하전류의 한계가 존재하게 되며 마지막으로 역률곡선의 경계가 나타나게 된다.

이는 그림6에서처럼 역률에 따른 전력필터의 전류용량곡선이 $-I_{1-}$ 와 I_{2-} 곡선으로 이루어지기 때문이며 전력필터의 설계용량이 증가할수록 경계가 나타나는 점호각 범위가 줄어들게 된다. 경계점에서의 부하전류를 기준으로 전류가 작은 경우 I_{2-} 곡선이 큰 경우 $-I_{1-}$ 곡선이 역률을 결정하게 된다.

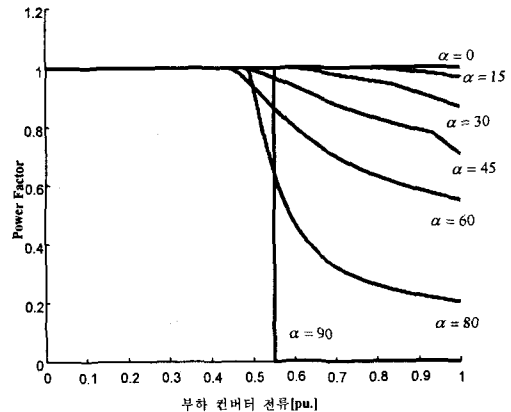


그림7 부하변화에 대한 최대가능역률

한가지 예로써 그림7은 병렬형 능동전력필터가 기본정격으로 설계된 경우를 나타내며 이에 따른 최대 가능역률곡선을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 부하전류 전 범위에 대하여 단위역률을 유지할 수 있는 점호각은 0° 한 경우이며 부하전류 0.43[pu]까지 단위역률을 유할 수 있다. 그리고 점호각 18°까지는 $-I_{1-}$ 곡선으로 역률이 결정되며 18°~60°까지는 역률곡선의 경계가 존재하게 된다. 이 경우 위에서 설명한 바와 같이 경계점에서의 부하전류를 기준으로 $-I_{1-}$ 또는 I_{2-} 곡선으로 역률이 결정된다. 그리고 점호각이 60° 이상이 되는 경우 경계점은 나타나지 않으며 이 때부터는 I_{2-} 곡선으로 역률이 결정된다.

4. 고조파 보상전류제한과 용량절감

IEEE standard 519에서는 단락비와 관련하여 표1과 같이 전원전류의 고조파를 규제하고 있다. 이처럼 IEEE std.519에서 규제하는 범위내에서 잔류고조파는 허용되므로 능동전력필터의 보상전류는 용량절감을 위해 제한을 할 수 있게 된다. 전류제한방법에는 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법이 있으며 본 논문에서는 후자의 방법을 사용하여 전류를 제한한다.

I_{sc}/I_L	h<11	11~16	17~22	23~35	35<h	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

표1. IEEE standard 519-1992 전원전류 고조파제한

또한 한가지 주목해야 할 사항은 삼상의 경우 각상의 전류는 다른 상들에 영향을 주게 되므로 한상만을 독립적으로 제한할 수 없으며 상호간의 영향을 고려해야 한다는 것이다.

공간벡터 상에서 상전류의 제한값을 I_{Lim} 라 할 때 각상의 제한범위를 공간벡터 상에서 표현하면 그림8과 같이 60° 간격의 6개의 영역으로 나눌 수 있으며 보상전류의 제한은 기준 보상전류벡터의 크기가 제한값을 넘어선 경우에 행해지며 기준 보상전류벡터의 각도는 그대로 유지하고 크기만을 제한값으로 가지는 제한된 보상전류 벡터를 적용하는 방법을 사용한다. 보상전류벡터가 그림에서처럼 영역I에 있음을 가정하면 제한된 보상전류벡터는 다음으로 주어진다.

$$i_{Fq} = I_{Lim} \quad (18)$$

$$i_{Fd} = \frac{i_{Fd}}{i_{Fq}} i_{Fq} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{i_{Fa} + 2i_{Fb}}{i_{Fa}} I_{Lim} \quad (19)$$

여기서 i_{Fd} , i_{Fq} 는 제한전의 기준보상전류벡터의 dq성분을 나타낸다. 그리고 식(18)(19)를 역변환하여 각 상성분으로 취하면 다음의 식과 같다.

$$i_{Fa} = I_{Lim} \quad (20)$$

$$i_{Fb} = \frac{i_{Fb}}{i_{Fa}} I_{Lim} \quad (21)$$

$$i_{Fc} = -i_{Fa} - i_{Fb} \quad (22)$$

유사한 방법으로 다른 영역의 경우도 쉽게 제한된 보상전류벡터를 얻을 수 있으므로 이하에서는 생략한다.

보상전류 제한값은 IEEE std.519규정에 맞추도록 선정 되어야 하며 보상정도를 나타내기 위해 기본정격에 대한 능동전력필터의 용량비를 나타내는 용량계수를 정의한다.

$$\text{용량계수}(K_C) = \frac{\text{필터전류용량}}{\text{기본정격}} = \frac{I_{Lim}}{I_{base}} \quad (23)$$

여기서, I_{Lim} 과 I_{base} 는 각각 능동필터의 전류용량과 기

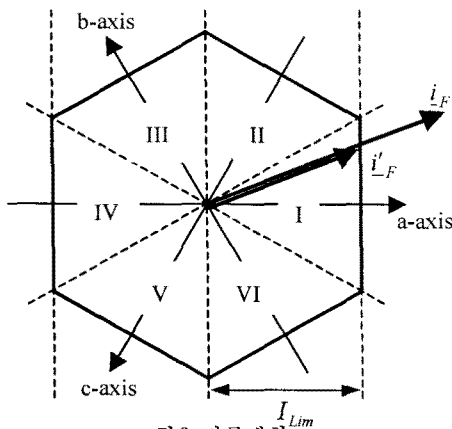


그림8 전류제한

본정격을 나타낸다. 만일 용량계수가 1이라면 병렬형 능동전력필터는 기본정격으로 설계된 것을 나타낸다. 다시 말해 용량계수는 기본정격을 기준으로 단위화된 전력필터의 용량을 나타낸다.

그림9(a)와(b)는 각각 단락비가 20인 경우와 50인 경우 몇몇 점호각에 대한 전류THD를 용량계수에 따라 나타낸 곡선이다. 아래로부터 점호각은 0° , 30° 그리고 80° 를 나타낸다. 고조파 규제에 의해 (a)의 경우 전류 THD를 5% 이내로 (b)의 경우 8% 이내로 제한해야 한다.

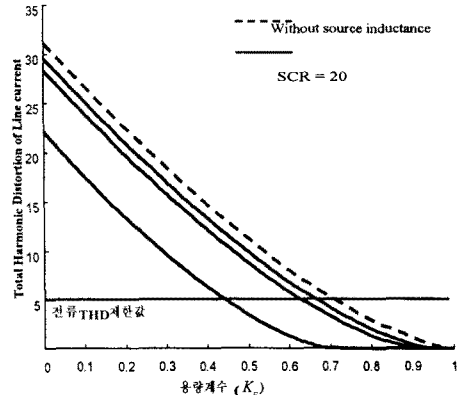


그림9(a)

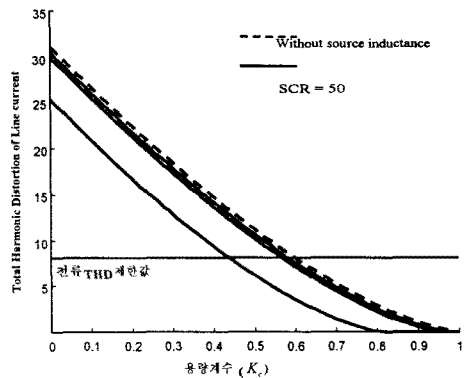


그림9(b)

그림9 용량계수에 따른 전원전류THD

그림10은 단락비가 20인 경우와 50인 경우 전류 THD를 규제치 이내로 제한하는데 필요한 최소전력필터 전류용량을 점호각에 따라 나타낸 곡선이다. 단락비가 20이내인 경우 전류THD를 5% 이내로 제한하는데 필요한 전류용량은 기본정격의 약 68%, 부하컨버터 정격 전류의 38%에 해당한다. 그리고 단락비 20이상 50이내의 경우 전류THD를 8% 이내로 제한하는데 필요한 전류용량은 기본정격의 60%, 부하컨버터 정격전류의 33%에 해당한다. 다시 말해서 기본정격으로 설계된 능동전력필터와 전류용량면에서 비교해보면 각각 32%와 40%의 용량절감을 가져오게 된다. 이는 병렬형 능동전력필터가 주로 대용량에 사용됨을 고려할 때 상당한 비용절감효과를 가져올 수 있음을 의미한다.

마지막으로 그림11(a)와(b)는 병렬형 능동전력필터 최소용량을 적용하였을 경우 점호각 전범위에 대하여 잔류고조파에 의한 왜곡이 제한치 내에 머물고 있음을 보여준다. 그림11(a)의 경우 용량계수는 0.68, (b)의 경우 0.6을 적용한 경우이다.

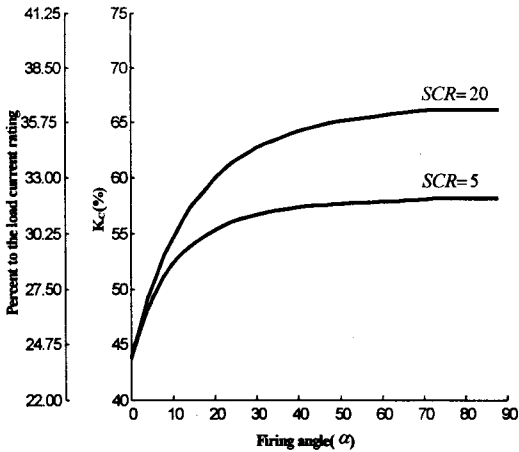


그림 10. 능동전력필터 최소용량

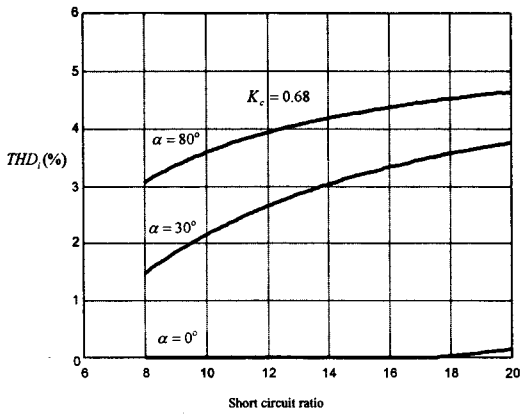


그림 11(a)

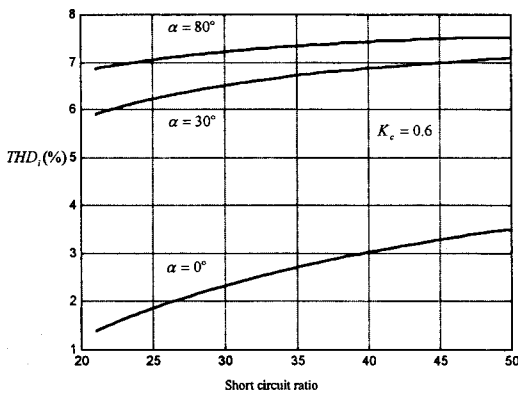


그림 11(b)

그림 11 최소용량을 적용한 경우의 전원전류 THD

3. 결 론

병렬형 능동전력필터가 가장 많이 적용되는 것 중 하나가 사이리스터 컨버터부하이다. 부하컨버터에 의해 발생하는 고조파전류를 완전보상하기 위해 병렬형 능동전력필터는 부하컨버터 직류출력전류의 55%에 이르는 전류용량을 가져야 한다. 전원단의 인덕턴스를 고려하는

경우 부드러운 전류질환에 의한 전원전류파형의 개선은 병렬형 능동전력필터 용량절감에 그다지 영향을 주지 못한다.

고조파보상에 추가하여 무효전력을 보상하는데 능동전력필터가 사용될 경우 전력필터에 요구되는 용량은 증가한다. 그러나 부하컨버터가 항상 정격상태로 운전되는 것은 아니므로 부분적으로 부하가 인가된 경우 고조파보상과 아울러 여분의 용량으로 무효전력을 보상할 수 있는 장점을 가지게 된다. 기본정격으로 설계된 병렬형 능동전력필터는 부하 사이리스터 컨버터가 정격직류출력전류의 43%이하에서 운전되고 있다면 부하컨버터를 단위역률로 운전할 수 있음을 이론적으로 해석하였다.

전류제한의 방법이 소개되었으며 올바른 전류제한값을 선정하기 위해 IEEE standard 519-1992의 전원전류 고조파규제를 바탕으로 하여 전류제한에 의한 전원전류의 잔류고조파영향을 평가하였다.

마지막으로 IEEE std.519 전원전류THD제한에 따른 병렬형 능동전력필터 최소용량산정을 이론적으로 제안했으며 그 결과 단락비에 따라 최대 40%의 용량을 절감할 수 있음을 확인했다.

(참 고 문 헌)

- [1] L. Gyugyi and E. C. Strycular, Active ac power filters, in Proc. IEEE-IAS Annual Meeting, pp.529-535, 1976.
- [2] H.Akagi, N. Nabae, and S. Atoh, Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converter, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-22, no. 3, pp.460-465, May/June 1986.
- [3] B. Acharya, D. M. Divan, R. W. Gascoigne, Active power filters using resonant pole inverters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-28, no. 6, pp.1269-1276, Nov./Dec. 1992.
- [4] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems, IEEE/PESC, 1988.
- [5] ANSI/IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for harmonic control in Electric Power Systems.
- [6] Seung-Gi Jeong, Dong-Ha Kim, Estimation of Required Capacity of shunt type Active Power Filter with a thyristor converter load, in Proc. ICPE, pp.802-807, Oct. 1998.