

직류 부하에 대한 3상 복합형 전력 필터 설계 A Design of Three-phase Hybrid Power Filter System for DC Loads

조동길(창원대 대학원), 조진호(창원대 대학원), 윤혁민(창원대 대학원),
변정섭(창원대 대학원), 송의호(창원대 조교수)

Dong-Gil Cho(Graduate School, Changwon National Univ.),
Jin-Ho Cho(Graduate School, Changwon National Univ.),
Hyouk-Min Yoon(Graduate School, Changwon National Univ.),
Jung-Seob Pyun(Graduate School, Changwon National Univ.),
Eui-Ho song(Assistant Prof. Changwon National Univ.)

Abstract

The reactive and harmonic current components of dc loads can be compensated by the three-phase hybrid power filter (HPF) system. After compensation, the resulting current has sinusoidal and in-phase components with the source voltage. The HPF system is constructed by an active filter and passive filters. The passive filter reduce the 5th and 7th harmonic of the load current. The active filter compensates the remainder of the load current. Using the HPF system, a low cost harmonic compensator can be made. Performance of the HPF system is verified through simulation.

Key Words : hybride power filter(복합형 전력 필터), dc loads(직류 부하)

1. 서론

송전선로에서 수용가로 전력을 공급함에 있어서 공장자동화시스템과 공작기계의 주동력장치로 사용되고 있는 교류(서보)모터, 직류모터등

의 전력 공급 장치인 인버터의 경우 비 선형 부하특성으로 인해 공급측 선로에 무효전력과 고조파 전류가 나타난다. 발생된 무효전력은 선로의 역을을 벌여드리고 고조파 전류는 주변 전자기기에 장애를 유발시킨다. 이러한 비선형 부하특성 효과를 줄이기 위해 과거에는 이러한 RLC로 이루어진 수동필터를 사용해 왔다. 수동필터는 필터의 차단주파수가 고정되어 있어서 특정 주파수 성분만 보정할 수 있으며 부하 특성이 변할 경우 시스템의 주파수성분도 함께 바뀌는 곳에는 역 효과를 일으킨다. 또한 고정부하라 할지라도 수동필터는 부피가 크고, 필터의 차단주파수 근처에서 공진 현상을 유발 한다. 따라서 가변부하특성에 적응할 수 있는 필터가 필요하게 되었으며 이러한 요구를 만족시키는 필터가 능동필터(active filter)이다. 능동필터를 이용하면 부하변동으로 인한 무효전력과 고조파 전류, 전압을 순간적으로 보상 할 수 있다. [1],[3] 본 논문에서는 수동필터와 능동필터를 적절히 구성한 600KVA급 복합형 전력필터를 설계하고자 한다. 수동필터는 다이오드 부하의 주 고조파 전류성분인 5차와 7차 성분을 제거하는데 사용되고, 능동필터는 나머지 무효전력성분과 고차 고조파 성분을 제거하는데 이용되어진다. 이와 같이 수동필터와

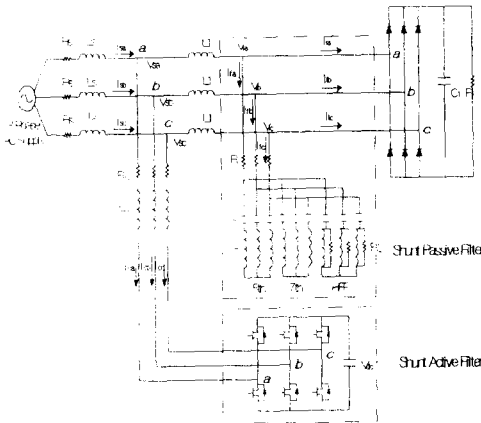


Fig.1 System of Hybrid Filter

능동필터로 구성된 복합형 전력필터를 사용하면 소형 수동필터와 소형 능동필터로서 보상기능을 수행할 수 있게 되어, 전력필터의 부피와 비용의 절감을 이룰 수가 있다.[2] 전력 제어 분야에서 널리 사용되고 있는 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 도구를 사용하여 복합형 전력필터의 제어특성을 검증한다.

2. 시스템 구성

복합형 전력필터 시스템은 Fig.1과 같이 구성될 수 있다. 전력필터가 없는 시스템에서 임피던스 R_s 와 L_s 를 가진 3상 교류전력이 3상 bridge 다이오드를 통해 RC 부하에 공급되고 있다. 이때 bridge 다이오드로부터 고조파 전류가 발생한다. 고조파 전류에 대한 높은 임피던스를 제공하기 위해 직렬 인덕턴스 $L1$ 이 추가된다. [2] 수동필터는 고조파 원으로부터 낮은 임피던스 경로를 제공하기 위해 직렬 인덕턴스 $L1$ 의 후단에 설치된다. 여기서 수동필터는 고조파전류의 주성분인 5차와 7차에 맞추어 설계되고 소량의 고차 주파수 성분을 제거하기 위해 고역필터 (HPF)가 함께 설치된다. 능동필터는 직렬 인덕턴스와 수동필터에 의한 기본파 전류의 무효성분과 수동필터에 의해 제거되지 못한 잔류 고조파성분을 제거하는 역할을 한다.

2-1 비선형 부하

비선형 부하는 고조파성분 발생을 위해서 3상 Bridge 다이오드 정류기와 인덕터(L1),콘덴서

(C1)로 구성된 LC필터 그리고 저항(R1)구성했다. 최대 부하 전력 공급 용량은 600KVA로 설정하였다. 이때 부하전압과 전류는 각각 500V/1200A이다.

2-2 수동필터

수동필터는 주요 고조파 전류성분인 5차와 7차 고조파를 제거하는데 목적이 있다. RLC직렬 공진 회로를 이용하여서 기본주파수(60Hz)의 5차와 7차가 되는 300Hz와 420Hz에서 공진이 일어나도록 하기 위해서 적당한 RLC값을 설정하였다. Table1은 수동필터의 RLC 값을 정리한 것이다.

2-3 3상 능동필터

능동필터는 전압원 인버터로서 에너지저장기능을 가진 직류 콘덴서와 인버터 스위칭주파수를 제거하기 위한 인덕터 L_c 와 IGBT를 사용하여 고속, 대용량의 용이성을 이루었으며, 스위칭 주파수는 20KHz로 선택되었다.

Table.1 Value of R,L,C

	L (mH)	C (uF)	R (Ω)
5차 필터	0.5305	530.5	0.01
7차 필터	0.37894	378.94	0.01
고주파필터	100	30.0	0.0025

3. 제어 전략

제어의 목적은 비선형부하에 의해서 입력전류에 발생하는 고조파성분을 복합형 전력 필터 사용하여서 제거하는 것이다. 부하전류의기본파 성분은 입력전류에서 공급하고 나머지 고주파 성분은 복합형 전력필터에서 공급함으로써 입력전류의 고조파 성분제거가 이루어진다. 그리고 능동 필터의 직류전압(Vdc)을 일정 하게 유지 시켜야 한다. 제어대상인 입력전류 I_{sx} 의 기준값을 만들기 위하여 관계를 설정 위해 수식을 전개한다. Fig.2의 등가회로도에서 입력전류(I_{sx})와 부하단의 전류(I_{lx}) 그리고 능동 필터단에서 공급되는 전류(I_{cx})의 관계는 아래의 수식으로 표현된다.

$$I_{sx} = I_{lx} + I_{cx} \quad (1)$$

위식을 I_{cx} 에 관해서 전개하면 아래의 식과같이 된다.

$$I_{cx} = I_{sx} - I_{lx} \quad (2)$$

Fig.2에 Kirchhoff's Voltage Law를 적용하면 V_f 는 아래의 식과 같이 유도된다.

$$V_f = V_s - L_f dI_{cx}/dt \quad (3)$$

식(3)에 (2)식을 대입 전개하면 아래의 식이된다.

$$V_f = V_s - L_f dI_{sx}/dt + L_f dI_{lx}/dt \quad (4)$$

능동 필터에서 직류 전압은 주어진 기준 값유지를 위하여 인버터 입력단보다 dc bus 전압이 낮으면 다이오드를 통하여 자동적으로 상승하게 되고 인버터 입력단 전압 보다직류 전압이 높은 상태에서 기준값을 유지와 입력전류의 보상을 위하여 스위칭을 한다. 여기서 V_f 와 V_{dc} 는 IGBT의 스위칭과 관련 되므로 비례 이득(k)을 사용하여 관계를 설정하면 아래의 식이 된다.

$$V_f = kV_{dc} \quad (5)$$

(4)식에 (5)식을 대입하여서 전개하면 다음 식이 유도되는데 여기서 V_{dc} 와 I_{sx} 와의 관계가 설정된다.

$$kV_{dc} = V_s - L_f dI_{sx}/dt + L_f dI_{lx}/dt \quad (6)$$

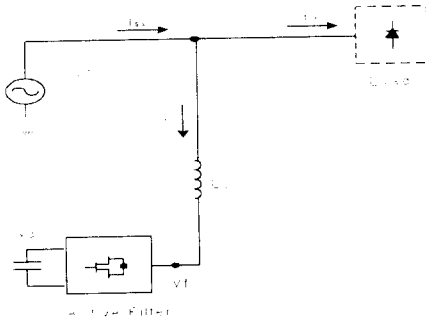


Fig.2 Active Filter

제어대상인 입력전류 I_{sx} 의 기준값을 만들기 위하여 관계를 설정하면 센싱된 입력전압(V_s)에서 3상 단위입력전류 벡터를 구하기위하여 입력전압의 크기를 구하면 (7)식이된다.

$$V_{sm} = [2/3 (V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2)]^{1/2} \quad (7)$$

3상 단위입력전류 벡터는 (8)식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} u_{sa} &= V_{sa}/V_{sm}, \quad u_{sb} = V_{sb}/V_{sm}, \\ u_{sc} &= V_{sc}/V_{sm} \end{aligned} \quad (8)$$

단위 입력전류는 입력전류의 최대값(I_{sp})와 함께

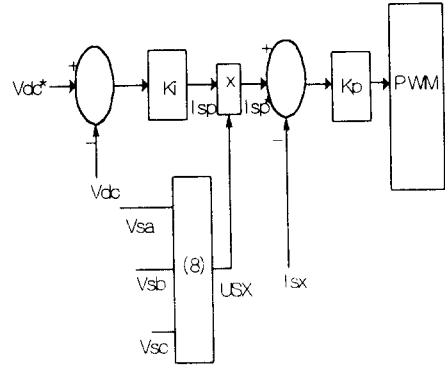


Fig.3 Block Diagram of Controller

입력전류의 기준값을 만들게 된다. I_{sp} 는 (6)식의 관계를 간략화 시키고 V_{dc} 를 제어하기 위하여 적분제어기를 첨가하면(9)번식과 같이 된다.

$$I_{sp} = d (V_{dc} * - V_{dc})/dt \quad (9)$$

최종적으로 만들어진 입력전류의 기준값은 아래와 같이 된다 .

$$I_{sx} * = I_{sp} * u_{sx} \quad (10)$$

전류제어기는 비례 제어기를 사용하였다. 능동 필터의 제어기구성은 Fig.3과 같다. K_i 는적분 이득이고 K_p 는 비례이득이다. 기준 전압 V_{dc}^* 와 실제입력 받은 V_{dc} 전압을 비교하여 이 오차의 양을 적분기를 거쳐서 I_{sp} 를 만들고 센싱한 입력 전압 V_{sx} 에서 식(8)을 이용하여서 단위입력전류 벡터를 만들고 위에서 만들어진 I_{sp} 와 합성하여서 입력 전류의 기준값을 만든다. 이것을 센싱한 실제 입력전류와 비교하여서 비례제어기를 거쳐서 PWM에서 IGBT를 구동하기 위한 게이트 신호를 만든다. PWM은 sin-PWM을 사용하며 위에서 만들어진 게이트 신호와 삼각파를 비교하여서 IGBT를 구동시킨다. 삼각파의 주파수는 20000hz를 사용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 복합형 전력 필터의 성능 분석을 하기 위하여 수동필터, 능동 필터를 각각 비교 하기 위하여 고조파 성분과 THD를 조사 하였고 복합형 전력 필터와 성능을 비교하였다. 시뮬레이션은 수동 필터만을 사용하였을 때 능동 필터

만 사용하였을 때, 복합형 전력 필터를 사용하였을 때의 고조파 성분을 푸리에 주파수 분석(FFT)에 의해 각 고조파 성분을 양적으로 비교하였다. 그리고 고조파 전압원의 역할을 하는 직렬 인덕터(L1) 첨가시의 고조파 성분의 변화도 조사하였다. 제어의 대상은 3상 600KVA급 Bridge 다이오드 정류기 부하를 가지는 시스템이며 설계된 능동필터의 보상용량은 200KVA급의 전압형 인버터이다. 시뮬레이션에 사용된 툴은 PSCAD/EMTDC 3.0이다. Table2는 시스템에 필터를 설치하지 않은 경우, 시스템에 수동필터만 설치한 경우 그리고 능동필터만 설치한 경우 그리고 복합형 필터를 설치한 경우의 입력전류의 고조파 성분들과 THD를 나타낸 것이다. 여기서 I_{2s} 는 입력전류 성분이고 I_{1s} 는 입력전류의 기본파 성분이다. Table.2에서 보면 Case A의 경우는 부하에 필터를 설치하지 않은 경우의 입력전류의 고조파 성분들이다.

4-1 수동 필터

고조파제거의 고전적 방법으로 5차, 7차 필터 그리고 HPF로 수동필터는 구성되었다. Table.2의 Case B와 Case D를 보면 수동 필터에 의한 고조파성분의 변화를 확인 할 수 있다. Case D 경우의 5차와 7차 고조파 성분은 많은 양의 감소를 보이고 있고 11차 이상의 고조파 성분들은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 수동 필터만으로 모든 고조파를 제거하자면 필터의 수가 늘어나고 크기가 매우 커지게 된다. Fig.4는 수동필터에 의하여 보상된 입력 전류와 입력 전압. Fig.5는 수동 필터 전류의 파형이다.

4-2 능동 필터

위에서 언급했듯이 수동 필터는 특정 고조파에 대해서만 입력전류의 보상이 이루어 졌다. 그러나 능동 필터는 전압형 인버터를 사용하여 모든 고조파 성분을 보상 할 수 있다. Table.2의 Case E의 경우가 능동 필터에 의해서 보상된 입력전류의 고조파 성분을 분석 한 것이다. 이것을 Case A와 비교해보면 모든 고조파성분에 대해서 보상이 이루어짐을 확인 할 수 있다. 그리고 수동 필터와의 성능을 비교해보면 Table.2의 Case C

와 Case E를 보면 7차 고조파에 대한 보상 능력은 수동 필터가 좋음을 알 수 있고 그러나 5차와 11차 이상의 고조파성분에 대해서는 능동 필터의 성능이 좋음을 알 수 있다. 그리고 Fig.6와 Fig.7의 입력전압과 입력전류의 파형을 비교하면 입력전압과 전류의 위상 뒤짐이 보상됨을 알 수 있다. 따라서 능동필터는 입력전류의 고조파 성분의 보상과 위상 뒤짐의 보상기능을 가지고 있다. 따라서 능동 필터는 Power Factor를 개선 시킬 수 있다.

4-3 하이브리드 필터

능동 필터는 보상해야 될 고조파 성분이 많을수록 인버터의 용량이 증가하는 문제가 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 복합형 전력 필터가 제안되어졌는데 능동 필터 와 수동 필터로 구성 되어진다. 능동필터의 용량을 줄이기 위해서 고조파 성분들 중 큰양을 차지하는 5차, 7차 고조파 성분을 수동필터를 이용하여서 양을 줄여서 능동 필터의 보상 용량을 줄인다. 그리고 능동 필터는 나머지 고조파 성분들을 보상하게 된다. Fig.8은 입력전압, 전류 부하단의 전류 그리고 Fig.9는 수동필터 전류, 능동 필터 전류의 파형이다.

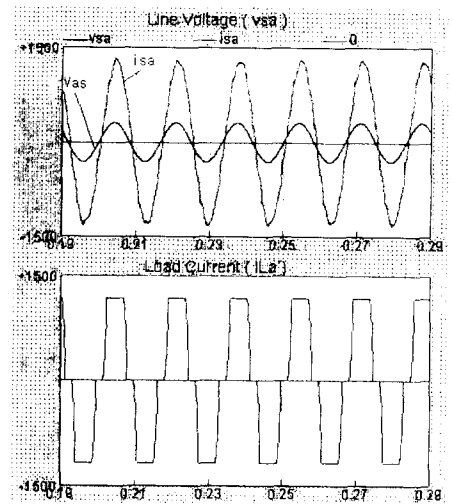


Fig.4 Line Voltage(Vas) Line Current(Ias) and Load Current(Ila) on Case D

Table.2 Analysis of Harmonics

order of harmonic (%)	(load +Ls) % Case A	Case A + L1 Case B	Case A + Passive Filter	Case B + Passive Filter	Case A + Active Filter	Hybrid Filter (Case B + Active Filter + Passive Filter)
5	17.3	13.9	2.0	0.6	0.6	0.8
7	10.8	6.8	0.9	0.3	3.9	0.2
11	4.6	1.9	4.6	2.2	1.2	0.1
13	3.0	1.6	3.4	1.5	1.9	0.3
17	1.3	1.0	1.7	0.6	0.3	0.2
19	1.1	0.7	1.2	0.5	0.8	0.1
23	0.9	0.5	0.7	0.4	0.4	0.1
25	0.8	0.5	0.6	0.4	0.5	0.1
29	0.4	0.2	0.6	0.3	0.4	0.1
31	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.1
THD(%)	21.7	15.97	6.5	3.11	4.97	1.62

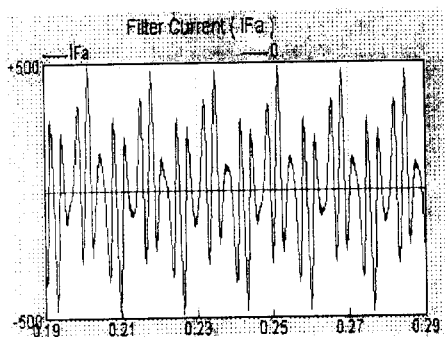


Fig.5 Passive Filter Current on Case D

Fig.9의 복합형 전력 필터의 능동 필터 보상전류(I_{ca})와 Fig.8의 능동 필터의 보상전류(I_{ca})를 비교해보면 보상전류의 양이 복합형 전력 필터가 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서 복합형 전력 필터의 능동 필터의 용량을 줄일 수 있다. Table.2를 보면 THD와 고조파성분을 분석한 것을 보면 복합형 필터의 성능 다른 경우 보다 우

수함을 알 수 있다. 능동 필터와 복합 전력 필터의 K_i 와 K_p 는 계속적인 시뮬레이션으로 최적의 이득 값을 찾아 내었다.

5. 결론

본 논문은 인버터의 3상 교류 입력 전원의 정류단인 3상 600KVA급의 비 선형 다이오드 전파 정류(Diode Full-Bridge Rectifier) 부하에 대한 병렬형 능동 필터와 병렬형 수동 필터로 구성된 복합형 전력 필터를 설계하였고, 시뮬레이션 결과를 기술하였다. 복합형 전력 필터의 수동 필터는 입력 전류(i_{sx})의 5차·7차 고조파 성분을 보상하고 전압형 인버터가 쓰인 능동 필터는 수동 필터에서 보상하고 남은 나머지 고조파성분 보상을 한다. 시뮬레이션 결과를 수동 필터를 사용했을 때 능동 필터를 사용했을 때 그리고 복합형 전력 필터를 사용했을 때를 구분하여 결과를 비

교 함으로써 복합형 전력 필터의 성능을 검증하였다. 결과적으로 복합형 전력 필터는 입력전류의 고조파 성분들을 제거하고 위상지연을 보상함으로써 Power Factor를 개선 시켰다.

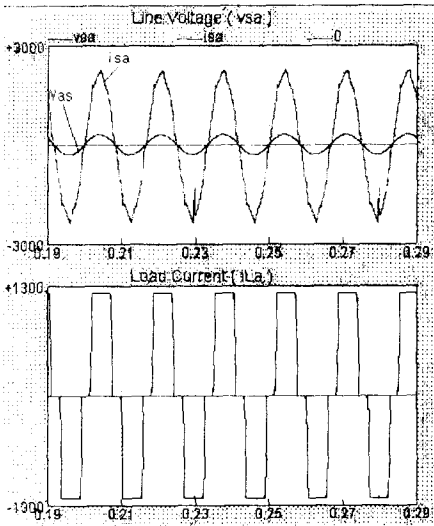


Fig.6 Line Voltage(Vas), Line Current(isa) and Load Current(ila) on Case E

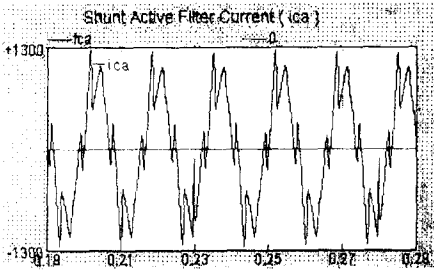


Fig.7 Active Filter Current(ica) on case E

참고문헌

1. Bhim Sinh, kamal Al-Haddad and Ambrish Chanda, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement" IEEE. vol. 46, no. 5, 1999
2. B. N. Sinh, Bhim Shinh, Ambrish Chanda, "DIGITAL IMPLEMENTATION OF HYBRID FILTER WITH SIMPLIFIED CONTROL STRAEGY", IEEE Conf. vol. 1, pp. 642-648, 1999

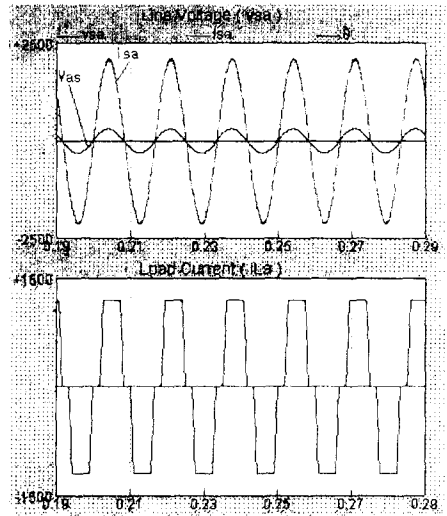


Fig.8 Line Voltage(Vas), Line Current(isa) and Load Current(ila) of Hybrid Filter

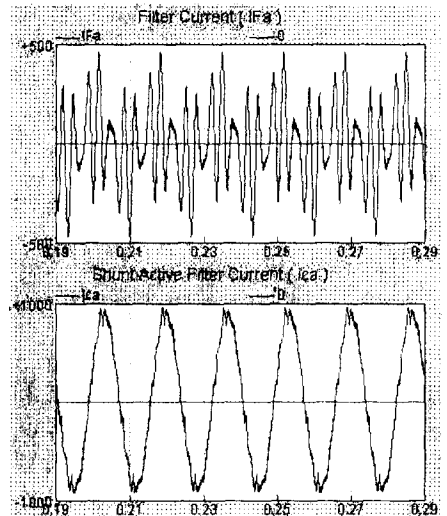


Fig.9 Passive Filter Current(ifa) and Active Filter Current(ica) of Hybrid Filter

3. Adel M. Al-Zamel, David A. Torrey, "A three-Phase Hybrid Series Passive/Shunt Active Filter System", IEEE Conf. vol. 1, pp. 875-881, 1999

Acknowledgment

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.