

교류 전력 품질 개선 장치

임근희, 강유리, 김원호
한국전기연구소 전력전자연구부 전력변환팀

AC Power Line Conditioner

G.H. Rim, I. Kang, W.H. Kim
KERI Power & Energy Conversion Team in Power Electronics Division

요약 - 교류전원은 직류전원과 다르게 전력 이용 및 전달에 있어서 유효역률과 고조파의 영향을 분리하여 생각할 수 없다. 특히, 고조파의 영향과 전력전자의 발달과 더불어 그 문제점이 크게 부각되고 있다. 유럽을 중심으로 세계 각국에서는 규격제정(EN 61000, IEC 519, IEEE 555 등)과 규제 강화에 나서고 있다. 국내에서는 아직까지 크게 주목받지 않고 있으나, 전력의 효율개선, 양질의 전력공급 등의 측면에서 기술 향상에 필수적으로 고려되어야 할 분야이다. 이에 본 연구에서는 간단한 제어기 구성을 통해 병렬 인버터와 하이브리드 능동필터 개념을 도입하여 역률 개선, 고조파 저감 등을 통해 교류전력 품질 개선 장치를 구성하였다. 본 연구결과로 고압 대 전력 전력변환장치의 무효 전력을 감소시켜 발전 전력의 효율적 이용과 부하측의 고조파 문제를 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

SMPS, 가변속 모터구동등 반도체 응용 전력변환 기기의 광범위한 사용으로 비선형 특성을 가지는 부하증가는 전원파형의 이그러짐을 유발하여 고조파 문제, 역률저하는 물론이고 전력기기의 상호교란, 온도 상승 등 많은 문제를 야기시키고 있다. 특히 컴퓨터, 전자기기, 자동화 기기 등 고품질의 전력이 요구되는 기기에서 깨끗한 전원(Clean Power Source)에 대한 요구는 소비자와 전력 공급자 공동의 문제점으로 부각되고 있다.

부하측에서 요구되는 전력품질(Power Quality)로는 크게 정전시간, 고조파, 전압 불평형 및 부하 자체 또는 인근 부하에서 유발되는 고조파, 저역률 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 전력전자 기술의 대상이 되는 고조파 및 역률에 대해 논의하며, 전압 불평형에 대해서는 다른 기회에 논하기로 한다.

고조파 저감 대책으로서는 수동 소자인 L, C를 이용한 병렬 필터가 지금까지 많이 사용되고 있다. 이런 종류의 필터는 회로 특성에 따라서는 공진을 유발시키게 되어 오히려 파형의 이그러짐을 악화시키기도 한다. 한편으로는 부하의 고조파 변동과 전력 계통변화에 대처할 수 없는 것도 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 종래의 수동필터가 가지고 있는 문제점을 보강하기 위해 전력전자 기술을 이용한 능동 필터 개념[1,2,3]이 도입되어 계통의 변화에 신속하고 유연하게 대처할 수 있게 되었으며, 그 성능 보강과 원가 절감을 위한 새로운 시도로서 수동필터와 능동필터를 겸한 하이브리드(hybrid) 필터[4,5]가 도입되고 있다.

한편, 대부분 유도성 부하로 생기는 지역를 문제를 해결하기 위해 동기조상기 또는 커패시터를 병렬로 삽입하는 스위칭 커패시터가 지금까지 주종을 이루어 왔다. 이는 신속성 및 성능면에서 부분적인 문제를 가지고 있어 근래에는 PWM 또는 다단계(Multi-Step)인버터가 도입되기 시작하였으며 계통의 대형화 복잡화에 따른 안정도 향상을 위한 대응량의 SVC가 검토, 적용되고 있다.

II. 무효전력 보상과 고조파 저감

전원, 부하 및 보상장치의 선형 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 저항성 부하(R_L)와 리액티브 부하(X_L) 및 비선형 부하 특성에서 발생하는 전류를 각각 $i_R(t)$, $i_X(t)$ 및 $i_h(t)$ 라 하면 부하전류 $i_L(t)$ 는

$$i_L(t) = i_R(t) + i_X(t) + i_h(t) \text{이며}$$

여기서 $i_R(t) = I_R \sin(\omega_o t)$

$$i_X(t) = I_X \sin(\omega_o t \pm \frac{\pi}{2})$$

$$i_h(t) = \sum_k I_{Xk} \sin(k\omega_o t + \phi_k)$$

한편, 기본파 무효전력과 고조파 보상을 위한 보상

전류 $i_c(t)$ 는 $i_c(t) = i_x(t) + i_h(t)$ 로 주어진다.

이때, 보상장치에서 발생하는 전압 $v_c(t)$ 는 벡터량으로서 $v_c(t) = v_s(t) + v_x(t) + v_h(t)$ 이다.

여기서 $v_x(t) = i_x(t) \cdot Z_c(\omega_0)$

$$v_h(t) = \sum v_{hk}(t)$$

$$v_{hk} = \sum i_{hk} \cdot Z(k\omega_0)$$

병렬보상장치의 기능은 스위칭 소자의 VA정격과 스위칭 주파수에 따라 결정되는데 고압 대용량의 경우 전류보다는 전압 정격에 민감하므로 주어진 스위칭 소자의 전압, 전류를 각각 V_{sw} , I_{sw} 로 하면 보상장치의 전압 V_c 는 $V_c = (V_{sw} \cdot I_{sw}) / I_c$ 로 결정되며 이 값을 최소화할 필요가 있다. 이는 제작비와도 깊은 관련이 있다.

그림 2는 주어진 소자의 VA정격을 기준으로 최대 무효전력 및 고조파 보상 전류의 상관관계를 가혹한 조건의 스칼라량으로 가정하여 환산한 것이다. 주어진 소자 정격에서 보상장치의 성능은 고조파 값이 커질수록 또 고차 고조파일수록 감소되므로 전류 리플(ripple)이 큰 부하계통에서는 기본파 무효전력보상과 고조파 저감을 인버터 한 개로 동시에 해결하기 어렵다.

따라서, 무효전력 보상은 저 스위칭 주파수, 고압, 대전류 소자를 이용하고 고주파 저감을 하이브리드 필터 개념을 도입하면 소자의 VA 정격을 낮출 수 있어 장치의 저가화를 실현할 수 있다. 하이브리드 능동필터는 일반 인버터만 사용하는 능동필터와 달리 수동필터(coupling network)를 동시에 사용하며, 전원 주파수($\omega_0 = 2\pi f_0$)에서는 임피던스 값($Z_c(\omega_0)$)를 크게하여 coupling network에 흐르는 무효전력을 최소화하고 또 고조파에서는 그 임피던스 값($Z_c(k\omega_0)$)이 적어 보상장치로 부터의 고조파 전류의 주입이 쉽도록 할 필요가 있다.

즉 $v_{hk} = i_{hk} \cdot Z(k\omega_0)$ 에서 보상장치에서 요구되는 전압, v_{hk} 를 최소화할 수 있다. 그림 3은 coupling network 회로를 보여주고 있으며, (a)의 경우 수동소자 L_k , C_k (k 는 정수)의 공진 주파수를 제거하고자 하는 K 차 고조파로 설계하되 임피던스, $Z_c(\omega_0)$ 는 클수록, $Z_c(k\omega_0)$ 는 작을수록 좋다. 이 방식은 선택한 각각의 고조파에서 임피던스 값, $Z_c(k\omega_0)$ 이 작으나 제거하고자 하는 고조파의 수가 많아지면 시스템이 복잡해지며 장치가격의 상승을 가져온다.

일반적으로는 LC 필터를 새로로 구성하여 이중 두회로는 저차 고조파에 나머지 한 회로는 고차 고조파에 동작하도록 설계하여 사용한다.

(b)의 회로에서는 LC 공진 주파수를 전원 주파수에 공진시켜, $Z(\omega_0)$ 는 증가시키고, 다른 고조파 성분에 대해서는 그 임피던스, $Z(k\omega_0)$ 가 낮도록 설계한다.

III. 제안된 시스템

본 연구에서 제안된 시스템은 기존의 시스템들과 비교하여 저가, 저손실을 목적으로 구현되었으며 그림 4와 같이 낮은 스위칭 주파수의 전압원 인버터(V_{c1})가 Z_{c1} 을 통해 AC계통과 연결되고, 높은 스위칭 주파수의 인버터(V_{c2})는 Z_{c2} 를 통하여 AC계통에 연결된다. 전원 주파수에서의 무효전력 수수는 V_{c1} 에 의해서 AC 전원전압 V_s 에 대한 상대적 전압 크기로 결정되어 지상 또는 진상 전류를 흘리게 된다. V_{c2} 는 고조파 전류 i_h 를 주입하여 부하측에서 발생하는 고조파 성분과 V_{c1} 에 의한 고조파 성분을 보상하게 되는데, 이 인버터단의 값에 의해 결정된다. Z_{c2} 는 전원 주파수에서는 높은 임피던스 값을 가지게 되어 전원전압 V_s 에 의한 전류 유입을 최소화하여 그 자체에 의한 무효전력 값을 최소화한다. 주회로의 설계는 V_s , I_x , I_h 의 값을 기본으로 전압원 인버터의 스위칭 소자 선택, 전압 결정, Z_{c1} , Z_{c2} 의 분석을 통해서 이루어지며, 주어진 소자의 VA정격에서 최대 무효전력 전류와 고조파 전류를 보상해야 하므로 V_{c1} 과 V_{c2} 등을 최소화해야 한다. 사용된 coupling network Z_{c1} 과 Z_{c2} 는 각각

$$Z_{c1}(S) = R_1 + sL_1$$

$$Z_{c2}(S) = \frac{R_2 + L_2 S}{1 + R_2 CS + L_2 CS^2}$$

으로 주어진다.

부하전류의 reactive 전류성분 $i_{c1}(t) = i_x(t)$ 과 고조파 성분 $i_{c2}(t) = i_h(t)$ 는 알맞은 제어기의 구현을 통해서 분배할 수 있다.

Coupling network를 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_2 C}$ 이 되도록 하면 Z_{c2} 의 주파수 특성은 그림 5와 같다. Z_{c2} 를 통해서 흐르는 기본파 전류는

$$I_{c2} = \frac{V_{c2} R_2}{\rho^2 + R_2 \rho}$$

여기에서 $\rho = \sqrt{L/C} \gg 1$ 으로 그 값이 적다.

IV. 실험 결과

제안된 시스템의 실험적 검증은 3상 정류기와 3상 커패시터 부하를 병렬로 구성한 부하에 대해 단상 보상장치로 실험하였다. 그림 6은 정류부하와 커패시터 부하에 흐르는 전류파형과 각각의 스펙트럼 결과를 나타낸다. 커패시터 전류는 정류기 부하전류에 대해 90° 진상이며 주변회로와의 간섭으로 고조파가 중첩되어져 있다. 그림 7은 각각 전원전압, 보상장치가 없을 때의 전원전류, 부하 커패시터 전류, 부하 정류기 전류파형을 포함한다. 보상장치가 동작하였을 때의 보상전류, 전원전류, 부하 커패시터 전류 및 전원전압파형은 그림 8과 같으며, 그림 9의 전원

전압, 전류의 스펙트럼분석 결과는 매우 양호한 무효 전력 보상 및 고조파 억제효과를 확인할 수 있다. 전원전압과 전류는 선간전압과 선전류로 30°의 위상차를 가진다. 그림 10과 11에서는 두가지 부하를 하나씩 제거했을 때의 과도현상을 보여주며, 커패시터를 제거했을 때는(그림 11) 과도현상이 거의 없으나 정류기 부하를 제거했을 때는 그림 10에서 보는 바와 같이 전원전류에 큰 이그러짐이 상당기간 지속됨을 볼 수 있다. 이는 아날로그 제어기 off-set 등에서 기인된 것으로 사료되며 차후 수정이 가능하다.

V. 결 론

본 연구의 결론으로서는

- 기본파 무효전력 보상장치와 고조파 제거장치를 분리하여 무효전력 보상장치의 낮은 VA와 실현, 낮은 스위칭 인버터 사용과 효과적인 고조파 억제 장치를 구현하여 AC 전원의 품질개선.
- 응답특성이 빠르고 유연한 시스템 구현.
- I_{ref} 와 I_{ref} signal을 별도로 구할 필요없는 시스템 구현.
- 병렬 인버터와 하이브리드 능동필터 도입으로 새로운 AC Power Line Conditioner 구성.

등을 들 수 있으며, 향후 고압 대전력 전력변환 시스템에 많은 적용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Akaki, "Trends in active power line conditioners", IECON Conf. Record, Nov. 1992 pp. 19~24.
- [2] G.H. Rim, I. Kang, W.H. Kim, J.S. Kim, "Performance Improvement of a Voltage Source active filter", APEC '95, Mon, 1995 pp.613~619.
- [3] G.H. Choe, M.H. park, "A new injection method for AC harmonic elimination by active power filter", IEEE Trans on IE, Vol 35 pp.141~147, 1988.
- [4] M. Rastogi, N. Mohan, A. Edris, "Filtering of hamonic currents and damping of resonances in power systems with hybrid active filter", APEC '95, Mar, 1985, pp.607~612.
- [5] G.H. Rim, I. Kang, W.H. Kim, J.S. Kim, "A shunt hybrid active filter with two passive filters in tandem", APEC'96, Mar. 1996 pp.361~366

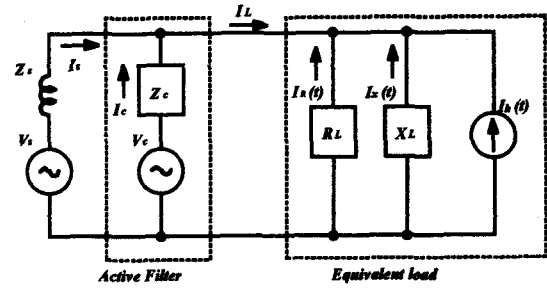


그림 1. 전원, 부하 및 보상장치의 선형 시스템

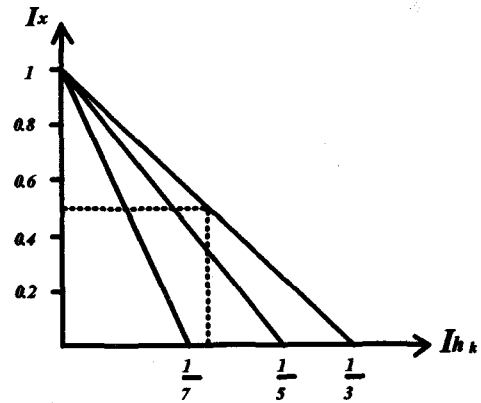


그림 2. 최대 무효전력 및 고조파 보상전류의 상관관계

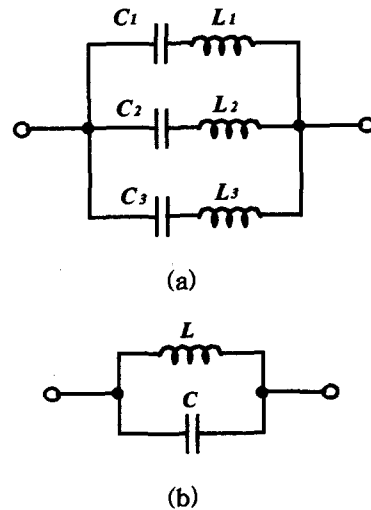


그림 3. Hybrid Active Filter의 coupling network

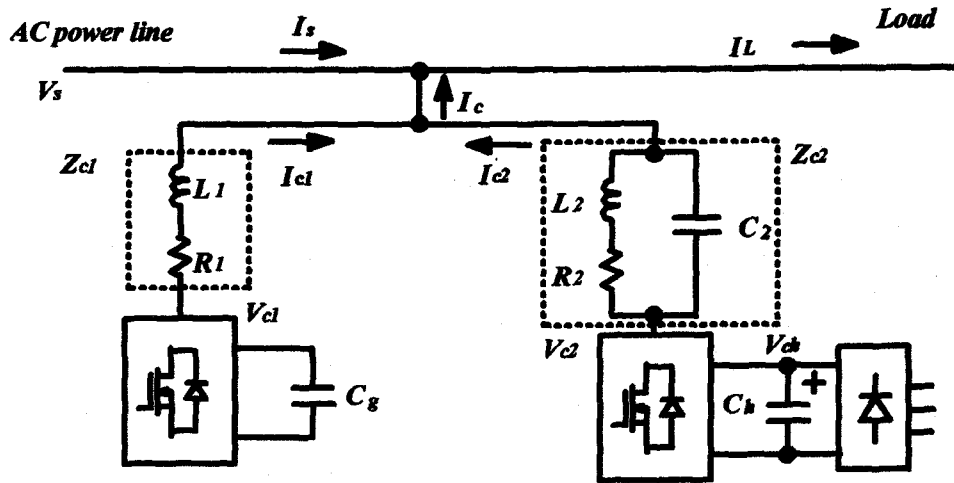


그림 4. AC Power Line Conditioner의 주회로도

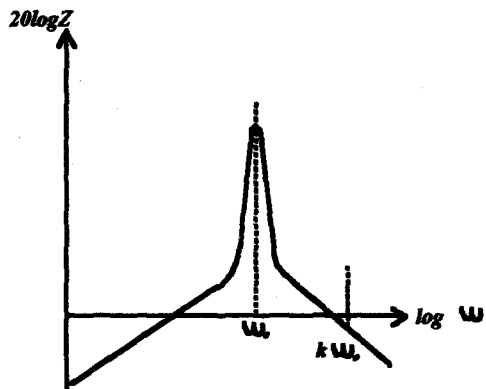


그림 5. Coupling Network의 \$Z_{c2}\$의 주파수 특성

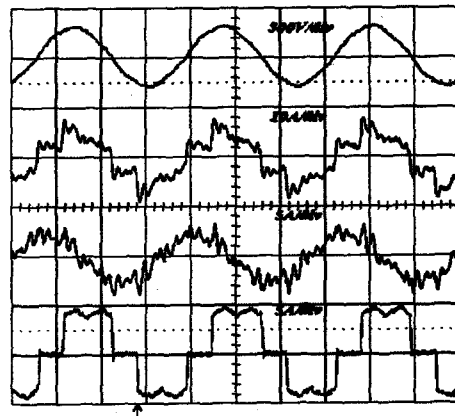


그림 7. 입력전압, 부하전류, 커패시터 부하전류 및 정류 부하전류 파형

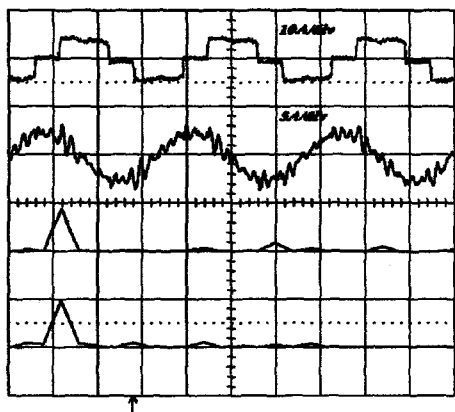


그림 6. 정류 부하전류, 커패시터 부하전류 파형 및 각각의 스펙트럼 분석도

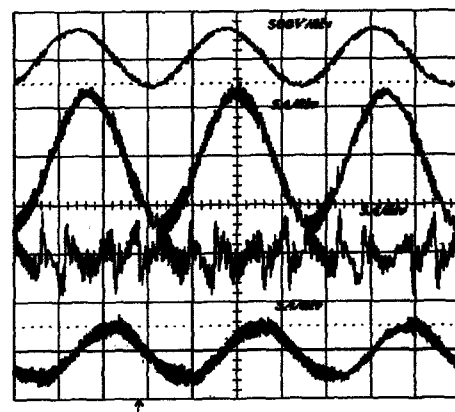


그림 8. 입력전압, 입력전류, 고조파 보상전류 및 무효전력 보상전류 파형

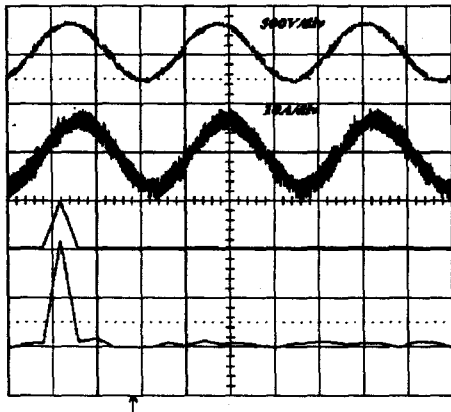


그림 9. 입력전압, 입력전류 파형 및 각각의 스펙트럼 분석도

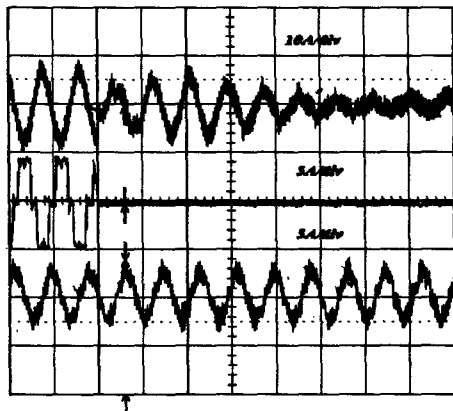


그림 10. 입력전류, 정류 부하전류 및 커패시터 부하 전류 파형(부하변동 : 정류 부하제거)

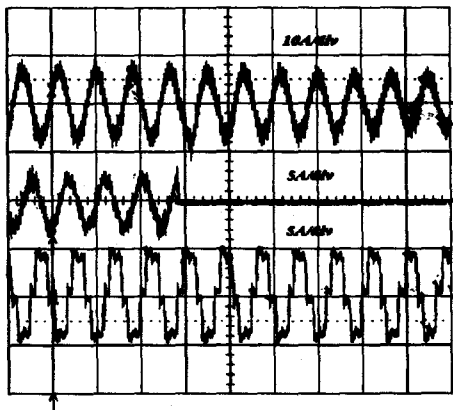


그림 11. 입력전류, 커패시터 부하전류 및 정류 부하 전류 파형(부하변동 : 커패시터 부하제거)