

THD를 고려한 DVR 시스템의 LC필터 설계

*김왕래, **임병국, ***손진근, *전희종
 *숭실대학교, **충주대학교, ***경원전문대학

Design of the LC Filter Considering Total Harmonic Distortion for Dynamic Voltage Restorers

*Wang-Rae Kim, **Byung-Kuk Lim, ***Jin-Geun Shon, *Hee-Jong Jeon
 *Soong-Sin Univ., **Choong-Ju Nat'l Univ., ***Kyoung-Won College

ABSTRACT

In order to reduce the harmonics in inverter output of the DVR system, typically LC filter is employed. In designing the LC filter, it is required to consider the grid impedance and the characteristic of the harmonics. In this paper, problems in the conventional way of designing the LC filter is analyzed and new LC filter design technique is proposed. In the proposed technique, parameters of the LC filter are calculated considering grid impedance, THD, DC link voltage and phase lag. The validity and feasibility of the proposed method is verified through the simulations and experiments. The DVR system with the proposed LC filter is being built and tested.

1. 서론

배전계통에서 순시적인 전압강하가 발생시 이의 전압을 직렬로 보상하는 DVR시스템은 DC의 에너지 저장장치로부터 AC전력을 변환하는 인버터가 구성요소로 들어 있으며, 이 인버터 장치는 PWM스위칭을 사용하여 전력을 강제로 변환하기 때문에 고조파를 수반하게 된다. 이러한 고조파를 방지하기 위해서는 전통적으로 인버터 출력단에 LC 필터를 부착하여 사용하지만 DVR은 기존의 UPS 인버터 등과 달리 배전계통에 직렬로 연결되기 때문에 배전계통 임피던스 및 고조파 특성 등을 고려해야만 한다[1-3].

따라서 본 연구에서는 기존에 주로 사용되었던 공진주파수에 의한 LC 필터의 선정기법에 대한 문제점을 분석하고, 배전계통의 임피던스 및 THD, DC Link 전압 및 출력전압의 위상차 등을 고려한 LC필터의 선정기법을 제시하기로 한다. 제시된 설계기법의 타당성을 검토하기 위하여 단락사고 모의회로에 의한 DVR시스템을 구성하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 이의 결과를 제

시하고자한다.

2. DVR 인버터의 LC 필터 설계

2.1 전통적인 LC필터의 설계기법

DVR시스템은 DC/AC 전력변환의 인버터로 구성되어 있으며, 이의 스위칭 작용으로 인하여 고조파 문제를 수반하게 된다. 전원공급 측에서는 이와 같은 전력변환회로가 비선형부하로 간주되며, 고조파 전류원으로 등가화 된다. 이러한 부하에 대한 고조파 전류원의 고조파 제거의 필터는 그림 1과 같이 LC 수동필터의 단상회로로 모델링 된다.

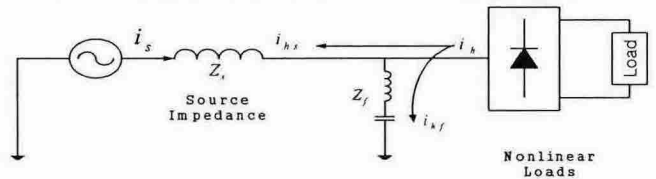


그림 1 LC 수동필터의 등가회로

따라서 비선형 부하에서 발생한 고조파전류는 직렬공진의 특성을 이용하여 고조파의 저임피던스 통로를 제공하여 고조파 전류를 흡수하게 된다. 이의 LC수동필터는 인덕터와 커패시터의 직렬회로로 구성되며 부하와 전원측 사이에 병렬로 접속된다. 이러한 등가회로에 대하여 부하전류의 고조파성분을 i_k 라 할 때 LC수동필터에 흐르는 전류 i_{kf} 와 전원으로 흐르는 전류 i_{hs} 는 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{kf} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_f} i_k \quad (1)$$

$$i_{hs} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} i_k \quad (2)$$

이러한 관계로부터 전원으로 흐르는 전류 i_{hs} 를

영으로 억제하기 위해서는 z_f 가 영이 되어야 함을 알 수 있으며, 이에 따라 LC필터의 임피던스는 공진조건을 이용한다. 그러므로 공진주파수는 LC수동 전력필터의 설계에서 제거대상 고조파의 주파수(f_n)가 되며, 직렬공진의 조건은 식 (3)과 같다

$$2\pi f_n L_f = \frac{1}{2\pi f_n C_f} \quad (3)$$

인버터의 출력주파수가 고정되어 있는 능동전력필터(APF)나 DVR과 같은 Custom Power기기에서는 출력전압의 크기와 위상은 지령에 따라서 수시로 변동되지만 주파수는 상용주파수로 거의 고정된다. 즉 출력주파수 대역은 60[Hz]이고 인버터의 고조파 제거를 7차의 고조파까지만 고려한다면 공진주파수는 420[Hz]로 선정된다. 그리고 C_f 의 용량을 150[μ F]으로 선정한다면, 출력 필터용 인덕터 L_f 의 용량은 식 (3)의 관계에 의하여 약 1[mH]로 설정할 수 있으며, 공진주파수에서의 임피던스는 258[Ω]으로 선정 가능하다.

이렇게 선정된 LC 필터에서 인버터 출력부의 매칭변압기에 대한 승압율(1:2)을 고려하여 인버터부 직류링크단 전압 V_{dc} 는 155.5[V]로 선정하고, 스위칭 주파수 f_s 를 10[kHz]로 선정할 때의 LC필터에 대한 주파수 응답을 그림 2에 나타내었다.

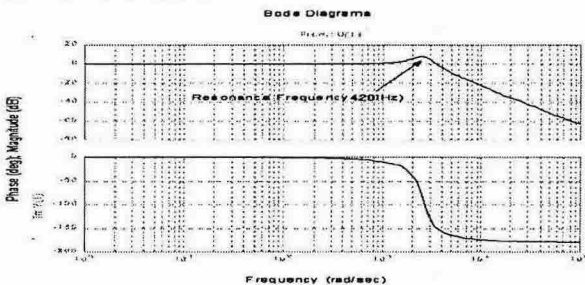


그림 2 출력필터의 주파수 응답

그러나 이와 같은 설계기법은 ①공진임피던스의 정확한 동조 ②시스템의 오픈루프 이득 문제 ③전원과의 공진문제 등으로 인하여 LC수동필터만을 이용한 고조파전류의 흡수에는 한계가 있으며, 위의 문제를 해결할 수 있는 보다 능동적인 DVR 인버터의 필터설계 기법이 요구된다.

2.2 해석적 방법에 의한 LC필터 설계기법

DVR 시스템에서의 LC필터의 부착은 위에서 지적하였듯이 많은 문제점을 내포하기 때문에 설계에 많은 어려움이 있다. 특히 UPS나 범용인버터의 LC필터와는 달리 DVR인버터는 전원소스와 직렬로 연결되어 있기 때문에 전원소스의 임피던스를 고려해야 하고, 인버터의 출력전압과 LC필터의 출력전압에 대한 위상차 및 용량설정을 다양하게 고려해야 하는데, 이러한 조건을 고려한 DVR인버터의 LC필터 설계기법을 2002년 하반기에 싱가포르의 S. S. Choi[2]가 DVR인버터의 해석적 기법에 의한 LC필터의 설계기법을 새롭게 제안하였다.

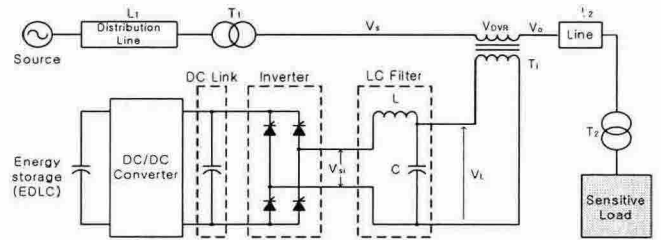


그림 3 배전계통에서의 전형적인 DVR과 LC필터

이는 그림 3과 같은 배전계통에서의 전원 임피던스를 고려한 등가회로를 그림 4에 나타내었으며, 이때의 LC필터의 설계과정은 다음의 과정을 거친다.

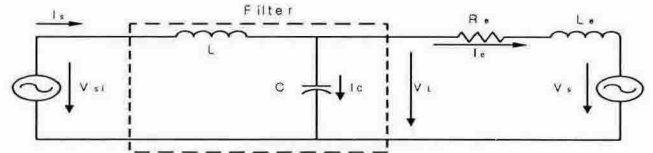


그림 4 배전계통에서의 DVR과 LC필터 등가회로

그림 4에서 V_{si} 는 DC/AC 인버터의 출력전압을 나타내고 고조파의 소스로 간주한다. V_L 은 인버터를 거친 LC필터의 출력전압을 나타내며 고조파성분을 감소시킨 전압이다. 위와 같은 V_{si} 와 V_L 의 전압관계에 대한 종합 기능을 DVR이 담당하며 DVR 전체의 보상전압을 V_{DVR} 이라 정한다. LC필터의 출력에 인터페이스 되는 V_S 는 전력계통상에서의 등가전원을 나타내고, DVR의 부의 등가임피던스로서 이는 $Z_e = R_e + j\omega L_e$ 나타낸다. V_0 는 민감부하의 보상된 전압을 나타낸다. 또한, 그림 5는 LC필터 설계를 위하여 중첩의 원리를 적용한 그림 4의 등가회로를 나타낸 것이다.

그림 4와 같은 회로에서 LC설계의 근본원리는 인버터 소스(V_{si})에서 발생하는 고조파를 위하여 분로(shunt path)를 제공함과 동시에 고조파전압이 운반되도록 직렬 임피던스를 제공하는 것이다. 이 때문에 필터 커패시터는 다음의 조건식 식 (4)에 맞도록 선택되어야 한다.

$$|Z_{e(m)}| = K_f |Z_{c(m)}|, \quad K_f \gg 1 \quad (4)$$

여기서, $|Z_{c(m)}| = -j/(m\omega_0 C)$, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 는 기본주파수이고, m은 감쇠시키고자 하는 가장 낮은 차수의 고조파이다.

또한, 그림 5(a)로부터 인버터에서의 고조파 전압 및 LC필터의 부하측의 n차 고조파 전압을 각각 $V_{si}(n)$ 과 $V_L(n)$ 으로 놓는다. 여기서, $n=m, m+1, m+2, \dots, M$ 이고, M 은 감쇠시키고자 하는 가장 높은 고조파의 차수이다.

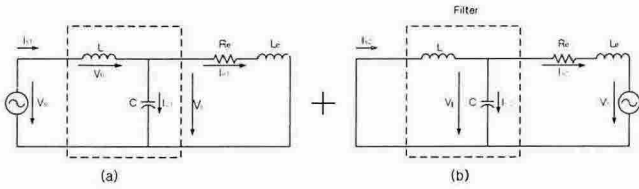


그림 5 LC필터 설계를 위한 등가회로

그림 4와 식 (4)의 관계로부터 $Z_e | Z_c \cong Z_c$ 이라 할 수 있으므로 필터 출력전압과 인버터 출력전압의 관계는 식 (5)로 표현 가능하며, n차 고조파를 고려한 전압 관계는 식 (6)과 같다.

$$V_L = \frac{1/j\omega C}{j\omega L + 1/j\omega C} V_{si} = \frac{1}{\omega^2 LC - 1} V_{si} \quad (5)$$

$$V_{L(n)} = \frac{1}{(n\omega_0)^2 LC - 1} V_{si(n)} = K(n) V_{si(n)} \quad (6)$$

식(6)의 관계로부터 $K_{(n)} = 1/((n\omega_0)^2 LC - 1)$ 로 쓸 수 있고, 이 식을 정리하면 LC필터의 적당한 값 L을 선정할 수 있다. 식 (4)으로부터 Z_e 는 주어지고 C 는 K_f 에 직접적으로 비례하므로 K_f 의 적당한 값을 구하면 C 의 값을 구할 수 있다. K_f 의 적당한 값으로부터 C 를 구하고 식 (6)에 의해서 $K_{(n)}$ 이 결정되면 L 을 구할 수 있다. 그러므로 K_f 와 $K_{(n)}$ 의 결정이 설계에서 매우 중요하며, 결국 LC값의 선정은 이들 값의 설정이라 할 수 있다.

그러나 LC 필터의 근본적 목적은 고조파 성분의 억제이기 때문에 IEEE Std. 519-1992에서 제시된 THD=5.0[%]이하의 목표치의 도달조건으로 파라미터를 선정하는 방법을 택해야 한다. 이러한 선정은 결국 K_f 와 $K_{(n)}$ 의 결정인데 이의 과정은 매우 복잡하고 어려우며, 까다로운 과정을 거치게 된다.

이러한 번거로운 과정을 피하기 위하여 참고문헌 [2]에서의 부록에서는 그림 5의 회로를 통하여 다음 식 (7)~ 식 (12)의 과정을 거쳐서, 결국에는 식 (13)과 식 (14)을 이용하여 간단히 LC값을 선정하도록 제안하였다.

$$Z_{Le(1)} = R_e + j\omega_0 L_e = |Z_{Le(1)}|(\cos \phi + j \sin \phi) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \phi = \arctan\left(\frac{\omega_0 L_e}{R_e}\right)$$

$$Z_{Le(m)} = R_e + jm\omega_0 L_e = |Z_{Le(m)}|(\cos \phi + jm \sin \phi) \quad (8)$$

$$|Z_{c(1)}| = m |Z_{c(m)}| \quad (9)$$

$$K_f = \frac{|Z_{Le(m)}|}{|Z_{c(m)}|} \quad (10)$$

$$|Z_{Le(1)}| = \frac{|Z_{Le(m)}|}{\sqrt{\cos^2 \phi + (m \sin \phi)^2}} \quad (11)$$

$$Z_{Le(1)} = \frac{|Z_{Le(m)}|(\cos \phi + j \sin \phi)}{\sqrt{\cos^2 \phi + (m \sin \phi)^2}} \quad (12)$$

$$C = \frac{K_f}{|Z_{Le(m)}| m \omega_0} \quad (13)$$

$$L = \frac{1 + \frac{1}{K_{(m)}} |Z_{Le(m)}|}{m \omega_0 K_f} \quad (14)$$

식 (14)에서 $K_{(m)}$ 은 식 (15)로 구하고, 식 (15)의 V_T 는 식 (16)의 식으로 구한다.

$$K_{(m)} \leq \frac{V_T}{\sqrt{\sum_{n=m}^M \left(\left(\frac{m}{n}\right)^2 \cdot V_{Si(n)}\right)^2}} \quad (15)$$

$$V_T = \frac{K_{THD} V_p}{K_i} \quad (16)$$

여기에서, V_T 는 주입 직렬변압기 2차측 양단의 허용 가능 전(total) 고조파의 전압을 나타낸다. 또한 K_i 는 주입 직렬변압기의 권수비, V_p 는 1차측 선로의 정격 전압을 K_{THD} 는 허용가능한 THD의 전압레벨을 나타낸다.

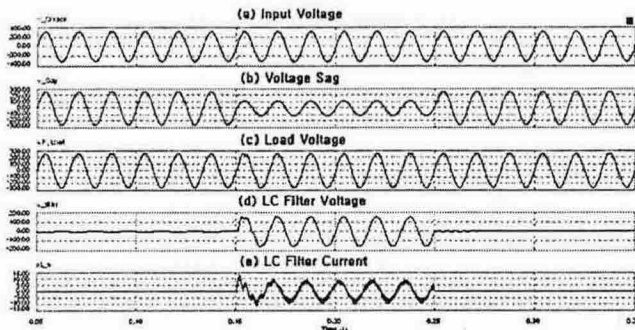
따라서 본 논문에서는 다음과 같은 가정 하에서 LC 필터의 파라미터를 선정할 수 있으며 다음의 과정을 거친다.

22.9[kV]의 배전계통에서 변압기(T_1)의 용량이 약 100[MVA]라고 하고, DVR 입력측의 선로 임피던스를 $R=0.147[\Omega]$, $L=0.0195[H]$ 로 선정한다. 인버터는 10[kVA], 10[kHz]로 정하고, 고조파 제거를 37차의 고조파까지만 고려하고, V_{dc} 는 $220\sqrt{2}$ 로 한다. K_f 를 500으로 설정하면 $C=135[\mu f]$ 으로 선정된다. V_T 를 결정하기 위해서 주입 직렬변압기 2차측의 전압 RMS 220[V]에 대하여 THD 5[%]를 허용전압레벨로 정의하여 11[V]로 한다. $V_{si(n)}=279[V]$ 로 정하면 $K_{(m)}$ 은 0.0394로 된다. 그러므로 $L=1[mH]$ 로 구할 수 있다.

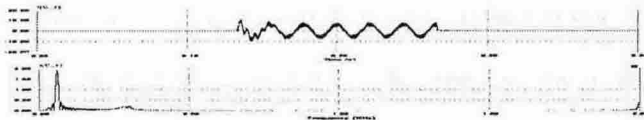
4. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

본 논문에서는 그림 3과 같이 시스템을 구성한 후 제시된 필터설계 기법의 타당성을 확인하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 이의 결과를 그림 6부터 그림 9까지 각각 나타내었다. 그림 6과 그림 7은 단상 DVR인버터의 동작에 따른 (a)입력전압, 전압Sag, 보상 부하전압, LC필터 전압, LC필터 전류 (b) LC필터 전류

의 FFT 스펙트럼을 각각 나타낸 것이다. 그림 6에서는 5차 이하의 고조파가 제거되도록 공진주파수를 300[Hz]로 정하여 $C=100[\mu\text{F}]$, $L=3.1[\text{mH}]$ 로 하였다. 또한 그림 7에서는 7차 이하의 고조파가 제거되도록 공진주파수를 420[Hz]로 정하여 $C=150[\mu\text{F}]$, $L=1[\text{mH}]$ 로 선정한 시뮬레이션 결과이다.

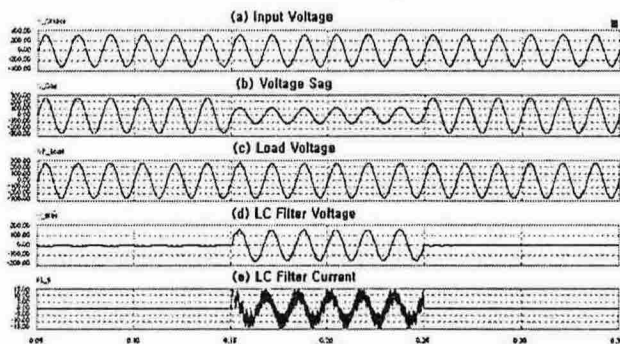


(a) DVR의 모의실험 동작($f_n=300\text{Hz}$)

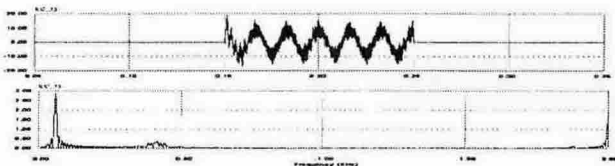


(b) DVR인버터의 LC필터 전류와 FFT($f_n = 300[\text{Hz}]$)

그림 6 단상 DVR시스템의 모의 동작실험($f_n=300[\text{Hz}]$)



(a) DVR의 모의실험 동작 ($f_n=420\text{Hz}$)



(b) DVR인버터의 LC필터 전류와 FFT($f_n = 420[\text{Hz}]$)

그림 7 단상 DVR시스템의 모의 동작실험($f_n=420[\text{Hz}]$)

그림 8은 DVR의 동작확인용을 위한 전압 Sag에 대한 보상전압, 전류의 파형이며, 그림 9는 DVR의 부하전압 즉 민감부하의 보상 전압과 LC필터부의 부하전류(LC필터의 C측에서의 전류)를 각각 나타내고 있다.

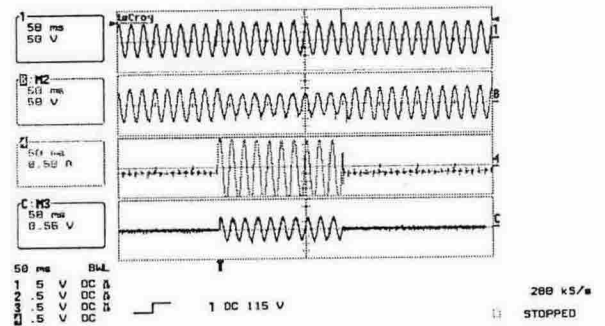


그림 8 DVR의 전압 Sag와 보상 전압/전류

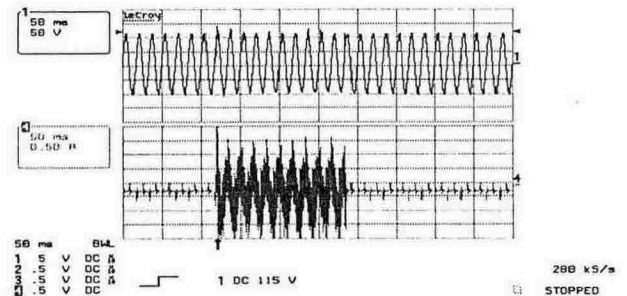


그림 9 DVR의 보상전압과 전류(Capacitor필터전류)

5. 결론

본 연구에서는 DVR시스템에서 기존에 주로 사용되었던 공진주파수에 의한 LC필터의 선정기법에 대한 문제점을 분석하고, 배전계통의 임피던스 및 THD, DC Link 전압 및 출력전압에 대한 위상차 등을 고려한 새로운 LC필터 선정기법을 제시하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 이의 타당성을 검토하였다.

이 논문은 산업자원부의 '전력산업연구개발사업'(R-2004-0-033)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] D. Mahinda Vilathgamuwa *et al*, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans., POWER DELIVERY, Vol.18, NO.3, pp.928-936, July 2003.
- [2] S. S. Choi, B. H. Li and D. M. Vilathgamuwa, " Design and Analysis of the Inverter-Side Filter Used in the Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, pp. 857-864 July 2002.
- [3] F. Z. Peng and G. J. Su, " A Series LC Filter for Harmonic Compensation of AC Drives", IEEE/PESC, Charleston, SC, pp., 324-360, 1999.