

## SMPS 전원 필터 설계 KNOW HOW

### 1. 개요

EMC 에서 SMPS 회로 구조를 이해하고 여기에 맞는 전원필터 설계 방법에 대해 공부하는 것은 가장 기본적인 것이다. 전원용 필터는 그림 1 에서 보는 바와 같이 인덕터와 컨덴서로 구성된 저역 통과 필터이다. 인덕터는 동상제거용 CM 인덕터가 있고, 차동 제거용으로 NM 인덕터가 사용되는데 가장 중요한 것은 코어 내 자성재료 선택이 중요하다. 컨덴서는 CM(Y capacitor)용과 NM(X-Capacitor)용이 있는데 CM 용의 경우, 누설 전류값의 한계로 472 이상은 사용하지 않고, NM 의 용량은 거의 제한이 없다. 필터회로 설계에 있어 또 다른 중요한 요소는 주파수 특성에 맞는 자성재료 선택과 150kHz 미만(전원필터 유효 차단 주파수 이하), 20MHz 이상(전원필터 유효 차단 주파수 이상)에 적합한 필터를 설계하는 기술이 핵심이다.

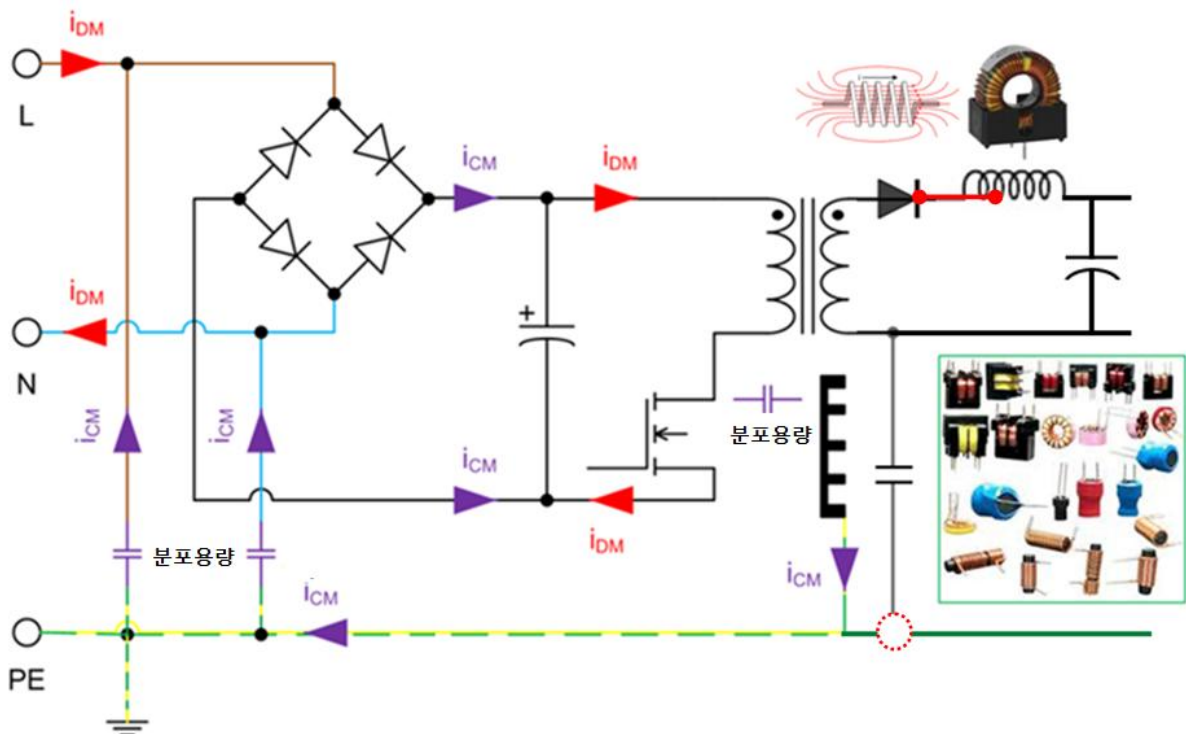


그림 1. 일반적인 스위칭 전원 회로의 EMC 발생과 결합

## 2. SMPS 전원에서 MOSFET 와 방열판간 분포용량에 의한 동상잡음

그림 1 은 스위칭 전원에서 MOSFET-방열판간 분포용량에 의한 동상잡음 발생 경로를 나타내 주고 있으며, L-H 간 차동 모드 잡음전압/전류의 발생은  $C_y$  측 분포용량의 임피던스 차이, CM 코일의 불평형에 의해 차동잡음 전류  $i_{DM}$  이 발생된다.

스위칭 능동전류( $i_{DM}$ )는 차동모드 전도 잡음을 일으키는 스위칭 레귤레이터의 스위칭 주파수와 그 하모닉과 스퓨리어스 신호가 전원 입력측으로 흐른다. MOSFET 와 같은 반도체 소자의 빠른 스위칭의 주파수로 인해 분포용량, 분포 인덕턴스에 의해 고주파 신호가 발생된다. 원리상, 차동모드 전류는 전원 "L"에서 정류 브리지를 거쳐, 스위칭 트랜스 1 차 권선, MOSFET 와 중성 도체 "N"을 거쳐 되돌아 오는 루프를 가지고 있다. MOSFET 는 냉각용 방열판에 설치되어 있고 이 방열판은 접지도체 "PE"에 접속되어 있다. 여기에서 방열판과 MOSFET 의 드레인 간의 용량성 결합이 발생하여 동상모드 전도 잡음이 발생한다. 용량성 결합에 의한 동상모드 전류 " $i_{CM}$ "은 전원접지 "PE"를 따라 흘러 SMPS 의 입력단으로 되돌아 온다. 부하측에서 발생된 " $i_{CM}$ " 은 전원 "L" 뿐만 아니라 중성선로 "N"에도 기생용량에 의해 동상으로 발생 전파된다. 동상모드 전류 " $i_{CM}$ "은 그림 1 에 보인 표시한 바와 같이 정류 브리지에서 MOSFET 를 거쳐 주전원상에 퍼져 나가는 방향으로 흐르며 그 크기와 위상이 같아 동상잡음이라 부른다.

## 3. 예상되는 전도잡음 주파수 스펙트럼

정류된 전압은 드레인-소스부에 인가되며, 최대전압은 다음과 같이 구해진다.

$$V_p = 230V \cdot \sqrt{2} = 325V \quad (E-1)$$

한 예로, 100 kHz 스위칭 주파수를 가진 SMPS 를 사용한다면, 이 펄스 주파수에 대한 타이밍 신호는 주기  $T = 10 \mu s$  이고 펄스 폭은  $2 \mu s$  이다. 해석을 위해 듀티 사이클을 먼저 결정해야 한다.

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{2\mu s}{10\mu s} = 0.2 \quad (E-2)$$

브리지 정류회로를 통과한 전류 파형이 사다리꼴이라고 가정하면, 전원 필터 없는 상태에서 상세한 푸리에 변환 스펙트럼 분포 기울기 곡선 [민경찬의 전자파 환경공학 2 장 78 쪽] 으로부터 불요 전자파 스펙트럼을 대략 계산 할 수 있다. 우선 전체 스펙트럼 진폭 변화에서 첫째 코너 지점을 다음과 같이 구한다.

$$n_{co1} = \frac{1}{\pi \cdot D} = \frac{1}{\pi \times 0.2} = 1.592 \quad (\text{E-3})$$

전체 스펙트럼 진폭변화 기울기 곡선 첫 번째 코너 주파수는 다음과 같다.

$$f_{co1} = n_{co1} \cdot f_{CLK} = 1.592 \times 100kHz = 159.2kHz \quad (\text{E-4})$$

이번에는 첫 번째 고조파의 진폭을 다음과 같이 구 할 수 있다.

$$C_1 = \frac{2 \cdot V_p}{n_{co1} \cdot \pi} = \frac{2 \times 325V}{1.592\pi} = 130V \quad (\text{E-5})$$

SMPS 와 접지간 기생 결합용량이 20 pF 이라고 가정하면 첫 번째 고조파의 동상모드 전류는 다음과 같이 구해진다.

$$I_{cm1} = \frac{2\pi \cdot f_{co1} \cdot C_p \cdot C_1}{\sqrt{(50\pi \cdot f_{co1} \cdot C_p)^2 + 1}} = \frac{2\pi \cdot 159.2kHz \cdot 20pF \cdot 130V}{\sqrt{(50\pi \cdot 159.2kHz \cdot 20pF)^2 + 1}} = 2.6mA \quad [\text{E-6}]$$

전도 잡음전압은 LISN (전원임피던스 안정화 회로망)과 EMC 테스트 리시버를 이용하여 측정할 수 있다. EMC 테스트 리시버의 입력 임피던스 50 Ω과, LISN 의 출력 임피던스 50 Ω이 병렬로 접속되어 있기 때문에, 25 Ω이 임피던스 "Z"가 된다. 동상 전도 잡음전압 값 "V<sub>cm</sub>" 은 다음 식으로 계산된다.

$$V_{cm} = Z \cdot I_{cm1} = 25\Omega \cdot 2.6mA = 0.065V \quad (\text{E-7})$$

이것을 dBμV 단위로 환산하면 ;

$$V_{dB\mu V} = 20 \log \left( \frac{0.065V}{1\mu V} \right) = 96.26 \text{ dB}\mu V \quad (\text{E-8})$$

위 계산결과에 따르면 매우 높은 전도 잡음방사를 예상할 수 있다. 제품 관련 표준 EN 55022 에 따른 전도 잡음 한계값은 주파수 범위 0.15 MHz 에서 0.5 MHz

까지 허용할 수 있는 최대 전도 잡음 레벨로 66 dB $\mu$ V 에서 56 dB $\mu$ V 이다. 그림 2 는 전원 필터를 설치하기 전의 SMPS 전도성 잡음전압의 측정 결과를 보여준다. 이 측정 결과값을 보면 규격을 만족시키기 위해서 전원 필터가 필수적임을 알 수 있다.

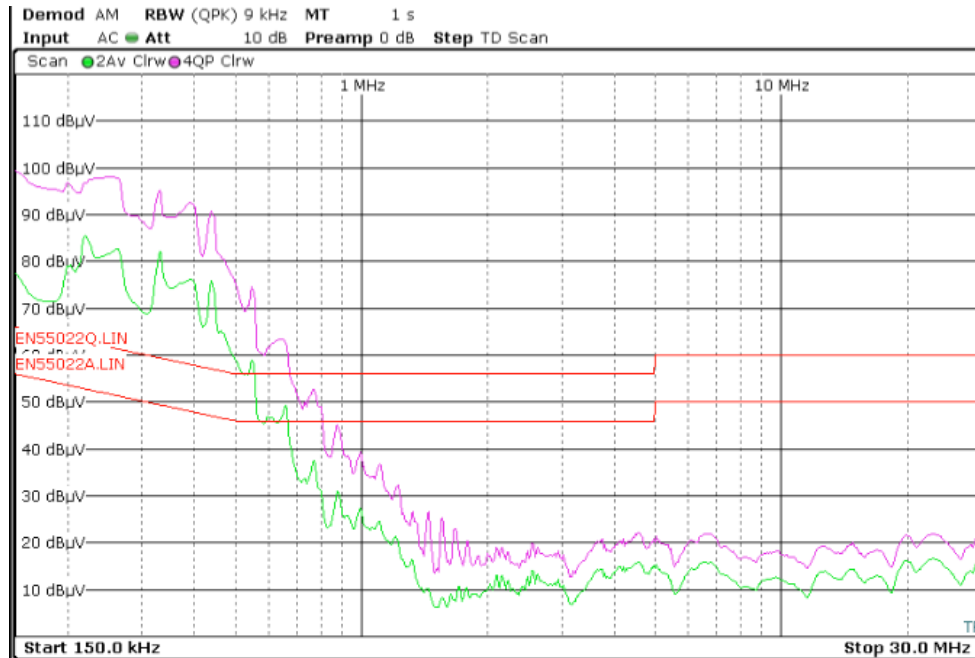


그림.2 전원 필터가 없을 때 SMPS 의 전도잡음 전압

#### 4. 전원 필터설계

그림 3 은 간단한 단상 전원 필터 회로도를 나타낸 것이다. 동상 코일은 기하학적으로 두 개의 양쪽으로 분리된 권선 구조이며 주로, Ni 계열 또는 MnZn 계열 EI 코어, 트로이달 코어를 사용하고 있다. 그림 3 의 동상 코일은 같은 양의 전류가 같은 방향으로 흐를 때 서로 상쇄되는 구조를 하고 있다.

동상 코일의 권선방법은 1 층 권선방식, 인덕턴스 값을 높이기 위한 다층 권선 방법이 있다. 낮은 주파수에서는 다층권선 방식을, 높은 주파수 대역을 제거하기 위해서는 권선 층간 분포용량이 낮은 1 층 권선방식을 사용한다. 동상 코일은 트로이달 코어를 사용하는 방법, 그림 3 과 같이 EI 코어를 분할감기 하여 사용하는 방법이 있는데, 전자의 경우 누설자속이 없어 주변회로에 유도되는 것을 방지할 수 있는 반면 코어 직경에 한계가 있고 권선하는데 어려움이 많다. 반면에 EI 코어를 사용하는 경우 높은 인덕턴스를 얻을 수 있으며, 분할감기를

하여 분포용량도 낮출 수 있고 자동화 권선이 가능하다. 또한 EI 코어 특성상 물리적으로 Air gap 을 만들 수 있어 dc 중첩 시 포화될 우려도 없다.

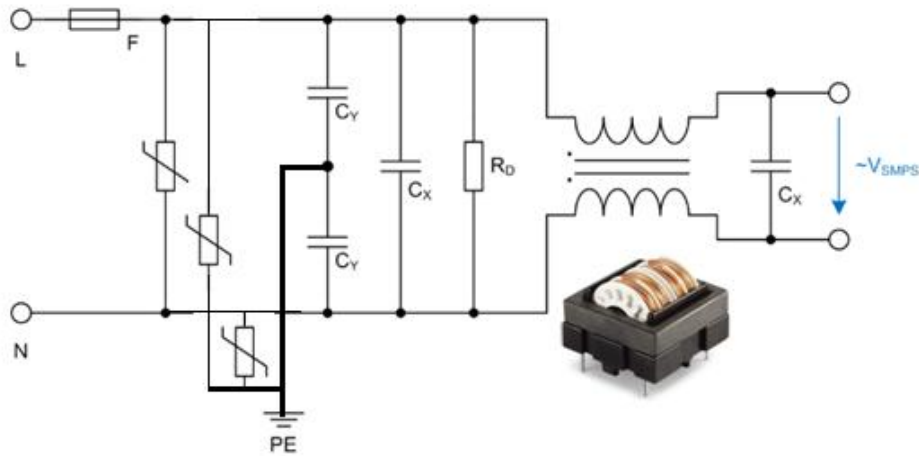


그림 3. 간단한 단상용 전원필터 회로 구성 예

그림 4 는 MnZn 계 EI 코어에 분할 감기 한 39 mH 인덕턴스를 가진 동상 코일로 50 Ω 계통에서 감쇠 특성 곡선 보여주고 있는데, 비록 분할감기로 되어 있어도 권선간 분포용량에 의해 약 120kHz 근처에서 공진이 일어나는 것을 알 수 있다.

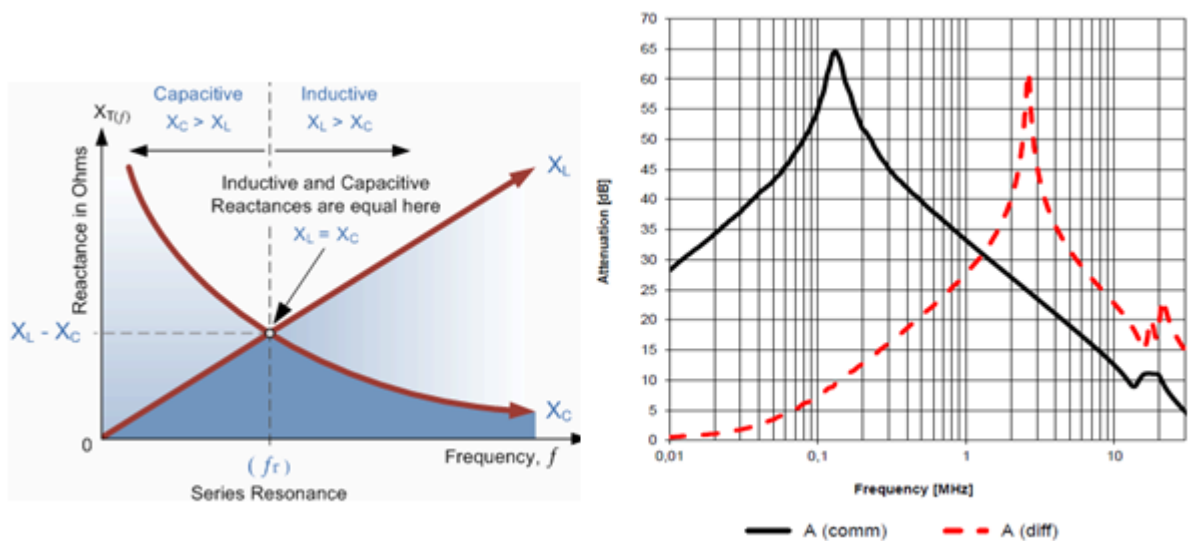


그림 4. MnZn 코어에 39 mH 인덕턴스를 갖는 CM 코일 감쇠특성 곡선

그림 4 에서 동상모드(검은 선)와 차동모드(붉은 점선) 감쇠특성은 뚜렷한 차이를 보인다. 동상 모드에서는 120 kHz 에서 최대 감쇠량을 가진다. 그러나 주파수가

높아지면 인덕터 권선간 분포용량 때문에 감쇠량은 떨어진다. 전원 필터는 30 MHz 까지 전도 잡음을 억제해야 하기 때문에 추가로 X/Y 컨덴서들이 필요하다.

차동모드 잡음을 SMPS 로부터 제거하기 위해서 X 컨덴서를 전원 필터의 앞 단과 뒤 단에 한개 씩 설치한다. 한 예로 두개의 330 pF 값을 동상코일 양단에 X 컨덴서로 삽입하면 SRF 는 약 2 MHz 이다. 일반적으로 X 컨덴서는 0.1uF 을 가장 많이 사용하며, 용량의 크면 낮은 주파수 잡음 감쇠량이 우수하다.

안전상 이유로, 680k-1MΩ 저항 하나를 X 컨덴서와 병렬로 부착해야 하는데, 이는 SMPS 전원이 꺼질 때 컨덴서에 충전된 전하를 방전시키기 위한 목적으로 사용된다. 3 개의 바리스터를 전원 필터 앞 단과 Cy 단에 설치 할 수 있는데 이는 전원입력단에 순시 과전압이 인가되면 단락회로를 만들어 주는 역할을 한다.

또한 퓨즈와 같은 과부하 보호장치도 부착 하는데 이 부품은 항상 바리스터 앞 단에 설치한다. 퓨즈는 바리스터의 성능저하로 절연이 불량하게 되면 단선 상태가 되는데 이때 회로를 차단하는 역할을 한다. 동상모드 전도 잡음량을 더 낮추기 위해서는 Y 컨덴서가 필요하다. Y 컨덴서와 동상코일은 접지에 대해 정확하게 대칭을 이루기 때문에 저역 통과필터로 동작되며 이때 공진 주파수는 다음 식으로 표현 된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}} \quad (E-9)$$

허용 전도 잡음레벨을 150 kHz 에서 56 dBμV 이하 레벨로 낮추려면 식 (E-8) 계산결과와 한계값의 차 (92.26dBuV-56dBuV=32.26dBuV) 약 40 dB 감쇠량이 요구된다. 스위칭 주파수가 100kHz 이므로 주어진 인덕턴스 39mH 에서 동상 컨덴서 용량을 구해보자.

$$C_Y = \frac{1}{(2\pi*\frac{f_{CLK}}{10})^2*L_{cm}} = \frac{1}{(2\pi*\frac{100kHz}{10})^2*39mH} = 6.5nF \quad (E-10)$$

두 개의 Y 컨덴서가 필요하므로 계산값의 1/2 정도에서 결정한다. Y 컨덴서들은 SMPS 에서 접지측으로 동상 잡음 전류를 바이패스 시킨다. Y 컨덴서의 경우 누설 전류 제한이 있으므로 0.24 mA 에서 ≤3.5 mA 까지만 누설전류를 허용한다면 4.7 nF 이상의 용량은 필요 하지 않으므로 2.2 nF 의 C<sub>1,2</sub> Y 컨덴서를 선정한다.

그림 5 에 Y 컨덴서까지 삽입한 전원 필터 부착한 후 개선된 측정 결과값을 나타낸다.

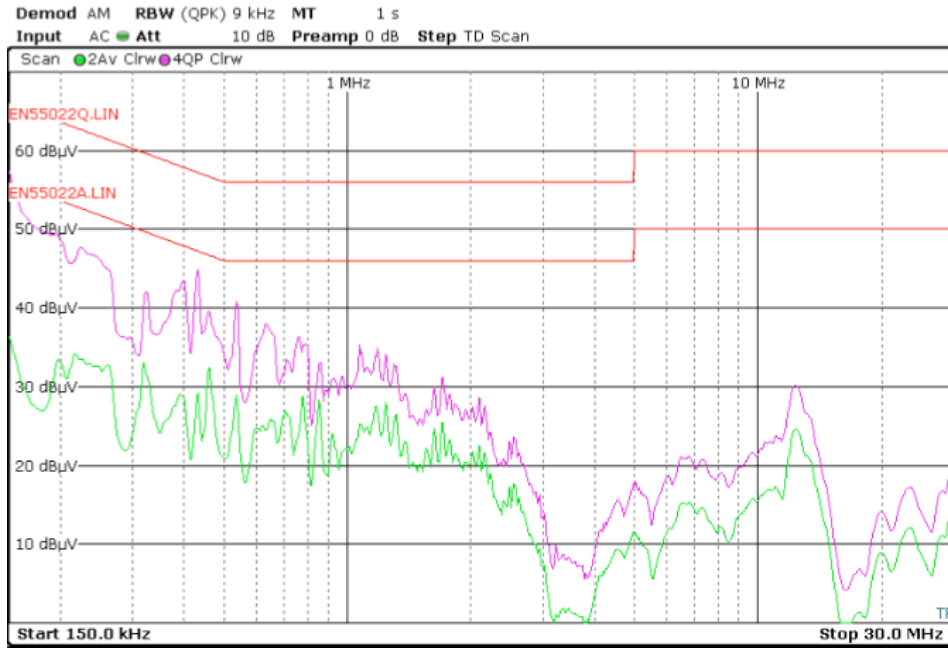


그림 5: 전원 필터 부착 시 전도 잡음 측정값

측정결과 전원 입력단에 설계된 전원필터를 부착하여 규격상 정해진 한계값을 만족시킬 수 있었다. 주파수 150 kHz 에서의 전도 잡음 한계치는 준 첨두/평균 값(Quasi peak/ Average)으로 규정하고 있는바 이들 간의 차이는 약 10 dB 정도로 주파수에 따라 차이가 있다. 그림에서 제한 곡선 위 것 Q 는 준 첨두치 한계값, A 는 평균치 한계값이다.

## 5. 전원 필터의 최적화

만일 스위칭 전원에 실제 부하가 연결되면 낮은 주파수 대역에서 전도 잡음 발생량이 증가할 수 있다. 이를 위해 두 개의 X 컨덴서를 1.5  $\mu\text{F}$  로 교체하면 그림 6 과 같이 150kHz 대역 및 그 이하에서도 이상적인 감쇠특성을 얻을 수 있는 최적화된 전원 필터 회로를 구현 할 수 있다.

150kHz 낮은 주파수 대역에서  $C_x$  컨덴서 용량을 크게 하면 약 15 dB 정도의 전도 잡음전압 특성이 개선된다. X 컨덴서 즉,  $C_x$  는 SCR 로 위상 제어하는 회로에서 많이 발생되는 낮은 주파수 대역 제거에 뛰어난 성능을 발휘한다. 특히 **군용기기의 CE 101 대책**에 있어  $C_x$  를 잘 활용하면 좋은 특성을 얻을 수 있다.

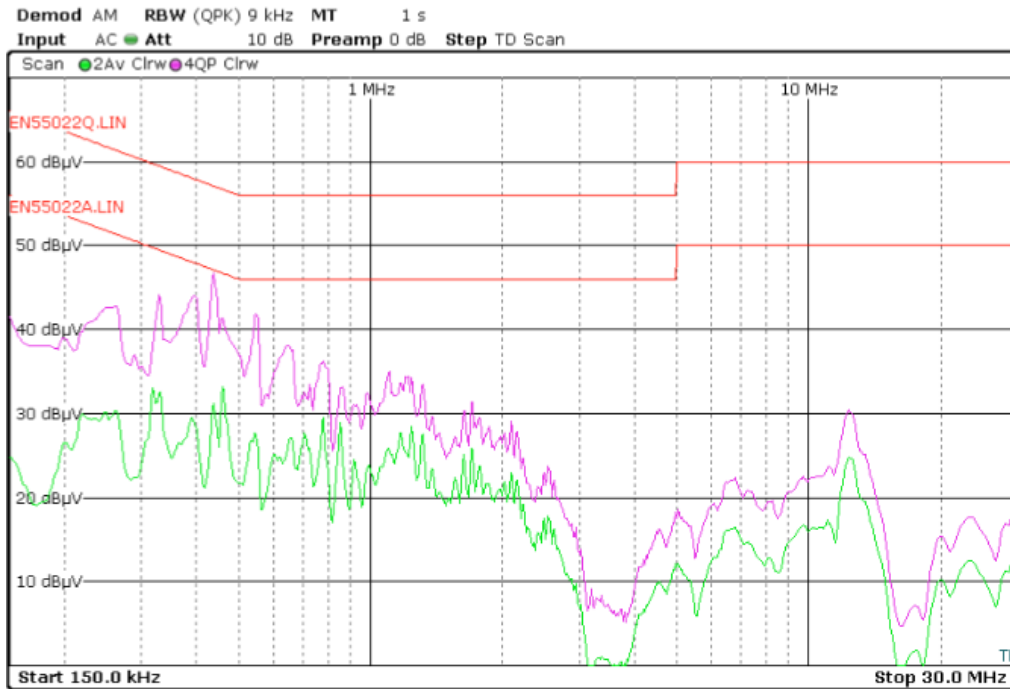


그림 6. 최적화 전원 필터 부착 시 전도잡음 전압

이는 낮은 주파수 대역에서 동상잡음이 차동잡음으로 모드 변환이 많이 일어난다는 의미를 갖고 있다. 실제 필터회로를 설계하다 보면 NM 코일과 NM 제거용  $C_x$  가 차동 잡음 제거 즉, Hot - Neu.간에 나타나는 잡음을 개선하기 위한 부품인데 왜 동상잡음 개선효과가 나타날까? 라는 의문을 EMC 분야를 조금 공부한 사람들은 이미 깨우쳐야 할 것이다. 전원용 필터 설계 최적화는 부품의 실장밀도 개선, 원가, 작업성, 전기적 안전성 그리고 필터의 전기적 감쇠특성 등을 적절하게 만족시키는 LC 정수를 찾는 것을 말한다,

## 6. 컨덴서만으로 필터회로 구성이 가능한가?

전원 필터 설계 시 가장 중요한 것은 소스와 부하 임피던스를 먼저 머리 속에 예측하고 그려야 한다. 전원단자 소스 측 규격화 임피던스는  $50\Omega$ 이라고 가정하고 스위칭 전원의 부하는 배터리 충전용에 사용된다면 용량성이 되고, dc 모터를 구동한다면 유도성이 된다. 소스와 부하가 유도성이라면 컨덴서만으로 필터 회로 구성이 가능하다.

그러나 대부분 회로에서 소스와 부하 임피던스를 정확히 추정해 내기는 쉽지 않다. 따라서 전원필터는 동상 코일, 차동 코일 그리고 X,Y 컨덴서로 구성되는 것이



다. 앞서 설명한 바와 같이  $C_x$ 의 용량값은 제한이 없으나  $C_y$  용량값은 전기 안전상 누설전류 제한이 있기 때문에 472 이상은 사용할 수 없다. 만일 동상 코일을 사용하지 않고 컨덴서만으로 필터회로를 구성하면 다음 그림 7과 같은 필터 특성이 측정된다.

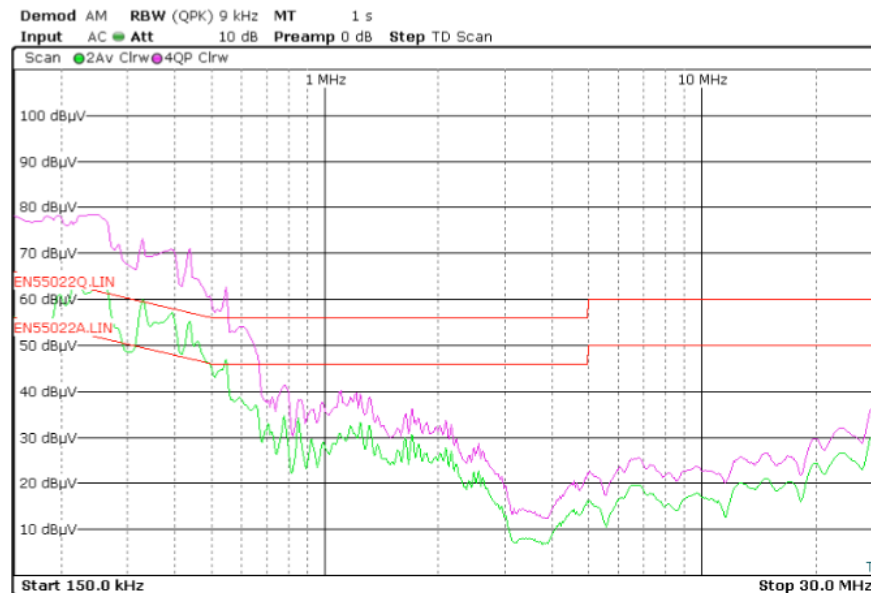


그림 7. 동상 코일이 없는 전원 필터 구성 시 전도 전도 잡음 전압

예상한 것처럼, 낮은 주파수 대역에서 전도 잡음 방사량은 동상 코일이 없을 때 상당히 증가한다. 200 kHz에서 최대값은 약 78 dBμV을 나타내고, 평균값은 60 dBμV을 보인다. 최대값과 평균값 모두 600 kHz까지 허용 전도 잡음레벨을 초과하고 있어 동상 코일이 없는 전원 필터는 적절하지 않다.

## 7. 동상 코일, NM 의 기능

X 컨덴서만을 필터에 삽입하여 차동 모드 잡음을 충분히 제거할 수 없는 경우 동상 NM 코일 2 개를 Hot, Neu 선 2 선에 직렬로 삽입한다. 그림 8 의 박스가 NM 코일을 삽입한 예이다.

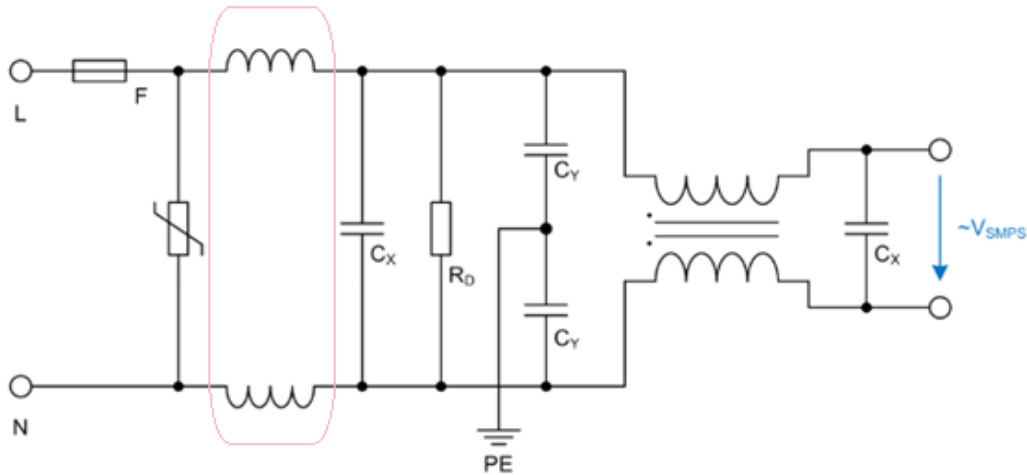


그림 8 : 차동 코일 NM 을 추가한 전원 필터

차동 코일 값을 계산할 때 다시 "툽슨" 발진 방정식을 사용한다. 각 코일이 40 dB/decade 의 감쇠량을 요구하면 스위칭 주파수의 1/10 인 코너 주파수를 기준으로 Cx 컨덴서를 330nF 사용시 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{DM} = \frac{1}{(2\pi \frac{f_{clk}}{10})^2 * C_x} = \frac{1}{(2\pi \frac{100kHz}{10})^2 * 330nF} = 767\mu H \quad (E-11)$$

위 식(11)에서 구해진 인덕턴스 값은 부하에 대해 Hot-Neu. 간에 2 개를 직렬로 사용하므로 1/2 하여 비슷한 인덕턴스를 갖는 NM 차동 코일 값으로 기성품 중에서 470  $\mu$ H 를 선택하여 사용하였다. 차동 코일의 선택 시 유의해야 할 것은 코어의 절연도는 크게 문제 되지 않으나, 전선의 굵기가 최대 사용전류에 따라 충분한 굵기를 사용해야 하며, 코어 재질로는 Ni, Mn 계 페라이트 보다 철 분말 코어를 사용한다. 철 분말 코어의 장점은 dc 가 중첩되어도 철 분말을 압착시킨 재료이기 때문에 코어 자체가 에어 갭을 가지고 있어 포화되지 않는 특징을 가지고 있다.

## 8. 필터회로 설계 시 임피던스

필터 설계에 있어 중요 한 것이 필터가 사용될 시스템, 부하회로를 먼저 충분하게 이해해야 최적의 필터를 설계 할 수 있다. 일반적인 회로 임피던스 조건은 필터 회로를 중심으로 다음과 같은 5 가지 조건이 있다

- 1)  $Z_S \approx Z_L \approx 50\Omega$  : 이상적인 조건에서 필터 제 정수 선정
- 2)  $Z_S \approx 50\Omega \ll Z_L$  : 유도성 부하로 소스측에 인덕턴스를 삽입하고  $C_y$  를 함께 사용하면 큰 효과를 얻을 수 있음. 페라이트 비드 효과
- 3)  $Z_S \approx 50\Omega \gg Z_L$  : 용량성 부하로 작은  $C_y$  삽입으로 큰 효과 기대. 페라이트 비드 효과 없음
- 4)  $Z_S, Z_L \ll 50\Omega$  : 페라이트 비드 효과 있음. 컨덴서 보다 인덕턴스 삽입으로 큰 효과 기대
- 5)  $Z_S, Z_L \gg 50\Omega$  : 페라이트 비드나 인덕터 삽입보다 컨덴서 삽입으로 큰 감쇠효과 기대

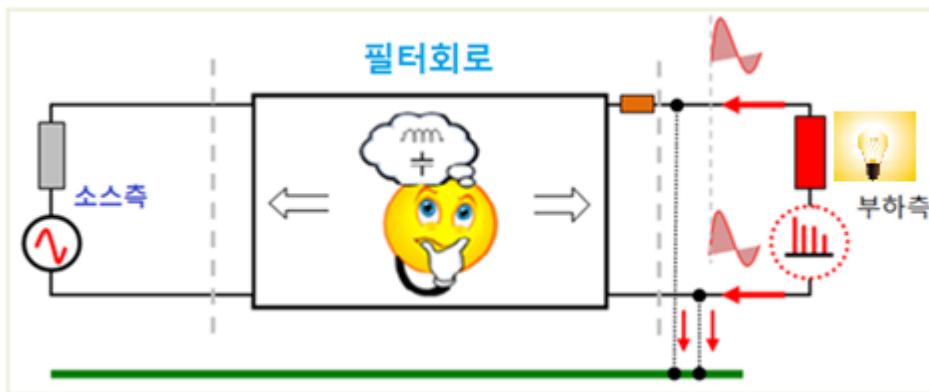


그림 9. 필터 설계 시 임피던스

그림 9 에서 소스 측 즉, 전원 공급 측은  $50\Omega$ 으로 규격화 되어있으나, 부하 측은 어떤 부하가 필터에 연결될지 알 수 없다. 모든 전기.전자 회로에서 잡음은 전원 측에서 60Hz 선형신호만 공급했는데 부하에서 일을 하다 보니 불필요한 여러 주파수 성분의 잡음이 발생하는 것이다. 이때 만들어진 동상잡음 성분이 전원측으로 흐르지 않고 접지측으로 바이패스 시키기 위해서는 필터 측에서

인덕터를 직렬로 삽입하여 임피던스를 높여주고, 접지측으로는 컨덴서를 삽입하여 임피던스를 낮추어 바이패스 시켜야 할 것이다.

결론적으로 필터 설계란 시골 논에 물을 공급할 때와 같이 물꼬를 막고, 터 주는 물리적 현상과 같다. 물꼬를 막는 것은 인덕터이고, 터 주는 것은 컨덴서이다.

따라서 임피던스가 높고 낮음에 따라 인덕터와 컨덴서를 적절하게 조합하여 필터 회로를 구성해 주는 것으로, 인덕터와 컨덴서 자신이 가지고 있는 분포용량, 분포 인덕턴스 (Stray capacitance, Stray Inductance)에 의한 공진특성 그리고 **접촉저항**의 중요성에 대해 충분히 이해하고 필터를 설계하면 이상적인 전원필터가 될 것이다.

다음 그림 10에 R,L,C 수동소자의 고주파 등가회로를 나타내 주고 있다.

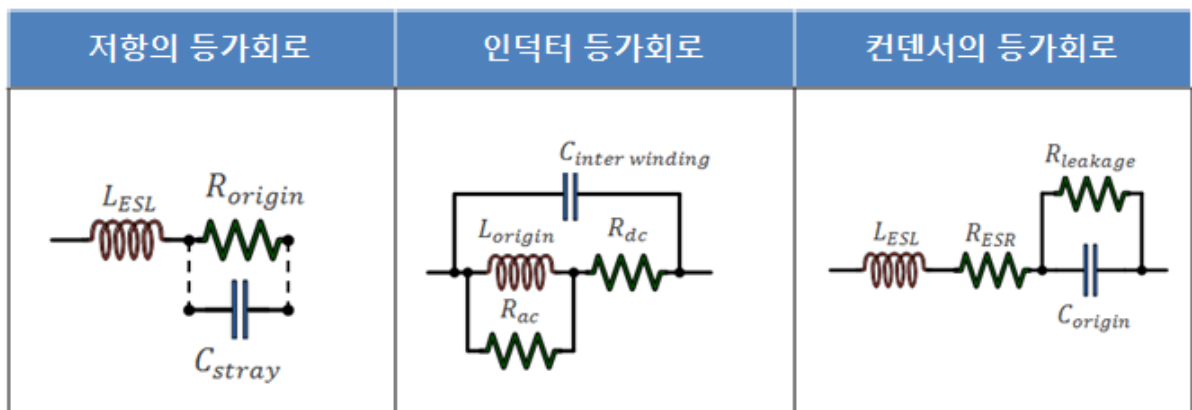



그림 10. R, L, C의 고주파 등가회로

## 9. 전원필터용 주요 부품 선택과 필터 구성에 있어 중요 고려 요소

	부품 명	기능,구성	중요 고려요소
1	전원선 색상	전원필터 연결	- Hot 는 검정(갈색), Neu.은 흰색(청색). <b>궤호 안 유럽</b> - 접지선은 녹색 바탕에 노란색 띠
2	Varistor	순시 과전압 보호	- 경년변화에 따라 부품 성능저하로 절연특성 저하 - 누설전류에 영향을 준다(의료기기용의 경우 주의)
3	Cx	차동 잡음 제거	- 비록 차동잡음 제거용도이나 낮은 주파수 대역에서 잡음성분의 모드변환으로 동상 제거능력 향상 시킴 - 용량제한 없음 - 680k-1MΩ 병렬로 방전저항 삽입 - 절연 내압, UL 등 전기안전 인증 품 사용 - 주로 필름 컨덴서 사용 - SCR 위상제어기기 CM 제거
4	Cy	동상 잡음 제거	- 컨덴서 종류와 재료에 따른 자기 공진주파수 - 누설전류로 용량크기 제한 - 전연 내압, UL 등 전기안전 인증 품 사용 - 주로 세라믹 컨덴서 사용, 220-472 사용
5	CM 코일	티 코어	- 분할감기 방식, 높은 인덕턴스, 낮은 주파수 대역용 - 물리적 에어 갭이 존재하여 포화될 우려 없음
		트로이달 코어	- 인덕턴스 높이는데 한계, 권선에 어려움, 높은 주파수에 사용, 누설 자속이 없음.
		철 분말 코어	- 자체 에어 갭에 의해 SCR 등 dc 중첩특성에 탁월함 - 투자율이 낮아 권선비 대비 인덕턴스 낮음
6	NM 코일	철 분말 코어	- 자체 에어 갭에 의해 SCR 등 dc 중첩특성에 탁월함 - Ni, Mn 재료에 비해 무겁고 인덕턴스 매우 낮음
		드럼 코어 	- Ni, Mn 계통 코어로 인덕턴스는 높으나 100%누설 자속 발생하여 주변회로에 재 유도 시킴 - 금속 케이스로 된 전원단 평할회로에 사용 가능 - 금속 케이스가 아닌 경우 누설 자속에 유의
7	코일	권선용	- CM 코어는 보빈 사용, NM 은 페인트 절연 - PE 는 380vac 이상 3 상 전압에, UE 는 220 Vac 사용 - 코일 자체 동손실이 낮은 재료 선택 할 것