

정류기부하의 수동 고조파필터(Passive Harmonic Filter) 분석 및 설계

조영식*, 김복렬* 구철수*, 차한주**
한국원자력안전기술원*, 충남대학교**

Analysis of a Passive Harmonic Filter for Rectifiers

YoungSik Cho*, BokRyul Kim*, ChulSoo Goo*, HanJu Cha**
Korea Institute of Nuclear Safety*, Chungnam National University**

Abstract - 본 논문에서는 3상 정류기부하에서 주로 발생하는 5차, 7차 등의 저차 고조파를 제거하기 위하여 간단한 구조와 경제성이 있는 Single-tuned Second-order Filter를 설계 하였다. 사례연구는 원자력발전소 무정전전원계통(UPS)의 임의의 한 모선을 대상으로 하였으며 계통을 모델링하여 분석한 결과를 토대로 수동필터를 설계하였다. 설계된 필터는 범용 컴퓨터프로그램인 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과 해당차수의 고조파를 현저하게 감소시키는 양호한 결과를 얻었다.

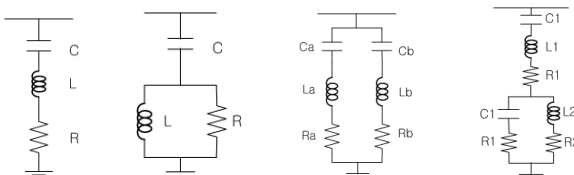
1. 서 론

최근 전력전자 응용기기의 사용증가로 인해 비선형 특정부하에 의한 고조파 발생량이 날로 증가추세에 있으며 고조파로 인해 미치는 영향이 심각한 수준에 이르고 있다. 무엇보다 현대사회는 고도의 산업화에 따라 반도체소자를 이용한 응용기기의 수요증가로 전력품질의 향상이 더욱 절실하게 요구되고 있다. 이러한 전력 품질을 결정하는 주요 인자로 전압 강하, 플리커(Flicker), 순간정전, 서어지(Surge) 등이 있으나 그중에서도 고조파 장애 문제는 전기기기의 수명과 효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 문제이다. 따라서 본 논문에서는 실제 원자력발전소 무정전전원계통(UPS)의 임의의 한 모선을 모델로 삼아 계통을 모델링하여 분석하고 이를 바탕으로 수동필터를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 필터 설치 전·후 상태를 비교함으로써 필터의 성능을 확인하였다.

2. 수동필터(Passive Filter)의 설계

2.1 수동필터의 원리

고조파 필터의 주된 목적은 하나 또는 다수의 고조파 전류·전압을 제거하는데 있다. 특정주파수가 설비나 계통에 유입하는 것을 방지하려는 경우 관련 주파수에 대해 낮은 임피던스 값을 갖는 인덕터(Inductor)와 커패시터(Capacitor)로 구성된 필터를 이용하여 줄일 수 있다. 즉, 수동필터(Passive Filter)는 콘덴서와 리액터소자를 조합하여 특정한 주파수 또는 주파수 영역에서 저 임피던스로 되는 분로를 구성하여 고조파 전류를 흡수하는 것을 말한다. 수동필터는 기본파에 있어서는 무효전력의 공급원, 즉, 진상설비와 같은 기능을 나타내며 일반적인 구성에는 단일동조필터와 고차필터가 있다. 동조필터는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 하나의 고조파 차수에 하나의 공진한 R-L-C 직렬회로 구성, 동조주파수에서 저 저항이 되지만 이 값이 작을수록 필터효과는 크다. 이것은 필터의 기본파 용량을 크게(Z_0 를 작게)하고, 리액터 손실을 작게(Q를 크게)함으로써 달성된다. Q는 양호도 라고하고 Z_0/R 로 표현되지만, Q를 너무 크게 하면, 탈조(계통 주파수의 변동, 콘덴서의 온도특성)의 발생에 의해 필터효과를 저하시키기도 하고 필터의 과부하를 발생시킬 수도 있다. 고차필터는 넓은 주파수 범위에서 저 저항이 되기 때문에 고조파 발생량이 많은 저차 고조파를 대상으로 한 각 차수의 동조필터와 조합하여 고차 고조파전체의 흡수를 분담하도록 구성한다.[3] 리액터와 병렬로 접속한 R의 값이 클수록 공진이 날카롭게 되기 때문에 양호도는 동조필터와 반대의 $Q=R/Z_0$ 로 표현하지만 동조필터의 Q와 구별하여 γ 또는 β 의 기호를 사용하는 경우도 있다. 일반적으로 $Q=20\sim50$ 정도로 선정하고 동조주파수 부근에서 주파수 변화에 따른 영향은 작다.[1]

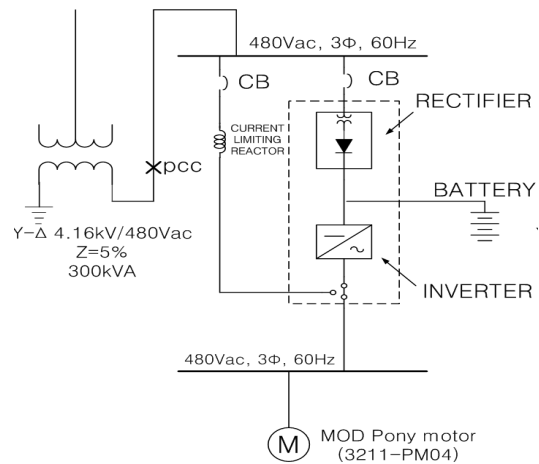


<그림 1> 동조필터(Tuned Filter)

2.2 계통사양 파악 및 PCC 결정

사례연구 대상은 원자력발전소 무정전전원계통(UPS)의 한 모선을

대상으로 하였으며, 계통단선도 및 시스템사양은 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 무정전전원계통(UPS) 단선도

2.3 고조파 저감 목표 값 및 고조파 함유량

본 논문에는 <표 1>의 IEEE Std.519에서 정한 PCC(Point of Common Coupling)에서의 단락용량의 크기에 따라 부하에 허용되는 각 고조파 전류의 최대부하전류에 대한 비율(I_{sc}/I_L)을 퍼센트로 나타낸 값인 고조파 전류 왜형률(TDD)값을 기준으로 하였다.

<표 1> 일반전력계통에 대한 고조파전류 왜형률 제한값($\leq 6.9kV$) [2]

I_{sc}/I_L	Individual Harmonic Order(Odd Harmonics)					
	h<11	h<17	h<23	h<35	35≤h	TDD
<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

* : 사례연구 대상 계통의 $I_{sc}/I_L=7217.9/260=27.76$ 임.

사례연구 대상 계통의 고조파 차수별 함유율은 <표 2>와 같으며, 5차, 7차, 11차, 13차 및 17차의 함유량이 기준치를 초과한 것으로 나타났다.

<표 2> 각 차수별 고조파전류 함유율

차수	기본파	5차	7차	11차	13차	17차
전류값	158.12	37.92	18.44	13.24	9.24	7.46
함유량	100	23.98	11.66	8.38	5.84	4.72

또한, 기준치를 초과한 각 차수별 저감 목표율은 다음과 같다.

$$H_{sec} = \frac{|I_{5th-5th}|}{|I|} = |H_{cb}| \text{ 이므로}$$

$$H_{cb-5th} = \frac{7}{23.98} = 0.292, \quad H_{cb-7th} = \frac{7}{11.66} = 0.60$$

$$H_{cb-11th} = \frac{3.5}{8.38} = 0.42, \quad H_{cb-13th} = \frac{3.5}{5.84} = 0.599$$

$$H_{cb-17th} = \frac{3.5}{4.72} = 0.74$$

2.4 필터의 R-L-C값 계산

Step 1) 튜닝대상 고조파의 Tuning값 선정
일반적으로 커패시터의 경년열화(Aging) 등에 대비하고자 5고조파용 필터는 4.7차, 7고조파용은 6.7차에 튜닝 한다.

Step 2) 필터 커패시터(C) 값의 계산

계통에 필요한 역률개선용 콘덴서의 용량을 구하여 필요한 커패시터 값을 계산한다. 본 계통은 변압기용량이 300kVA이므로 변압기 용량(kVA)에 따른 콘덴서 용량(kVA)은 변압기용량의 5%를 적용하여, 300kVA×0.05=15kVA의 콘덴서가 변압기 2차 측에 필요하게 된다.

$$Q = \frac{V^2}{X_c} \text{ 이므로 } X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{Q} = \frac{(480/\sqrt{3})^2}{15,000} = 5.12 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = 5.12 \Omega \text{ 이므로 } C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 5.12} = 0.518 \text{ mF}$$

여기서, 커패시터는 5차, 7차고조파용의 2개의 병렬회로로 설치되므로 각각의 커패시터(C)값은 0.518mF÷2=0.259mF이 된다.

Step 3) 필터 리액터(L)값의 계산

제 5고조파에서의 공진하기위한 LC값 즉, 공진주파수(300Hz)에서의 LC값은 4.7차에 튜닝된 Single-tuned Passive Harmonic Filter를 적용하므로

$$LC = \frac{1}{4\pi^2 h^2 f^2} = \frac{1}{4\pi^2 (4.7)^2 (60)^2} = 0.3185 \times 10^{-6} \text{ 가 되고, 여기에 Step 2.에서 구한 C값}(0.259\text{mF})\text{을 대입하면}$$

$$L = (0.3185 \times 10^{-6}) \div (0.259 \times 10^{-3}) = 1.229 \text{ mH가 된다.}$$

STEP4) 저항(R)값의 계산

동조필터의 경우 선택도(Q)는 대개 20~50정도의 값을 가지게 되므로 여기서는 25를 선택하여 초기 값을 계산한다.

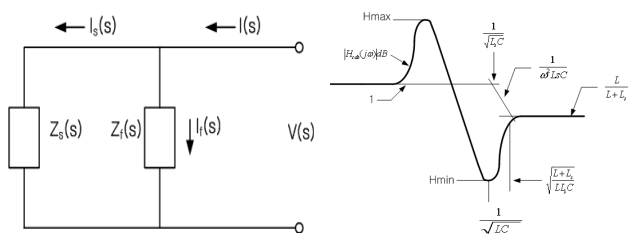
$$Q = \frac{\omega L}{R} \text{ 이므로, } R = \frac{2\pi \times (60 \times 4.7) \times 1.229 \times 10^{-3}}{25} = 87 \text{ m}\Omega$$

따라서 계산된 R-L-C값의 초기값은 <표 3>과 같다.

<표 3> 계산된 초기 값

차수	저항(R)	인덕터(L)	커패시터(C)
5th	87mΩ	1.229mH	259μF
7th	61mΩ	0.605mH	259μF

STEP5) 전달함수를 이용한 5차 필터 R-L-C Tuning[3]



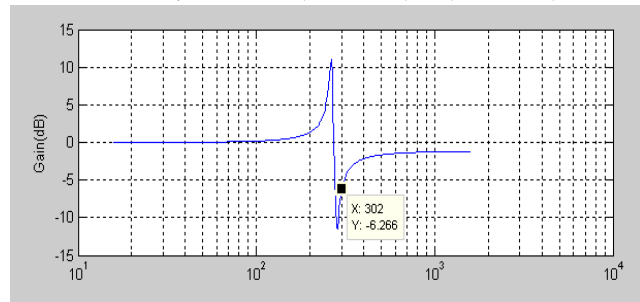
<그림 3> 필터 및 계통임피던스 구성도

$$Z_s(s) = R_s + L_s s = (1 \times 10^{-3}) + (176 \times 10^{-6})s$$

$$Z_f(s) = R_f + L_f s + \frac{1}{C_s} = (87 \times 10^{-3}) + (1.229 \times 10^{-3})s + \frac{1}{(0.259 \times 10^{-3})s}$$

$$H_{\text{calc}}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s) + Z_s(s)} = \frac{L_f C_s s^2 + R_f C_s s + 1}{(L_s C_f + L_f C_f)s^2 + (R_s C_f + R_f C_f)s + 1}$$

$$H_{\text{calc}}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s) + Z_s(s)} = \frac{(0.3183 \times 10^{-6})s^2 + (22.533 \times 10^{-6})s + 1}{(3.6389 \times 10^{-7})s^2 + (2.2792 \times 10^{-5})s + 1}$$

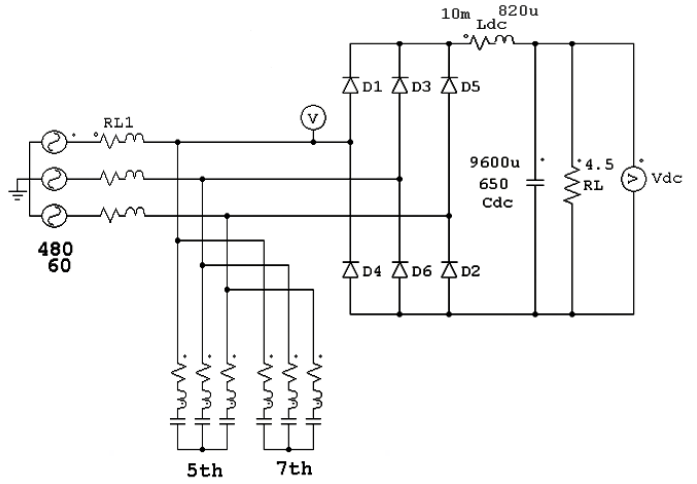


<그림 4> 전달함수의 Bode Plot

2.5 컴퓨터 시뮬레이션

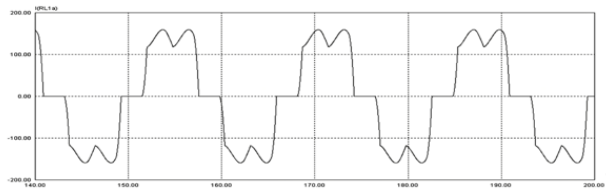
2.5.1 회로도

컴퓨터시뮬레이션은 범용 소프트웨어인 PSIM을 사용하였으며 회로도는 <그림 5>, 사용된 회로정수는 <표 3>과 같다.

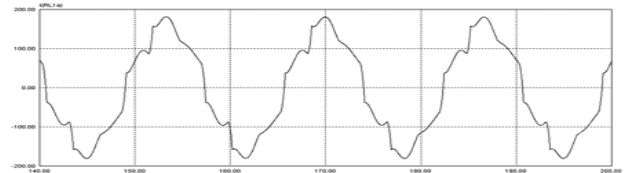


<그림 5> 회로도

2.5.2 시뮬레이션 결과



<그림 6> 필터 설치 전



<그림 7> 필터 설치 후

위 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서 보듯이 수동필터 적용 후 5차 및 7차 고조파 필터만으로도 고조파 규제기준치를 만족하였으며 더 이상의 고차 필터는 불필요 하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 인버터 부하에서 주로 발생하는 5차, 7차, 11차 등의 저차수의 고조파를 제거하기 위하여 간단한 구조와 경제성이 있는 Single-tuned Second-order Filter를 설계하였다. 사례연구 대상으로 원자력발전소의 무정전원계통(UPS)의 한 모선을 대상으로 하였으며 고조파 함유량 분석결과를 토대로 수동필터를 설계하여 범용 프로그램인 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 5차, 7차, 11차, 13차 및 17차의 고조파 함유율이 각각 6.47, 3.01, 3.70, 3.40 및 2.80으로 IEEE 519의 규제요건을 만족시키는 양호한 결과를 얻었다. 본 논문에서 다루지 못한 능동형 필터(Active Filter)를 연계한 하이브리드 필터(Hybrid Filter)의 설계 및 효과에 관해서는 다음 연구과제로 남겨둔다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jos Arrillaga and Neville R.Watson, "Power system harmonics", John Willy & Sons, Ltd pp235~236, 2003
- [2] IEEE 519, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", p78, 1992
- [3] James K. Phipps, "A Transfer Function Approach to Harmonic Filter Design", IEEE Industry Magazine, p72, March/April 1997