

확률론적 고조파필터 설계에 관한 연구

김용하*, 이 범**, 최상규***, 이성준****, 이명민****, 나인규****, 이광성****, 최영주****

인천대학교*, 여수대학교**, 안양과학대학***, (주)KT****, 인천도시철도건설본부****, (주)한화종합기술단****, 인천상수도사업본부****

A Study on Probabilistic Harmonic Filter Design

Kim, Y.H., Lee, Buhm**, Choi, S.K***, Lee, S.J., Lee, M.M****, Na, In.K****, Lee, K.S****, Choi, Y.J****

University of Incheon*, YosU N.U**, Anyang T.C***, KT****, S.C.H****, Han Hwa ENG****, Incheon Waterworks****

Abstract - Filter design for harmonic reduction suggests that measurement from IEEE std-519 and IEEE-61000 standards for 1 year designs filter about the worst case, filter design about method applied probability from IEEE std-519 standard suggests the basic alternative.

At filter design method applied to temporary occurred harmonic maximum, analyzed into closely harmonic that applied to probability develops that ignorable harmonic that lowers temporary occurred probability is rational and economic filter design in detailed method.

1. 서 론

근래에 산업이 정보화되어 가며 가정용 가전제품에서부터 산업용 기기에 이르기 까지 비선형부하의 사용이 크게 증가하면서 이들 부하로부터 발생하는 고조파 성분전류가 전원계통에 유입되어 전원전압의 왜곡과 통신상의 장애 등 여러 가지 문제를 일으키고 있다. 그 동안 고조파에 대한 규제기준 인식이 미약할 뿐 아니라 피해 및 영향에 대하여 외면하고 있었던 것이 사실이다. 그러나 비선형 부하에 의한 전원오염을 법적으로 규제하기 위한 선진 각국의 고조파 규제 안이 제정 되어 있고 국제적 개방화시대에 발맞추어 전력품질에 대한 새로운 인식의 전환이 이루어지지 않으면 안 된다. 고조파 저감을 위한 필터설계는 IEEE std-519 혹은 IEEE-61000 규격에서 1년을 측정해서 가장 가혹한 경우에 대해 필터설계를 하도록 하고 있는 반면 IEEE std-519 규격에서는 확률론적인 방법으로 필터를 설계하는 방법에 대한 기초적인 대안을 제시하고 있다. 본 연구에서는 일시적으로 발생하는 고조파 최대값을 적용하여 필터를 설계하던 방법에서 고조파를 확률론적으로 면밀히 분석하여 일시적으로 발생할 확률이 적은 고조파는 무시하여 합리적이고 경제적인 필터를 설계하는 방법을 개발하였다.

2. 고조파 필터 설계

2.1 확률론적 방법에 의한 필터 설계
 확률론적인(일반적인) 방법에 의한 고조파 저감을 위한 필터설계는 IEEE std-519 혹은 IEC-61000 규격에서 1년을 측정해서 가장 가혹한 경우에 대해 필터설계를 하도록 하고 있다. 따라서 일반적으로 필터 용량을 계산할 때는 측정기간 중 I_{TDD} 의 최대값을 적용하여 계산하도록 한다. 일단 시설의 단락비(SCR)를 구한 다음 표1에서 I_{TDD} 기준을 정한다. 그리고 I_{TDD} 의 기준까지 낮추기 위한 목표 I_{TDD} RMS의 효율을 구해야 한다. 측정값을 이용하여 저감효율을 구하면 식(1)과 같다.

$$\text{목표 } I_{TDD} \text{저감율} = \frac{(\text{측정된 } I_{TDD}[\%]) - (\text{기준 } I_{TDD}[\%])}{(\text{측정된 } I_{TDD}[\%])} \quad (1)$$

단, 측정된 $I_{TDD}[\%]$: 필터설치 전 측정된 $I_{TDD}[\%]$ 값
 기준 $I_{TDD}[\%]$: IEEE의 규제기준에 의한 기준(or 목표)

영상분 고조파가 많이 발생하는 부분에는 ZSF(Zero Sequence Filter)를 설치하여 Triplen 고조파의 제거를 목적으로 사용하는 곳에 사용하며 식(2)와 같이 계산된다.

$$ZSF = \frac{(\frac{n}{r} \times V \times \sqrt{3})}{1000} [A] \quad (2)$$

단, ZSF: 영상분고조파 필터 용량[A]
 n: 중성선 전류 용량,
 V: 전압
 r: 경험적 요소에 의한 지수

APF의 경우 전체고조파의 THD가 규정에 만족되었을 지라도 개별고조파가 제한치를 위반한 경우 개별고조파들의 저감을 유리하며 식(3)과 같이 계산된다.

$$APF = \frac{THD_s - THD_s^0}{H} [A] \quad (3)$$

단, APF: 능동필터의 용량[A]
 THD_{rms} : 개선전의 THD_{rms}
 THD_{rms}^0 : 개선목표치의 THD_{rms}
 H: 보상효율(경험효율)

2.2 확률론적인 방법에 의한 필터 설계 및 I_{TDD} 지속 곡선 확률모형

시간에 따른 데이터의 THD와 TDD를 분석하여 통계를 구하고 그 통계를 기초로 필터의 용량을 산출 한다. 오차를 줄이기 위하여 긴 시간과 넓은 범위의 고조파를 측정한다.

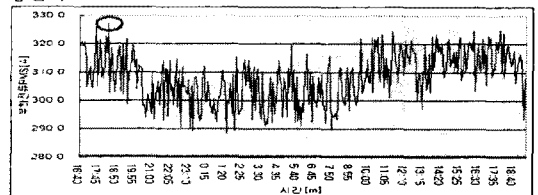


그림 1. 부하전류 변동곡선

그림 1은 24시간 측정된 부하전류RMS의 변동곡선이고 그림 2는 부하전류가 최대일 때의 기본파를 제외한 각 차수별 고조파 전류 스펙트럼을 나타낸 것이다.

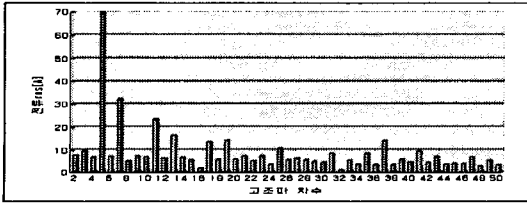


그림 2. 기본파를 제외한 고조파 전류스펙트럼

위의 그림 2에서 보듯이 측정된 데이터에서 I_{THD} , I_{TDD} 지수는 식(4), 식(5)와 같다.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_{hrms}^2}}{I_{rms}} \quad (4)$$

단, I_{hrms} : 각 차수별 고조파 전류값[A]

I_{rms} : 기본파 전류값[A]

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_{PEAK(15\sigma/30min)}} \quad (5)$$

단, I_h : 차수별 고조파 전류

$I_{PEAK(15\sigma/30min)}$: 기본파 정격최대전류(15~30분간)

I_{TDD} 의 관리기준은 표1과 같이 IEEE Std-519의 기준을 적용한다.

표 1. IEEE Std-519 고조파 전류 관리기준(120[V]부터 69000[V]까지)

SCR =ISC/IL	Individual Harmonic Order(Odd Harmonics) [%]					TDD
	< 11	11 < h < 17	17 < h < 23	23 < h < 35	35 < h	
< 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

역수 고조파의 관리기준은 상기 총수 고조파의 25% 이내
ISC: 단락전류, IL: 부하전류, h: 고조파차수

따라서 변압기의 용량과 %임피던스로 단락비(SCR=ISC/IL)와 단락용량은 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$\%Z = \frac{I_N}{I_S} \times 100 = \frac{\sqrt{3} \times V \times I_N}{\sqrt{3} \times V \times I_S} \times 100 = \frac{MVA_T}{MVA_S} \times 100$$

$$MVA_S = \frac{MVA_T}{\%Z} \times 100 \quad (6)$$

단, I_N : 정격전류(A)

I_S : 단락전류(A)

MVA_T : 변압기용량

MVA_S : 단락용량

$$SCR = \frac{MVA_{SC}}{MW_{rect}} \quad (7)$$

단, SCR: 단락비

MVA_{SC} : 캐패시터 접속점에서의 단락용량[MVA]

$MVAR_C$: 캐패시터 용량[Kvar]

MW_{rect} : 보상기의 용량[MW]

I_{TDD} 의 변동곡선은 그림 3과 같다.

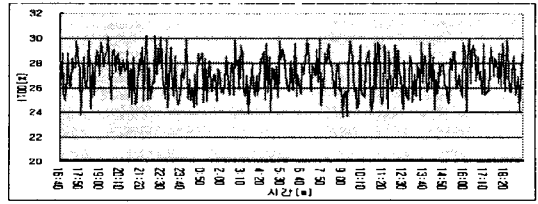


그림 3. 고조파 I_{TDD} 변동곡선

여기에서 일정범위에 속한 I_{TDD} 를 그림 4와 같이 dots분포도로 도출해 낼 수 있다.

그림 4를 이용하여 부하의 확률분포함수(Probability Distribution Function: PDF)를 구하여 이를 누적확률분포함수(Cumulative Probability Distribution Function: CPDF)로 나타낸 것이 그림 5의 $G(X_C)$ 와 같다.

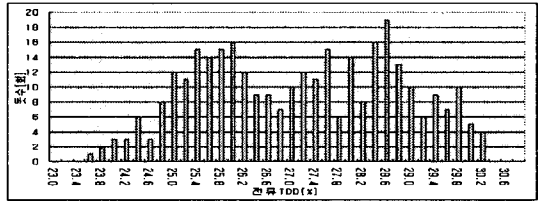


그림 4. I_{TDD} 에 대한 dots분포

그러므로 식(8)로 계산되는 역 I_{TDD} 지속곡선은 수요의 부족누적확률분포함수(Complementary Cumulative Probability Distribution Function: CCPDF)로 해석할 수 있다.

$$F(X_{CC}) = 1 - G(X_C) \quad (8)$$

단, $F(X_{CC})$: 역 I_{TDD} 지속곡선 함수

$G(X_C)$: 누적 I_{TDD} 분포함수

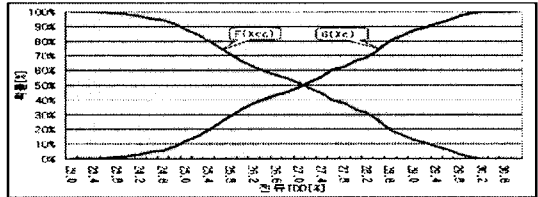


그림 5. I_{TDD} 의 누적확률분포함수 및 부족누적확률분포함수

이와 같이 구해진 역 I_{TDD} 지속곡선의 I_{TDD} 크기의 축인 X 축과 확률축인 Y축을 전치시켜 I_{TDD} 지속곡선을 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림 Y축은 I_{TDD} 가 확률(%)만큼 지속하고 있는가를 의미한다.

2.3 확률론적 기대치 설정에 의한 필터설계

고조파 I_{TDD} 를 계속함에 있어서 계획된 I_{TDD} 의 오차는 I_{TDD} 시뮬레이션의 결과에 중대한 영향을 끼치게 된다. 이와 같은 I_{TDD} 의 오차를 고려하기 위해서는 충분한 DATA의 오차를 나타낼 수 있는 오차의 분포함수를 결정하여야 하는데 일반적으로 이러한 분포는 정규분포를 따른다. 정규분포의 확률밀도함수는 식(9)와 같다.

$$f_C(X) = \frac{e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (9)$$

단, μ : 예측된 I_{TDD} 의 평균

σ : I_{TDD} 의 표준편차

σ^2 : I_{TDD} 의 분산

식(9)에 의하여 그림 4의 이산확률분포를 그림 6과 같이 정규분포로 표현할 수 있다.

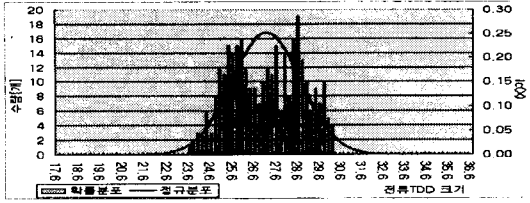


그림 6. 확률분포를 정규분포화한 그래프

I_{TDD} 의 오차를 고려한 경우의 I_{TDD} 모형을 고조파시플레이션에 반영하기 위하여 $I_C(X)$ 는 이산화 되어야 한다. 여기서 계급의 구간을 $\pm 3\sigma$ 까지 고려하여 확률 값을 99.7%의 정확도를 유지하도록 한 경우, $I_C(X)$ 를 7개의 부분으로 이산화 시킨 각 부분에 대한 존재확률은 $I_C(X)$ 를 구간별로 적분하여 그림7과 같이 나타낼 수 있다.

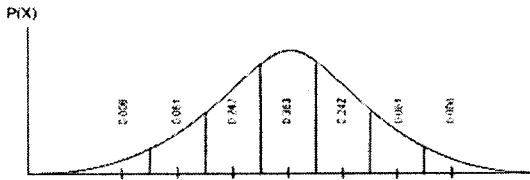


그림 7. 7개의 구간으로 이산화 시킨 표준정규분포의 확률값

- (a) $P(\mu - \sigma < X \leq \mu + \sigma) \cong 68\%$
- (b) $P(\mu - 2\sigma < X \leq \mu + 2\sigma) \cong 95.5\%$
- (c) $P(\mu - 3\sigma < X \leq \mu + 3\sigma) \cong 99.7\%$ (10)

표 2. 예측의 불확실성을 고려한 구간별 존재확률

구간	대표값	존재확률
1	$X(-3\sigma)$	0.006
2	$X(-2\sigma)$	0.061
3	$X(-1\sigma)$	0.242
4	X	0.382
5	$X(+1\sigma)$	0.242
6	$X(+2\sigma)$	0.061
7	$X(+3\sigma)$	0.006

따라서 확률론적 필터용량설계는 표 2에서처럼 각 구간의 필터용량을 각각 구한 다음 각 구간의 존재확률을 곱하면 그 구간의 실질적인 필터 용량의 기대값을 산출한다. 그 다음 각 구간의 필터용량 기대값을 더하면 전체 필터용량이 설계된다.

표 3. 필터용량의 기대값

구간	대표 I_{TDD} [%]	변환 I_{TDDrms} [A]	목표 I_{TDD} [%]	구간 필터용량 [A]	존재확률 [%]	필터용량 기대값 [A]
1	22.159	69.52	18.25	64.09	0.0047	0.301
2	23.806	74.69	19.61	68.85	0.0606	4.172
3	25.453	79.86	20.97	73.61	0.2417	17.792
4	27.100	85.02	22.32	78.38	0.3830	30.018
5	28.747	90.19	23.68	83.14	0.2417	20.095
6	30.394	95.36	25.04	87.90	0.0606	(5.327)
7	32.041	100.53	26.39	92.67	0.0047	(0.436)
합계	27.02	84.77	22.26		0.997	72.38

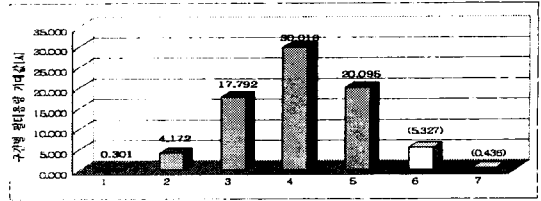


그림 8. 구간별 필터용량 그래프

표 4. 확률론적인 필터설계 결과

구분	I_{TDD} (%)	I_{TDD} (%)
필터설치 전	33.485	30.47
필터설치 후	9.42	8.57
규제기준	차수별	8[%]
기속확률 93.32[%]	8.79	8.00
판정결과	만족	만족

표 5. 확정론적과 확률론적인 필터설계 용량 비교

	확정론적	확률론적
필터용량[A]	87.47	72.38
차이	15.09	

3. 결 론

본 연구에서는 고조파를 저감할 수 있는 필터설계에 대한 연구와 고조파 필터설계에 있어서 합리적이고 경제적인 필터설계의 구체적인 방법을 제안하였다. 또한, 필터용량 설계시 확률론적인 방법을 적용하였으며, 이 방법으로 합리적인 용량 산출 방법을 연구 하였다. 고조파 저감을 위한 필터설계는 IEEE std-519 혹은 IEEE-61000 규격에서 1년을 측정해서 가장 가혹한 경우에 대해 필터설계를 하도록 하고 있으며 또다른 방법으로 IEEE std-519 규격에서 확률론적인 방법으로 필터를 설계하는 방법에 대한 기초적인 대안을 제시하고 있다. 일시적으로 발생하는 고조파 최대값을 적용하여 필터를 설계하던 방법에서 고조파를 확률론적으로 면밀히 분석하여 일시적으로 발생할 확률이 낮은 고조파는 분류하여 제거함으로써 합리적이고 경제적인 필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 이후 본 연구에서 필터 설계 시 제안한 필터용량설계의 확률론적 기법을 다른 여러 종류의 필터 설계시 적용하여 합리적이고 경제적인 방안을 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

"본 연구는 2004년도 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업의 지원에 의한 것임"

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "고조파 사용실태 조사 및 개선방안 연구", 2002
- [2] 전력기술인협회지, 김용상, "전력기기의 고조파 발생 원인과 영향 및 특성", pp. 22~26, 10. 2001
- [3] McGraw-Hill, Roger C.Dugan, Mark F.McGrannagan, H.Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality" 1996
- [4] WILEY, Enrique Acha, Manuel Madrigal, "Power Systems Harmonics" 2001
- [5] IEEE Industry Applications Society & Power Engineering Society, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", IEEE Std 519-1992
- [6] 전력 전자 학회지, "계통 고조파현상의 원인 및 대책" pp29-37, 2. 2000