

비선형 부하 이차 고조파 발생 실증사례 분석 및 임피던스 변동 기법을 통한 이차 고조파 저감 기법

Case Study of Second Harmonic Generation under Nonlinear Load and Second Harmonic Elimination Method Based on Impedance Variation Scheme

방 희 균* · 김 시 경†
(Heegyun Bang · SikyungKim)

Abstract - This paper presents a second harmonic elimination method based on the impedance variation scheme. Through the power quality analysis from the nonlinear loads connected on the power system, the second harmonic problems have been analyzed with a case study analysis and the experiments. In the paper, the second harmonic generation was simulated with a single phase SCR rectifier and the analytical model is proposed for the second harmonic generation. A novel impedance variation scheme is proposed and analyzed to eliminate the second harmonic. The experiment has been performed on the 60(MVA) industry manufacturing plant. The experimental result demonstrates the proposed impedance variation scheme successfully operate on the 60(MVA) industry manufacturing plant.

Key Words : Second harmonic, Second harmonic elimination method, 60(MVA) industry manufacturing plant, Single phase SCR rectifier

1. 서 론

산업 제조 장비 플랜트에서 사용하는 아크로, 전기로(Furnace) 설비는 수십 MVA 단위 전력사용량을 가지는 대용량의 전력 소비 장치이다. 이러한 산업용 특수 전기 설비를 사용하는 수용가의 전력계통은 고조파로 인해 전력계통의 운영에 심각한 지장을 초래 할 뿐 아니라, 전력설비 절연 열화에 따른 변압기 소손, 전력기기 효율저하 등 전력품질 저하의 주된 요인이 되고 심지어 전력회사의 송배전 계통까지 영향을 주고 있다[1,2,3].

교류 전력계통에 연계된 아크로, 전기로(Furnace)에서 발생하는 고조파(Harmonics)는 대부분 흡수 고조파 성분이지만 설비 운전 중 2고조파 성분의 우수 고조파도 간헐적으로 발생한다. 이러한 산업용 특수 전기로 설비에서 발생 되는 2고조파 성분의 우수고조파 발생원은 주로 산업용 전기로의 정밀 온도제어용으로 사용하는 SCR(Silicon-Controlled Rectifier) 위상제어(Phase Control) 방식을 사용하는 교류전압제어기이다. 이 방식은 SCR 전력용반도체 소자의 열화, 접촉불량의 기기 결함 발생 등으로 위상제어 파형이 갑자기 비대칭으로 되면서 2고조파가 발생될 수 있다[4,5,6]. 또 다른 2고조파 성분의 우수고조파 발생원은 전력용 변압기이다. 변압기 철심의 자화특성은 직선적이 아니고 히스테리시스(Hysteresis)현상이 있기 때문에 변압기의 여자전류는 우수

고조파를 함유한 왜곡 파형이 된다. 초기 무부하 운전을 할 경우 변압기 여자돌입전류(Inrush Current)가 발생되며 이때 우수고조파가 매우 짧은 순간동안 발생된다[7,8,9]. 여자돌입 전류가 흐르는 시간이 매우 짧지만 그 크기가 변압기 정격 전류의 최대 10배 정도이기 때문에 변압기 절연에 영향을 줄 수도 있다. 또한 변압기에서 발생하는 고조파 전류는 변압기의 용량, 정격전압, 결선방법 등에 따라 고조파 발생 비율이 각각 다르게 나타난다[10,11].

2고조파 성분의 우수고조파는 일반적으로 그 크기가 매우 적기 때문에 전력계통에 거의 영향을 주지 않는 것이 보통이다. 그러나 어떤 원인으로 우수고조파 크기가 커지게 되면 우수고조파가 전력용 변압기를 통해 전원측으로 유입되며 전력계통에 순환되기 때문에 전력계통에 매우 심각한 운전 장애와 전력설비 기기절연 저하 등 치명적인 영향을 미치게 된다. 이러한 문제에도 불구하고 현재까지 2고조파 성분의 우수 고조파 분석 및 저감 기법에 대한 연구가 거의 없는 실정이다[12,13].

고조파 억제 대책으로 고조파 발생원(Sources of Harmonics)에서 근본적으로 제거하는 것이 가장 이상적이다. 이를 위하여 전력계통을 구성하는 기본설계 단계부터 고조파에 대해 충분히 고려되어야 한다. 그러나 실제 부하운전시 계통에 많은 변화가 나타나게 되고 계통 임피던스가 변화되어 고조파로 인한 각종 트러블에 대한 조기 대응이 어렵다. 따라서 정기적으로 고조파 측정, 분석을 통해 계통 변화에 대해 지속적인 대응이 필요하다[14,15,16]. 고조파 저감 장치는 전력계통을 고조파로부터 안정적으로 보호 할 수 있으며 역률저하, 전압강하, 전압변동, 전력기기 효율저하 등의 전력품질을 향상시켜 고품질의 안정적인 전력공급을 필요로 하는 산업 플랜트, 건축물에서는 매우 중요한 설비로 부각되

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering,
Kongju National University

E-mail : skim@kongju.ac.kr

* Samsung Co.,Ltd.

Received : March 15, 2013; Accepted : April 11, 2013

고 있다[17,18]. 따라서, 고조파가 많은 수용가에서는 설계 단계에서 고조파 내량에 대한 사전 검토를 충분히 실시하고 고조파 저감 설계가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 60(MVA) 산업 제조 장비 플랜트 수용가 단상 전력계통에서 발생한 2고조파 발생 실증사례 분석을 통해 2 고조파 발생 원인에 대한 고조파 분석을 수행하였다. 또한 이들 2 고조파 계통의 유도성 리액턴스 성분 추가를 통한 임피던스 변동 기법을 제시 하여 2고조파 저감 방법을 제시 하였으며 실증 실험을 통하여 제안 기법의 타당성을 입증 하였다.

2. 60(MVA) 산업 제조 장비 플랜트 2고조파 사례 분석

2.1 2고조파 발생 전력 계통도

2고조파 분석을 수행한 60(MVA) 산업 제조 장비 플랜트 수용가 전력계통 구성을 그림 1에 나타내었다. 부하 측에 154(Kv)를 6(Kv)로 감압하는 변압기가 사용되었으며 부하는 480(V)/12(MVA) 산업 전기로(Furnace)부하, 460(V)/24(MVA) 사이리스터 드라이브, 220(V)/8(MVA)산업용 로봇, 440(V)/5(MVA)대용량 유틸리티 장비 및 전동기 등으로 구성되어 있으며 비선형부하는 정류기 심별로 표시 하여 그림과 같이 나타내었다. 주 변압기는 수개의 뱅크로 구성되어 상호 연결되어 있으나 그중에서 2고조파가 발생하는 계통의 전력설비 구성만을 나타내었다. 본 논문에서는 그림에 점선부분으로 표시한 단상 전력계통의 비선형부하에서 발생하는 2고조파에 대한 전력 분석을 수행하였다.

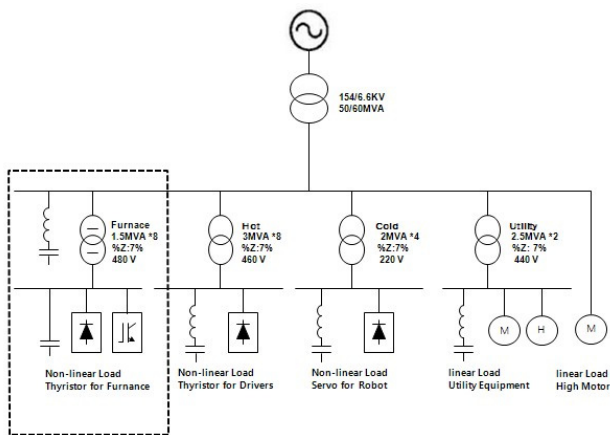


그림 1 154(KV)/ 60(MVA) 산업 제조 장비 플랜트 전력 계통도

Fig. 1 154(KV)/ 60(MVA) Industry Manufacturing Power Plant

2.2 2고조파 발생 전력계통 고조파 측정 및 분석

본 논문에서는 그림 1의 점선부분으로 표시된 단상 전력계통의 비선형부하에서 발생하는 고조파 전력품질 측정을 위해서 그림 2와 같이 전력 분석기(HIOKI 3196 Power Analyzer) 이용하여 단상 변압기의 전원측과 부하측 2개의 배전반에 있는 전압측정단자(PTT)와 전류측정단자(CTT)에

서 각각 고조파 전력품질 분석을 수행하였다. 그림에서 비선형 부하에서 발생하는 고조파 성분을 저감시키기 위하여 능동 필터를 연동하였으나 능동 필터는 홀수 고조파 성분을 저감 하는 데만 기여하고 2고조파 성분 저감에는 기여 하지 않는다.

고조파 전력품질 측정을 위해 그림 2와 같이 전력 분석기 2개의 채널을 연결하여 동시에 측정하였다. 채널 CH1은 단상 변압기의 부하측에서 측정한 전압, 전류 프로브 센서이며 채널 CH4는 전원측에서 측정한 전압, 전류 프로브 센서이다.

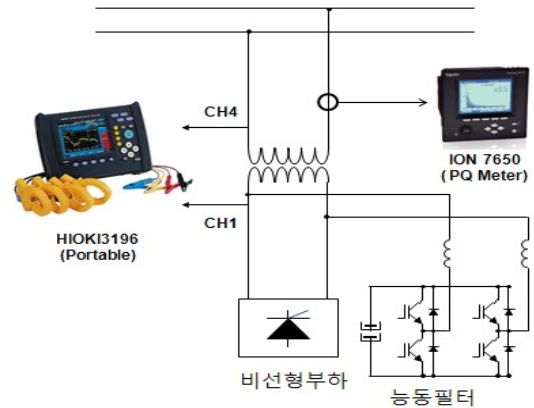


그림 2 전력 분석기(HIOKI 3196 Power Analyzer) 이용한 전력분석

Fig. 2 Power Analysis with Power Analyzer(HIOKI 3196 Power Analyzer)

그림 3은 전력 분석기를 이용하여 측정한 전압과 전류에 대한 파형을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 그림 2의 변압기 입력 및 부하 측의 전압 파형을 나타낸 것이다. CH4는 변압기 전원입력 측의 전압파형(3,000V/div) CH1은 변압기 부하 측 전압 파형(436V/div)이다. 그림 3(b)는 변압기 입력 및 부하 측 전류 파형으로 CH4는 변압기 전원 입력 측 전류파형(800A/div), CH1은 변압기 부하 측 전류파형(3,000A/div)이다.

여기서 주목 하여야 점은 그림 3(b) 변압기 입력 및 부하 측

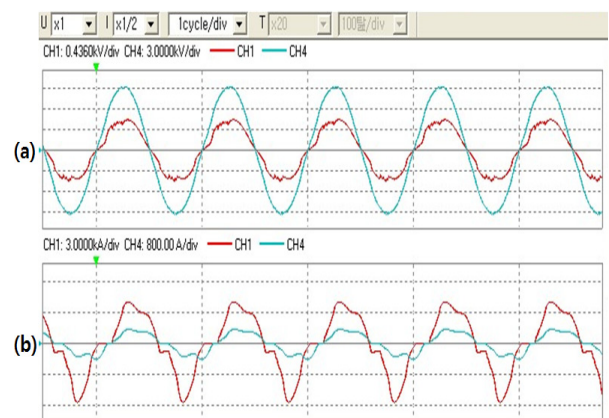


그림 3 2고조파 발생 시 전압, 전류 파형 x축: 16.67(msec)/div
Fig. 3 Voltage and Current Waveforms with Second Harmonic Component

전류 파형이 2고조파 성분 발생 시 전류 파형 변화가 시작되어 양구간(1/2주기, 8.835(msec)) 음구간(1/2주기, 8.835(msec)) 전류 파형이 상호 비대칭이 된 것이다.

그림 3의 2고조파 발생 시 전압, 전류 파형에 대한 주파수 FFT 분석 결과 2고조파 발생 시 전원 측에 비하여 부하측 전압고조파 함유율이 2.24(%) 증가 하였다. 이러한 증가는 그림 3(a) CH1 변압기 부하측 전압 파형이 CH4는 변압기 전원입력 전압파형에 비하여 상대적으로 왜곡된 부분과 일치하는 결과 이다. 계통 정상 운전 시 2고조파 발생 전 전류고조파 함유율은 평균 2(%) 수준이었으나 2고조파 발생 시 14.79(%)로 7.4배 급증 하였다. 따라서 이와 같이 급증한 2고조파는 다른 4, 8 우수고조파를 발생시키며 이들 우수고조파는 전력용 변압기를 통해 전원 측으로 유입된다. 유입된 고조파 우수 고조파 전류는 전력계통에 순환되기 때문에 전력계통에 매우 심각한 운전 장애와 전력설비 기기절연 저하 등 치명적인 영향을 미치게 된다.

3. 2고조파 성분의 우수고조파 발생 원인 분석

본 절에서는 2고조파 발생 원인과 파형 특성을 분석하기 위하여 PSIM 프로그램을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 2고조파 시뮬레이션을 수행하기 위해 154(kV) 수용가의 단상 전력계통에서 수집한 정확한 데이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행하고자 하였으나 산업 현장의 여러 가지 제약 조건과 전기로 정밀제어에 필요한 운전 조건의 변화, SCR 위상제어 방식에서 점호각 α 의 변화, 단상 전력계통에서 운전 변경에 따른 계통 임피던스 변화를 고려한 2고조파 시뮬레이션 수행은 불가능 하였다. 따라서, 본 절에서는 전력계통에서 운전 변경에 따른 계통 2고조파 유발에 대표적으로 영향을 주는 점호각 변화에 따른 2고조파 발생 모델링회로를 이용 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 2고조파 발생 모델링 회로

본 절에서는 전기로의 비선형 부하에서 발생하는 우수고조파로 인해 단상 전력계통의 운전 장애와 영향을 미치는 요인을 분석하기 위하여 2고조파 발생 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 단상 전력계통에서 2고조파 발생 원인은 주로 산업용 전기로에 대해 정밀 온도용으로 사용하는 SCR 전력 변환기이므로 본 논문의 시뮬레이션 대상으로 하였다. SCR 위상제어 방식은 간헐적으로 SCR 스위칭 소자의 발열과 접촉 불량 등의 기기 결함 발생 등으로 제어 파형이 비대칭으로 되어 2고조파가 발생된다.

그림 4는 그림 1의 점선부분으로 표시된 단상 전력계통의 단상 전기로 비선형부하에 대한 2고조파 발생 모델링 회로를 나타냈다. SCR전파정류기는 그림의 THY1에서 THY4 4개의 SCR소자를 사용하였으며 위상 $[0-\pi]$ 구간에서 THY1과 THY4는 게이트(Gate) 점호각 60° 에서 트리거(trigger)제어 되도록 하였으며 위상 $[\pi -2\pi]$ 구간에서 THY2와 THY3은 게이트 점호각 $\pi+30^\circ$ 에서 트리거(trigger)제어가 되도록 설정하였다.

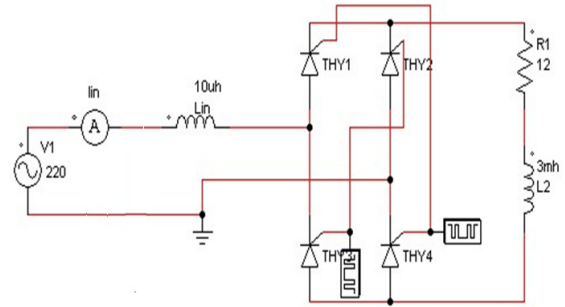


그림 4 2고조파 발생 모델링 회로
Fig. 4 Simulation Scheme with Second Harmonic Component

3.2 2고조파 시뮬레이션 결과 특성 분석

그림 5는 PSIM 프로그램을 활용하여 SCR 위상제어 방식에 따른 비선형부하에서 발생된 교류전압변환기의 입력전류파형을 나타낸 것이다. 그림 4의 SCR 전파정류 제어기의 THY1과 THY4의 게이트 점호각 60° , THY2와 THY3의 게이트 점호각 $\pi+30^\circ$ 에서 위상제어를 통해 입력 전류 파형을 분석하였다. 그림 5는 SCR 입력 전류 파형에서 2고조파 전류 파형 영향으로 전류 파형의 양, 음의 파형이 비대칭으로 된 것을 볼 수 있다.

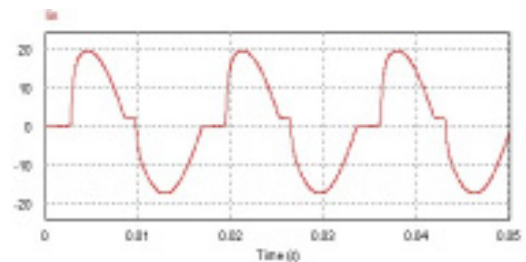


그림 5 2고조파 발생 입력 전류 파형
Fig. 5 Input Current Waveform with Second Harmonic Component

그림 6은 그5의 2고조파 발생 입력 전류 파형에 대한 주파수 FFT 분석 결과를 나타낸 것이다. 주파수 FFT 분석 결과기분과 성분을 제외한 2고조파, 3고조파, 4고조파, 5고조파가 발생되었고 단상 부하의 3, 5고조파 성분의 홀수고조파 외에도 2, 4고조파 성분의 우수고조파가 발생된 것을 알 수 있다. 그림 6의 FFT 분석에서 2고조파 입력전류의 크기는 1.65(A)이며 4고조파 입력전류의 크기는 1.63(A)가 되었으며 이로부터 2고조파 발생을 확인할 수 있다.

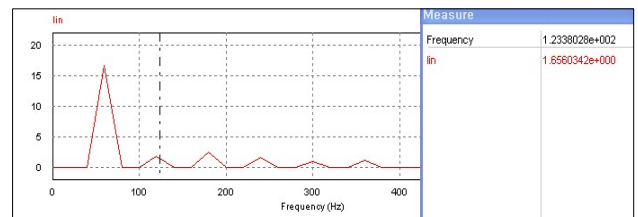


그림 6 입력 전류 주파수 FFT 분석
Fig. 6 FFT Analysis for the Input Current

3.3 SCR 정류기 점호각에 따른 우수 고조파 변동 분석

시뮬레이션에 사용한 그림 4의 SCR 전파제어 정류기의 THY1과 THY4의 점호각을 α (그림 7), THY2와 THY3의 점호각을 β (그림 7)라고 하면 SCR 전파제어기가 정상적으로 동작 시 즉, $\alpha=\beta$ 인 경우에는 그림 7과 같이 전류 파형의 양의 파형(A), 음의 파형이(B) 서로 대칭이 되게 된다. 그러나 SCR 반도체 발열과 접촉불량, 도통각 제어 동작 이상의 경우에는 α, β 의 크기가 같지 않아 입력전류에 2, 4고조파 성분이 발생되어 우수고조파가 발생된다. SCR 전파제어기가 비정상적으로 동작 시 즉, $\alpha \neq \beta$ 인 경우에는 2고조파 영향으로 그림 8에 보인바와 같이 전류 파형의 양의 파형(A), 음의 파형이(B) 서로 비대칭이 된다

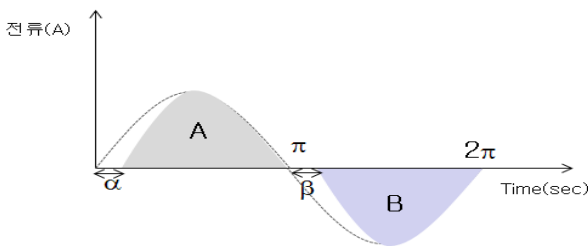


그림 7 SCR 제어 정류기의 정상 동작 시 입력전류 파형
Fig. 7 Input Current Waveform for the Normal Operated SCR Rectifier

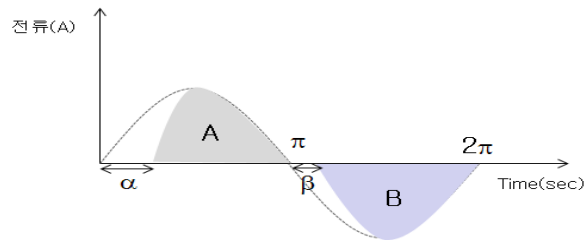


그림 8 SCR 제어 정류기의 이상 동작 시 입력전류 파형
Fig. 8 Input Current Waveform for the Abnormal Operated SCR Rectifier

점호각 α, β 의 크기 불균형에 따른 2, 4고조파 발생 정도를 분석하기 위하여 점호각의 차 $del A$ 식(1)과 같이 정의하였다.

$$del A = \alpha - \beta \quad (1)$$

$del A$ 와 입력전류의 2, 4 우수고조파 성분의 관계를 분석하기 위하여 $del A$ 값을 10° 에서 60° 까지 변경하면서 입력전류의 FFT 우수고조파 성분을 시뮬레이션 분석하였다.

그림 9는 입력전류의 FFT 우수고조파 성분과 $del A$ 사이의 관계를 나타 낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 $del A$ 값이 60° 의 입력전류 우수고조파 성분의 크기는 $del A$ 가 10° 안 경우와 비교하여 7배 증가됨을 알 수 있다.

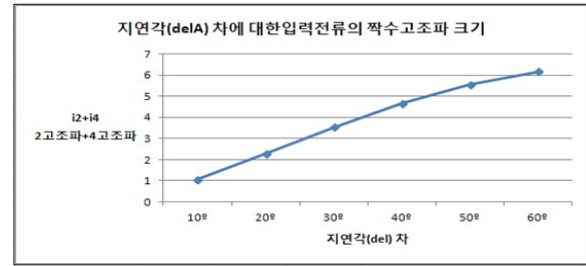


그림 9 점호각 차 ($del A$)에 대한 입력전류의 우수고조파 크기
Fig. 9 Second Harmonic Current Variations for the Triggering Angle Difference($del A$)

4. 임피던스 성분 변동 기법을 통한 2고조파 저감

4.1 2고조파 저감 회로

전력계통에서 설치된 리액터와 커패시터는 계통 임피던스와 항상 공진 대역을 만들기 때문에 공진 대역을 제거하는 사실상 불가능하다. 하지만 특정 고조파가 발생하는 구간에서 공진 대역을 이동시킴으로써 2고조파 문제를 해결할 수 있다. 그림 12는 점선 안에 표시된 인덕터 성분 Z_{S2} 를 추가하여 계통 임피던스 값을 변화시켜 2고조파 공진필터를 구현하여 2고조파 저감 효과를 얻는 회로를 나타낸 것이다. 단상 전력계통에 임피던스를 추가하여 적절한 용량을 선정하면 2고조파 공진주파수 대역을 조정하여 2고조파 저감 효과를 얻을 수 있다.

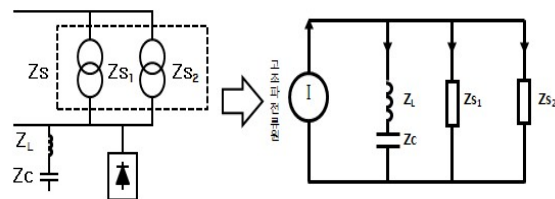


그림 10 임피던스 성분 변동 기법을 통한 2고조파 저감 회로
Fig. 10 The Second Harmonic Elimination Scheme with the Impedance Variation Method

4.2 2고조파 저감 기법 합성 임피던스 분석

본 절에서는 2고조파 저감기법의 고조파 저감 특성을 분석하기 위하여 합성 임피던스 해석을 수행 하였다. 그림 11은 2고조파 저감 기법 적용 전 전력계통도를 나타낸 것이다. 그림에서 변압기 전원 측 Bus-Bar 임피던스와 부하측 Bus-Bar 임피던스는 설치 길이가 매우 짧아 임피던스 계산을 무시하였다. 변압기 전원측 선로는 단심 케이블 185SQ 2가닥을 18(m)로 포설 하였으므로 변압기 케이블 선로의 (Km)당 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 임피던스는 $0.841+j0.901(\Omega)$ 이 된다. 또한 6.6(Kv) 선로 임피던스는 전력회사의 154(Kv) 모선 기준용량 100(MVA)로 환산하면 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 변압기 전원 측 선로 임피던스 값은 $1.732+j1.856(\Omega)$ 이다. 그림 15의 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 변압기의 퍼센트 임피던스는 $0.61+j6.34$ 이다.

앞에서와 같이 동일하게 100MVA 기준용량으로 환산하면 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 변압기 퍼센트 임피던스는 $34.857+j362.285(\Omega)$ 이다. 단, 2고조파 발생 시 변압기 부하측의 능동필터 조건은 정지 조건으로 한다.

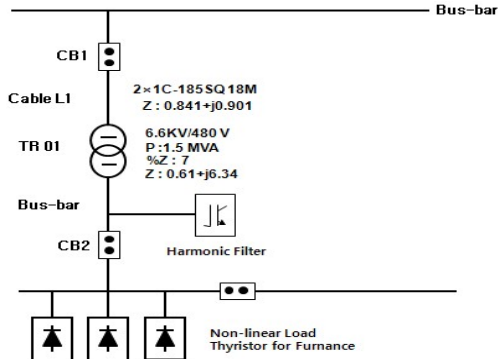


그림 11 2고조파 저감 기법 적용 전 전력계통도
Fig. 11 Power Line Diagram without the Second Harmonic Elimination Scheme

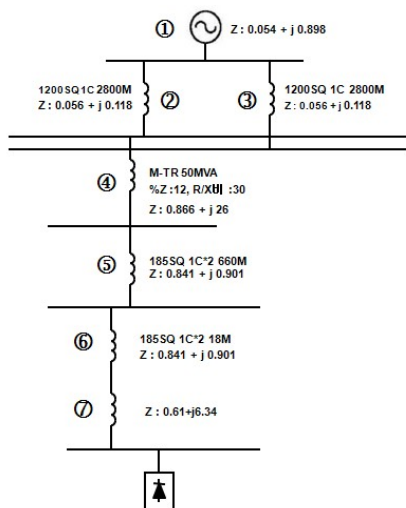


그림 12 2고조파 저감 기법 적용 전 임피던스 계통도
Fig. 12 Impedance Line Diagram without the Second Harmonic Elimination Scheme

그림 12는 2고조파 저감 기법 적용 전 임피던스 계통도를 나타낸 것으로 ①부터 ⑦의 직렬 임피던스는 그림 15의 전력 계통 항목들에 대한 임피던스를 계산한 것이다. 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 한전측의 정상분 임피던스 ①은 100(MVA) 기준용량기준 $0.054+j0.898(\Omega)$ 이다. 한전변전소에서 수용가까지 설치된 선로는 2개이며 각 케이블의 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 임피던스 ②,③는 $0.056+j0.118(\Omega)$ 이며 154(KV) 수전선로는 상시 루프 운전 조건 상태에 있다. 수전 변압기의 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 임피던스④는 $0.866+j26(\Omega)$ 이며 주변전실에서 현장 전기실까지 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 선로 임피던스 ⑤는 $0.841+j0.901(\Omega)$ 이며 현장 전기실은 그림의 차단기(Circuit Breaker)CB1 2차측에서 단상변압기 전원측까지 2고조파

(120(Hz)) 주파수에 대한 선로 임피던스 ⑥은 $0.841+j0.901(\Omega)$ 이고 전기로 전원공급용 단상 변압기 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 임피던스 ⑦은 $0.61+j6.34(\Omega)$ 이다. 직렬 회로의 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 합성 임피던스를 계산하면 $102.137+j539.535(\Omega)$ 이고 단상 전력계통에서의 비선형 부하 인입점에서 합성 임피던스 값은 $549.11(\Omega)$ 이다.

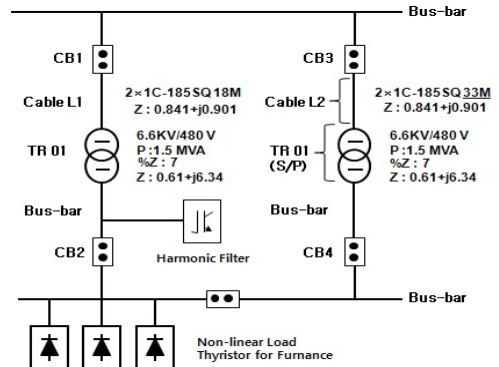


그림 13 2고조파 저감 기법 적용 후 전력계통도
Fig. 13 Power Line Diagram with the Second Harmonic Elimination Scheme

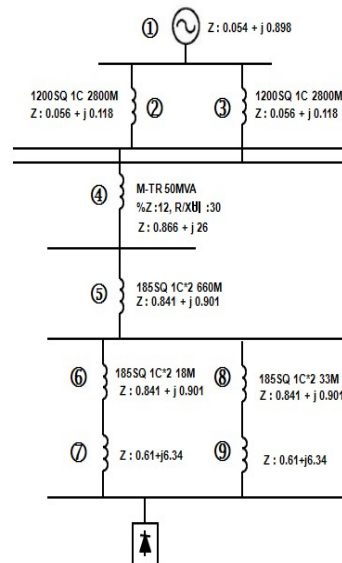


그림 14 2고조파 저감 기법 적용 후 임피던스 계통도
Fig. 14 Impedance Line Diagram with the Second Harmonic Elimination Scheme

그림 13은 2고조파 저감 기법 적용 후 전력계통도를 나타낸 것이다. 그림 15에서 2고조파 저감을 위하여 전원측 모선에 CABLE(L2) 과 변압기로(TR01 S/P) 구성된 계통 임피던스를 추가된 회로이다. 전력 계통은 변압기 병렬운전 시스템으로 운전이 가능하도록 변경 구성 되었다. 그림 14는 2고조파 저감 기법 적용 후 임피던스 계통도를 나타낸 것으로 ①부터 ⑨의 직렬 임피던스는 그림 17의 전력 계통 항목들에 대하여 임피던스를 환산한 것이다. 그림의 CB3 2차측은 33(m)길이의 CABLE(L2)을 포설하였으며 각 도체 저항값은

0.0991 (Ω/km)이며 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대해서 CABLE 185SQ 단면적의 임피던스 ⑧은 0.841+j0.901(Ω/km)이다. 또한 변압기(TR01 S/P)의 권선저항은 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대해 1차측 0.0668(Ω), 2차측 0.0001982(Ω)이며 단상 변압기 임피던스 ⑨는 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대해 0.61+j6.34(Ω)이다. 직렬 회로의 2고조파(120(Hz)) 주파수에 대한 합성 임피던스를 계산하면 81.296+j327.659(Ω)이며 비선형부하 인입점에서 합성 임피던스 값은 337.59(Ω)이다. 단상 전력계통에 2고조파 발생 시 그림과 같이 CB3를 투입하여 변압기(TR01 S/P)변압기 단독 무부하 운전 또는 병렬 운전을 통해 계통의 임피던스 인덕터 성분을 변화시켜 계통 운전방법 변경을 하였으며 이를 통하여 2고조파 저감을 얻을 수 있다. 2고조파 제거 기법을 적용하여 얻어진 2고조파 성분에 대한 임피던스 변화는 전력회사 기준용량 100 (MVA) 기준으로 211.52 (Ω)저감 효과가 있으며, 비선형부하 전원공급용 단상 변압기 정격용량 1.5 (MVA) 기준으로 3.17 (Ω) 저감 효과가 있다.본 논문에서는 이처럼 계통에 임피던스 용량을 변화시켜 2고조파 합성 임피던스를 저감시켜 2 고조파 문제점을 해결할 수 있는 기법을 제시하였으며 실증 실험을 통하여 타당성을 입증 하였다.

표 1 임피던스 변동 기법 적용 후 임피던스 변동 비교
Table 1 Impedance Comparision after Adoption of the Second Harmoni Eleimination Scheme

구 분	비선형 부하 인입점 임피던스(Ω)		임피던스 차이(Ω)
	2고조파 저감 기법 적용전	2고조파 저감 기법 적용후	
	100 MVA	549.11	
1.5 MVA	8.23	5.06	3.17

5. 실험 결과

본 절에서는 그림 1에 나타난 전력계통도의 부하 중 점선으로 표시된 480(V)/12(MVA) 산업 전기로(Furnace)부하에 대하여 2고조파 임피던스 변동 저감 기법 적용 실험을 수행 하였다. 단상 전력계통 2고조파 발생 시 그림 13에서와 같이 CB3를 투입하여 변압기(TR01 S/P)변압기 단독 무부하 운전 또는 병렬 운전을 통해 계통의 임피던스 성분을 변화시켜 2고조파 저감기법의 성능을 확인하기 위한 실험을 수행 하였다 .

5.1 2고조파 저감 기법 적용 전·후 실험

그림 15는 그림 1에 나타난 부하중 점선으로 표시된 480(V)/12(MVA) 산업 전기로(Furnace)부하에 대하여 2고조파 저감 기법 적용 전 전력 분석기를 이용하여 측정한 전압과 전류에 대한 파형을 나타낸 것이다. 그림 15(a)는 그림 2의 변압기 입력및 부하 측의 전압 파형을 나타낸 것이다. CH4는 변압기 전원입력 측의 전압파형(3,000V/div) CH1은 변압기 부하측 전압 파형(436V/div)이다. 그림 15(b)는 변압기 입력 및 부하 측 전류 파형으로 CH4는 변압기 전원 입력 측 전류파형(800A/div), CH1은 변압기 부하 측 전류파형

(3,000A/div)이다.

그림 16는 2고조파 임피던스 변동 저감 기법 적용 후(그림13에서 CB3 투입하여 변압기(TR01 S/P) 운전) 전압, 전류 파형을 나타낸 것이다. CH4는 변압기 전원입력 측의 전압파형(3,000V/div) CH1은 변압기 부하측 전압 파형(436V/div)이다. 그림 16(b)는 변압기 입력 및 부하 측 전류 파형으로 CH4는 변압기 전원 입력 측 전류파형(800A/div), CH1은 변압기 부하 측 전류파형(3,000A/div)이다.

그림 16에서 알 수 있듯이 2고조파 제거 후 부하측 전류 파형은 음과 양 대칭을 이루게 되었으며 비선형부하 SCR의 점도각 불균형 현상도 완전히 사라진 것을 알 수 있다. 이는 2고조파 제거로 계통이 정상운전 상태로 복귀된 것을 나타 내고 있다.

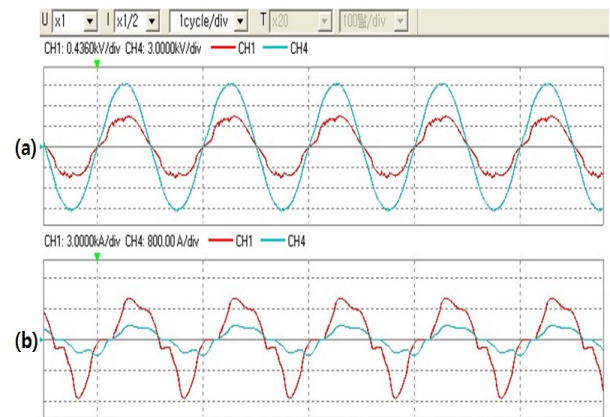


그림 15 2고조파 발생 시 전압, 전류 파형
Fig. 15 Voltage and Current Waveform without Second Harmonic Component
 x axis: 16.67(msec)/div

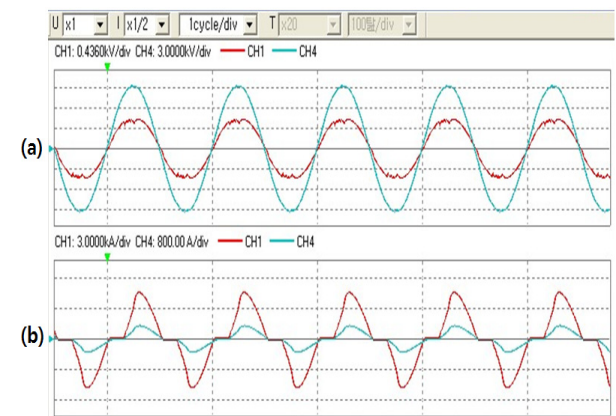


그림 16 2고조파 저감 기법 적용 후 전압, 전류 파형
Fig. 16 Voltage and Current Waveform with Second Harmonic Component
 x axis: 16.67(msec)/div

5.2 2고조파 저감 기법 적용전·후 주파수 FFT 분석

그림 17, 18는 그림 15의 2고조파 발생시 전압, 전류 파형에 대한 주파수 FFT 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 17

에서 2고조파 발생 시 전원 측에 비하여 부하 측 전압고조파 함유율이 2.24(%) 증가 하였다. 이 부분은 그림 15(a) CH1 변압기 부하측 전압 파형이 CH4는 변압기 전원입력 전압파형에 비하여 상대적으로 왜곡된 부분과 일치하는 결과이다.

그림 18에서 2고조파 발생 시 전원 측에 비하여 부하 측 전류고조파 함유율이 14.79(%), 전원 측 전류고조파 함유율이 13.7(%) 증가 하였다. 계통 정상 운전 시 2고조파 발생 전 전류고조파 함유율은 평균 2(%) 수준이었으나 그림 18과 같이 2고조파 발생 시 14.79(%)로 7.4배 급증 하였다. 따라서 이와 같이 급증한 2고조파는 다른 4, 8 우수고조파를 발생시키며 이들 우수고조파는 전력용 변압기를 통해 전원 측으로 유입된다. 유입된 고조파 우수 고조파 전류는 전력계통에 순환되기 때문에 전력계통에 매우 심각한 운전 장애와 전력설비 기기절연 저하 등 치명적인 영향을 미치게 된다.

그림 19, 20은 그림 13의 2고조파에 저감 기법 적용 후 그림 16의 전압, 전류 파형에 대한 주파수 FFT 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 19에서 2고조파 제거 시 부하측 전압고조파 함유율은 0.4(%), 전원측 전압고조파 함유율은 0.15(%)가 발생되었다. 그림 20에서 2고조파 제거 시 부하측

전류고조파 함유율은 1.45(%), 전원측 전류고조파 함유율은 2.82(%)가 발생되었다. 그림 18에서 2고조파 발생 시 전원 측에 비하여 부하 측 전류고조파 함유율이 14.79(%, 전원 측 전류고조파 함유율이 13.7(%)에 비하여 2고조파 함유율이 급격히 감소 되었음을 알 수 있다.

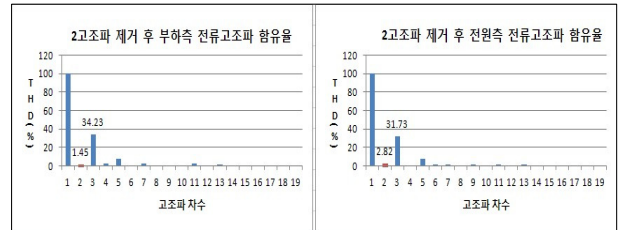


그림 20. 2고조파 제거 시 전류 파형 FFT 분석
Fig. 20 FFT Analysis for the Input Current after Eliminating the Second Harmonic

5.3 변압기 전원측(변압기 1차측) 및 변압기 부하측(변압기 2차측) 실효치 전류변화 분석

그림 21은 2고조파 제거 시 변압기 전원측의(전압 6,600(V)) 운전전류 실효값 변화에 대한 그래프를 나타낸 것이다. 2고조파 발생 시 변압기 전원 측 기준 평균 운전전류의 실효치가 252(A)(실효값)이다. 논문에서 제시한 계통 임피던스 변동 기법을 적용한 후 2고조파가 제거되었으며 변압기 전원측의 운전전류는 그림 21과 같이 195(A)(실효값) 되었다. 따라서 변압기 전원측 기준 변압기 운전전류는 2고조파 전류 성분에 해당되는 57(A)(실효값) 감소되었으며 전류 감소율이 23(%) 효과가 있었다.

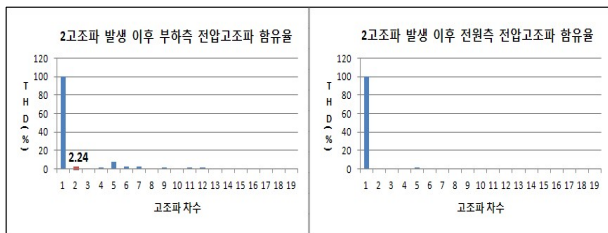


그림 17 2고조파 발생시 전압 파형 FFT 분석
Fig. 17 FFT Analysis for the Input Voltage with Second Harmonic

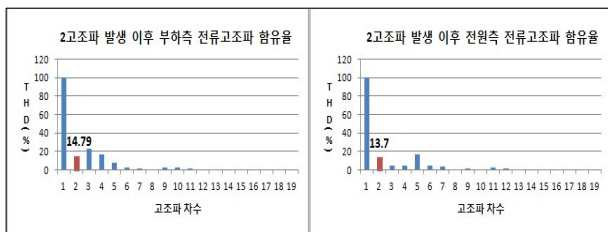


그림 18 2고조파 발생시 전류 파형 FFT 분석
Fig. 18 FFT Analysis for the Input Current with Second Harmonic

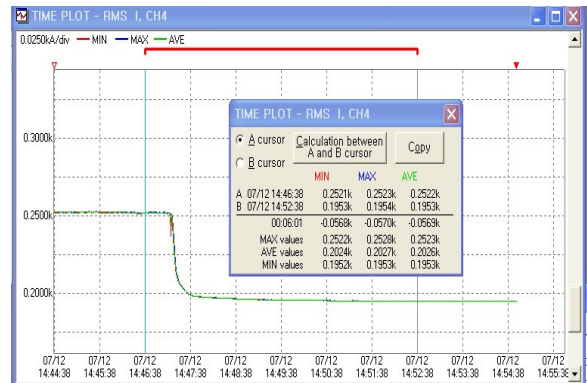


그림 21 2고조파 제거 시 변압기 전원측 전류변화 그래프
Fig. 21 Input Current Variation of The Transformer after Eliminating the Second Harmonic

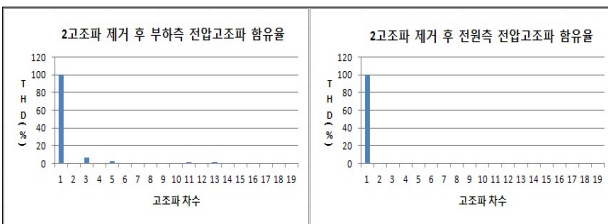


그림 19 2고조파 제거 시 전압 파형 FFT 분석
Fig. 19 FFT Analysis for the Input Voltage after Eliminating the Second Harmonic

그림 22는 2고조파 제거 시 변압기 부하측의(전압 480(V)) 운전 전류 변화에 대한 그래프를 나타낸 것이다. 2고조파 발생 시에 변압기 부하측 기준 운전전류가 2,819(A)(실효값)에서 본 논문에서 제시한 계통 임피던스 변동 기법을 적용한 후 2고조파가 제거되어 변압기 운전전류가 2,627(A)(실효값) 되었다.

따라서 변압기 부하측 기준 변압기 2고조파 전류가 192A(실효값) 감소되었으며 전류 감소율이 7(%) 효과가 있었다.

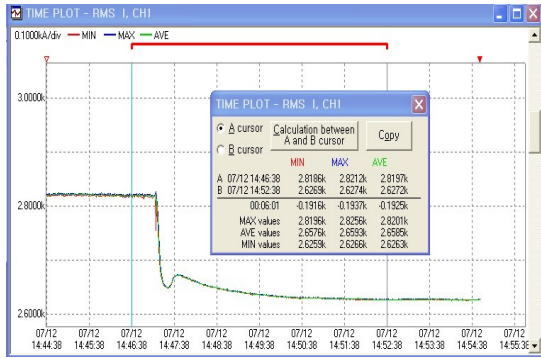


그림 22 2고조파 제거 시 변압기 부하측 전류변화 그래프
 Fig. 22 Output Current Variation of The Transformer after Eliminating the Second Harmonic

6. 결론

수십 MVA 단위 전력사용량을 가지는 산업 제조 장비 플랜트에서 발생하는 고조파(Harmonics)는 대부분 흡수 고조파 성분이지만 설비 운전 중 2고조파 성분의 우수 고조파도 간헐적으로 발생한다. 이 경우 입력 전류 파형 형태가 순간 비대칭으로 변하면서 2고조파 전류가 발생되면서 크기가 급격하게 증폭되고 전원계통으로 2고조파가 전류가 유입되어 계통에 순환되면서 변압기 편차현상을 일으켜 철심포화, 소음, 진동 등을 동시에 수반하고 전력설비에 중대 고장요인이 발생될 수 있다.

본 논문에서는 2고조파 전류 증폭과 이에 따른 계통의 전력시스템 전반에 악 영향을 끼치는 2고조파 발생 영향을 실증 사례를 통해 분석 및 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 계통 임피던스 변동 기법을 제안 하였으며 이를 통하여 2고조파 제거 성과를 산업 현장에서 실증 실험을 통하여 2고조파 전류 함유율이 13.34(%) 감소효과와 2고조파로 인한 변압기 운전전류 변화에 대한 이상 현상이 발생 이전의 상태로 정상적으로 회복되는 것이 확인되었다. 실험을 통하여 변압기 전원측 기준 변압기 운전전류는 2고조파 전류 57(A)(실효값)를 감소 시켜 전류 감소율 23(%) 효과를 얻었으며, 변압기 부하측 기준 변압기 2고조파 전류 192(A)(실효값) 감소시켜 7(%) 전류 감소율을 얻을 수 있었다.

감사의 글

This work was supported by the 2013 Industry University Research Cooperation grant funded by the Korea government (Small and Medium Business Administration).

References

[1] Y. Kim, 2005, "ABB Active Filter", KIEE Electric Apparatus Committee Conference Proceeding, pp. 111-121
 [2] H. Bang, 2012, "Second Harmonic Elimination Scheme for Industry Plant", KIEE Power Engineering Conference Proceeding, pp.246-249
 [3] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical

Power Systems, New York, NY: IEEE.
 [4] IEEE Std 519 Working Group Website, <http://grouper.ieee.org/groups/519>
 [5] P. Jee, 2012, "Power Quality Analysis Based on measurement for High Power Plant", KIEE Trans., pp.82-86
 [6] S. Yoo, 2002, "Techniques for Power Protection System", Kidari Press, pp.135-148
 [7] S. Lee, 2010, "Harmonics Analysis and Elimination Schemes with Short Current Technique", Kidari Press, pp.122-132
 [8] J. Lee, 2010, "Case Study of Harmonics Analysis and Elimination Schemes", Sungandang Press, pp.97-118
 [9] Y. Jung, 2010, "New Electric Apparatus Handbook No.4", Yeeje Electric Apparatus Press
 [10] H. Choi, 2010, "Power Equipment and Apparatus with IEC Standard", Sungandang Press, pp.103-112
 [11] C. Melhorn, T. Davis, G. Beam, 1998, "Voltage Sags: Their Impact on the Utility and Industrial Customers", in IEEE IA Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 3, pp.549-558
 [12] G. Joos, L. Morán, 1998, "Principles of Active Power Filters", Tutorial Course Note. of IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting
 [13] H. Akagi, 1996, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning," in IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp.1312-1322
 [14] J. K. Phipps, J.P. Nelson, P. K. Sen, 1994, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 30, No 2, pp.176-184
 [15] J.H. Galloway, "Harmonic Instability in Phase Controlled Rectifiers," IEEE PCIC conf. record 1999, pp. 171-175.
 [16] A. H. Hoevenaars, "The Answer to Harmonics: Is it Mitigation or a Robust Transformer?", CEE News, The Power Quality Advisor, pp PQ14-17, February 2000.
 [17] I. C. Evans, "Methods of Mitigation", Middle East Electricity, pp 25-26, December 2002
 [18] S.P. Kennedy, "Design and Application of Semiconductor Rectifier Transformers", IEEE PCIC conf. 2001 record pp.153-159.

저 자 소 개



방희균 (龐喜均)

1974년 7월 24일생, 1995년 충청대학교 전기공학과 졸업, 2013년 국립공주대학교 전기전자제어공학과 졸업(석사), 2002년 7월-현재 Samsung Co.,Ltd. Assistant Manager/Electrical Department



김시경 (金時慶)

1964년 5월 15일생, 1986년 고려대학교 전기공학과 졸업, 1994년 Texas A&M University 전기전자공학과 졸업(박사), 1994년 9월-현재 국립 공주대학교 교수