

The Response to Impulse Signal on Three Phase Transformer using Vector Network Analyzer

벡터 회로망 분석기 측정을 기반으로 한 3상 변압기의 시간영역 펄스 신호에 대한 응답 분석

Kwangho Kim*†, Jongman Jung**, Wansoo Nah*
김광호*†, 정종만**, 나완수*

* Dept. of Electrical and Electronic Eng. Sungkyunkwan Univ., Seobu-ro 2066, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

** KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34056, Korea

† fogshower@skku.edu

Abstract

Transformer is widely used element on power system and industrial area. Especially the transformers installed at power system are exposed to an environment of arbitrary changed. Thus the prediction of degradation and the analysis of response to impulse are important. To conduct those works, the electrical characteristics of system should be analyzed, effectively. But the analysis of electrical characteristic in electric machine level such as pole and pad-mounted transformer is almost no, thus commercial VNA (Vector Network Analyzer) is used to getting the response in wide frequency range. However, the output power of VNA is usually under 10mW, so verification for effectiveness of measuring electrically large component should be conducted, firstly. Next, after getting total S-parameter of transformer, predicting impulse response can be performed in time-domain with circuit simulator. In this paper, it is introduced that verification effectiveness of VNA using transfer function from SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer), firstly. Next, total S-parameter, six by six matrix form, was built using measured 2 port S-parameter from vector network analyzer. To get the response to impulse which is defined by IEC 60060-1, time-domain simulation is conducted to ADS (Advanced Design System) circuit simulator.

Keywords : Scattering parameter, three phase transformer, SFRA, impulse response

I. 서론

전력계통에서 사용되는 50 kVA급의 주상 변압기는 각 상에 독립적으로 연결되어 13.2 kV의 전압을 230 V로 강하시키는 역할을 한다. 이를 하나의 기기로 대체하기 위하여 3상 변압기를 사용 할 수 있으나, 회로적 분석이 간단한 단상 변압기와는 달리 철심을 공유하는 3상 변압기의 구조 특성 상 등가회로 모델링이 힘들며 따라서 전자기적 특성의 분석이 어렵다 [1]-[5]. 이와 같은 시스템을 분석하는 데 있어 효율적인 회로망 파라미터 중 산란 파라미터(Scattering parameter)를 이용할 수 있다. 하지만 산란 파라미터를 계측하기 위하여 사용되는 상업용 벡터 회로망 분석기(VNA, Vector Network Analyzer)는 회로기판(PCB, Printed Circuit Board) 및 집적회로(IC, Integrate Circuit)와 같은 상대적으로 작은 구조를 측정하기 위하여 10 mW 내외의 출력을 갖게끔 설계되어 있다 [6]. 따라서 전기용량이 큰 주상변압기의 경우 저출력을 갖는 벡터 회로망 분석기의 계측을 통해 얻을 수 있는 산란 파라미터의 신뢰성을 검증하여야 한다. 또한 회로망 분석기는 포트 수의 증가에 따른 비용이 크게 증가하므로, 2포트를 사용하며 이에 따라 2포트 이상의 시스템 파라미터를 계측하는 방법에 대하여 논의 되어야 한다.

본 논문에서는 변압기의 진단 및 전기적 특성 계측에 사용되는 SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer)로부터 얻을 수 있는 각 상에서의 전달함수(Transfer function)을 기준으로 하여 벡터 회로망 분석기 측정으로 얻은 산란 파라미터를 변환한 전달함수와 비교하여 회로망 분석기의 주상변압기 계측이 신뢰성을 가짐을 2장에서 보일 것이며, 3장에서는 3상 변압기의 전체 6포트 정의와 2포트 산란 파라미터로부터 6포트 파라미터를 조립하는 방식에 대하여 다룰 것이다. 이로부터 얻은 6 포트 산란 파라미터를 이용하여 ADS (Advanced Design Simulation) 회로 해석 툴에 적용하여 몇 가지 입력 신호에 따른 시간 영역 시뮬레이션 결과를 4장에서 보일 것이며, 특히 넓은 주파수 영역을 가지는 펄스의 형태를 갖는 입력 신호에 따른 타 상에서의 응답을 시뮬레이션 하여 분석할 것이다. 이에대한 결론을 5장에서 설명하고자 한다.

II. 산란 파라미터 정의와 SFRA를 이용한 회로망 분석기 계측의 검증

회로망 파라미터의 종류는 Z 파라미터, Y 파라미터, ABCD 파라미터 그리고 산란 파라미터가 있다. 이 파라미터들은 입력-출력의 종류에 따라 따라 정의 방법이 다

르나 이론상 서로간의 변환이 가능하다. 특히 Z 파라미터는 그 정의가 전압과 전류의 비를 나타낸 것으로 직관적이며 계측의 용이함으로 인해 사용하나, 시스템 상에 존재하는 N개의 포트에서 각각의 단락 및 개방상태로 중단시키는 방법이 넓은 주파수영역에서 해당 임피던스를 만족할 수 없기 때문에 높은 주파수에서는 파라미터 값을 정확히 얻을 수 없다. 이에 반해 산란 파라미터는 포트에 접속하는 기준 임피던스(50 Ω)를 넓은 주파수 영역에서 만족하도록 설계하여 다음의 식 (1)과 같이 각 포트의 투입전압 대비 입사전압의 비로 나타낼 수 있다 [6][7].

$$[\mathbf{V}^-] = [\mathbf{S}][\mathbf{V}^+], \dots S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \Big|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j} \quad (1)$$

위 식에서 j는 투입 전압의 포트 번호이며, i는 입사전압의 포트이다. 단, j포트에서의 전압 투입 시 나머지 포트에서는 전압을 투입시키지 않고, 나머지 포트에서 산란 파라미터가 기록된다. 순차적으로 마지막 포트까지 전압을 투입하여 N²개의 산란 파라미터를 N행 N열의 매트릭스로 나타낸 것을 식 (1)의 좌측처럼 나타낼 수 있으며, 모든 포트는 기준 임피던스(50 Ω)로 종단되어야 하여 한다. 따라서 벡터 회로망 분석기는 측정 포트가 넓은 주파수에서 50 Ω을 유지하도록 설계되어 있다.

산란 파라미터를 얻고자 하는 3상 변압기는 H1, H2, H3부싱의 22.9 kV 3상 입력과 X1, X2, X3부싱의 400 V 3상 출력으로 구성되어 있으며, 1차측의 기준은 외함으로 잡혀 있고 2차측의 기준은 X0로 되어 있다. 이에 대한 그림을 Fig. 1의 (a)에 나타내었으며, 내부 철심의 구조 및 권선에 대한 대략적인 형상을 (b)에 나타내었다. 3상 변압기의 철심은 삼각 형태이며, 지상변압기와 같은 일자형과는 차지하는 부피 면에서 더 적다는 장점이 있다. 이러한 구조의 3상 변압기의 부싱의 개수는 총 6가지로, 이에 따라 이 시스템은 6포트로서 정의가 가능하다. 편의성을 위하여 같은 상은 포트가 인접하도록 (H1-X1 : port 1-port2) 하였으며 이를 Fig. 1의 (c)에 동일한 위치의 의미를 갖는 포트의 이름과 부싱을 같이 나타내었다. 이와 같이 정의된 6개의 포트에 대한 산란 파라미터를 얻기에 앞서 SFRA의 전달함수와 벡터 회로망 분석기의 결과를 비교하여 회로망 분석기의 변압기 레벨에서의 측정에 대한 신뢰성을 얻고자 한다. SFRA는 측정 방식에 따라 크게 한쪽 측에서 전압비를 얻는 방식인 End-to-end, 한 측에서 전압-전류 비를 계측하는 Input admittance, 그리고 1차측과 2차측 간의 전압 비율을 주파수에 따라 비교하는 Transfer voltage로 나눌 수 있다 [8]. 이 세 가지 측정 방법 중 보편적으로 사용되는 방법으로 계측하기 위하여 다음 Fig. 2에 나타내었듯이 End-to-end 계측 방식을 택하였으며, 3개의 각 상에 대하여 개방 및 단락 측정을 진행하였다. 이로부터 얻을 수 있는 전달함수는 입력단의 전압과 출력단 50 Ω에 걸리는 전압의 크기 및 위상의 비율을 이용하여 구할 수 있다. 계측에 사용된 SFRA는 Tettex사의 FRA-5310 모델을 사용하였으며, 20 Hz부터 2 MHz까지 로그 스케일로 측정하

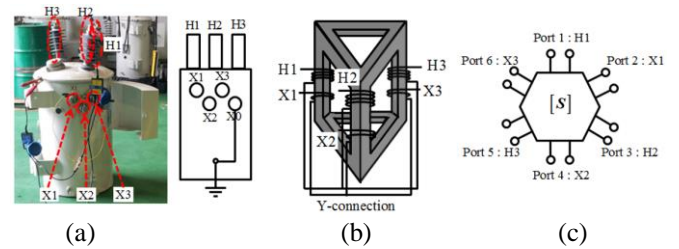


Fig. 1. 3상 변압기의 (a) 실제 구조와 (b) 내부 권선 모형 및 (c) 부싱 별 포트 정의

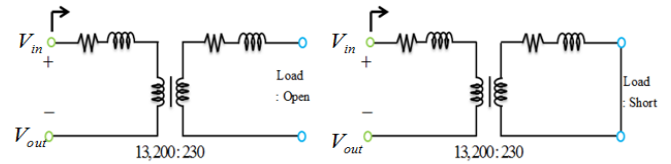


Fig. 2. SFRA를 이용한 end-to-end 방식의 개방(좌)측정과 단락(우)측정

였다.

벡터 회로망 분석기로 이 전달함수를 얻기 위하여, Fig. 2의 입력과 출력에 걸선되는 2개의 선(terminal)을 하나의 포트로서 하여 1포트 계측을 할 수 있으며, 산란 파라미터의 정의에 따라 포트에서 얻을 수 있는 값은 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = \Gamma_{in} \Big|_{\text{load=open,short}} = \frac{Z_{in} - Z_{ref}}{Z_{in} + Z_{ref}} \quad (2)$$

여기서 Z_{ref}는 회로망 분석기 내부 임피던스 (50 Ω)이며, Z_{in}은 포트에서 바라본 변압기의 입력 임피던스이며, 2차측의 개방 및 단락 상태에 따라 달라질 수 있다. 기준 임피던스는 정해져 있는 값이므로 식 (3)의 좌측을 이용하여 입력 임피던스를 구할 수 있으며, 우측 식을 이용하여 전달함수로 변환이 가능하다.

$$Z_{in} = Z_{ref} \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}, \dots \quad H(\omega) = \frac{50}{Z_{in}(\omega) + 50} \quad (3)$$

이렇게 계측된 산란 파라미터로부터 변환된 전달함수를 SFRA에서 얻은 전달함수와 비교하였으며, 1차측 3상에서 비교한 전달함수를 Fig. 3에, 2차측 3상에서 비교한 전달함수를 Fig. 4에 나타내었다. 각 부싱에서 동일하게 나타나는 차이는 개방 상태의 전달함수에서 1 kHz미만의 주파수 영역의 회로망 분석기로부터 변환된 전달함수가 더 높은 값을 가지며, 공진 주파수 또한 더 높은 곳에서 형성된 것을 확인할 수 있다.

즉, 임피던스 면에서 회로망 분석기가 더 낮은 값을 가짐을 보였으며 이는 권선에 형성된 전류의 크기가 다르기 때문에 철심 내부의 포화도의 차이가 생기며, 따라서 2차측의 임피던스가 높은 경우인 변압기의 개방상태 측정 시 1 kHz미만의 저주파 영역은 비선형 특성을 가지는 철심의 임피던스가 지배적이기 때문에 나타나는 차이라고 볼 수 있다 [2]. 즉, 출력이 20 V인 SFRA에 비하

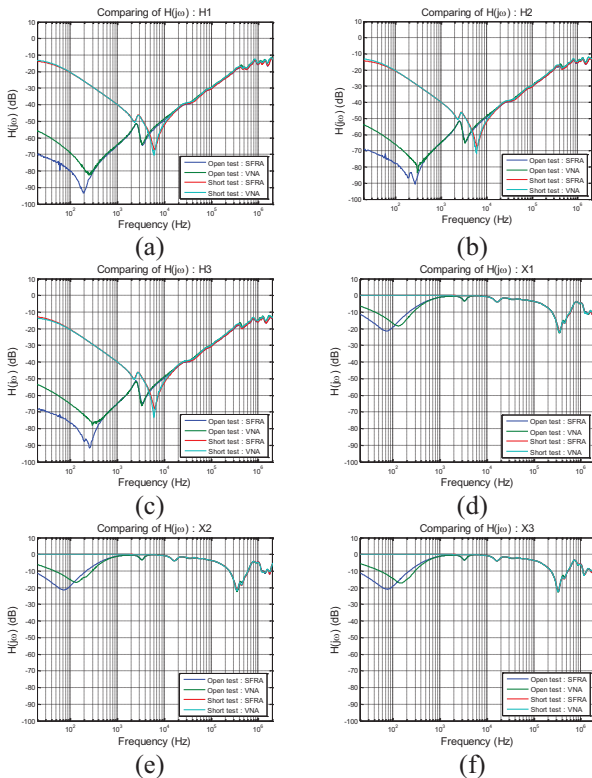


Fig. 3. SFRA와 회로망 분석기로부터 얻은 개방 상태 및 단락 상태의 전달함수 비교: (a) H1(Port 1). (b) H2(Port 3). (c) H3(Port 5). (d) X1(Port 2). (e) X2(Port 4). (f) X3(Port 6)

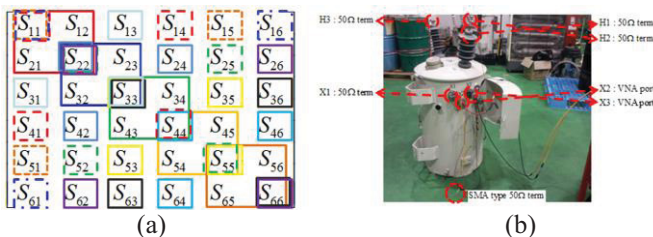


Fig. 4. (a) 2포트 산란 파라미터를 이용한 3상 변압기의 전체 매트릭스의 조립과 (b) X2-X3(port 4-port6)측정상태에서의 나머지 포트 중단 모습

여 회로망 분석기는 출력이 10 mW(50 Ω 기준 0.707 Vrms)로 낮기 때문에, 철심 내부의 자기 포화가 충분히 일어나지 못하여 발생한 차이로 결론지을 수 있다. 그에 반해, 철심의 임피던스 영향이 적은 단락 상태의 전달함수는 잘 일치함을 볼 수 있으며, 권선 간의 구조에 따라 결정되는 표유정전용량이 두드러지게 나타나는 고주파 영역에서는 오히려 두 가지 측정이 일치함을 확인할 수 있다. 3상 변압기의 임펄스 특성에 대한 분석에 앞서 임펄스 신호는 넓은 주파수 영역을 가지고 있으며, kHz 이상의 주파수 성분을 가지고 있기 때문에, 자기포화에 따른 회로망 분석기의 부족한 출력에 의한 저주파 영역에서의 차이는 일정 부분 무시될 수 있다. 따라서 임펄스에 의한 분석에서는 벡터 회로망 분석기를 통한 3상 변압기의 측정이 1 kHz 이상에서의 주파수에서 신뢰성을 가짐을 알 수 있다.

III. 2포트 산란 파라미터를 이용한 전체 산란 파라미터의 조립

산란 파라미터를 측정하기 위한 상업용 벡터 회로망 분석기는 보통 2포트로 이루어져 있으나, 포트 수의 증가에 따른 비용이 많이 증가한다. 따라서 앞서 정의한 3상 변압기와 같은 6포트 시스템의 경우 2포트 산란 파라미터를 통한 시스템의 전체 산란 파라미터의 재현이 필요하다. 식 (1)에서 정의하였던 산란 파라미터의 정의에서 조건은 시스템 내의 다른 포트의 임피던스가 50Ω으로 중단되었을 때의 전압비를 산란 파라미터라고 하며, 이를 측정에 적용하기 위해서는 2포트 벡터 회로망 분석기 외의 나머지 4개의 포트를 50 Ω의 임피던스로 중단하여야 한다. 이와 같은 과정을 통해 얻을 수 있는 경우의 수는 중첩을 제외하고 6C_2 가지, 즉 15가지가 존재하며 각각의 2포트 측정으로부터 얻을 수 있는 4개의 파라미터는 전체 산란 파라미터를 구성하는 요소로 근사화 시킬 수 있다. 이에 대한 전체 파라미터 대비 2포트 측정의 요소를 시각적으로 표현하여 Fig. 4의 좌측에 나타내었으며, 실제 측정에서는 Fig. 4의 우측과 같이 중단 임피던스를 위해 SMA 타입의 동축 50 Ω term을 적용하였다. 측정에 사용된 회로망 분석기는 Agilent 사의 E5061B모델을 사용하였으며, 전기적 교정은 85633E kit를 사용하였다. 측정은 5 Hz부터 100 MHz까지 수행되었으며, 주파수 변환은 로그 스케일로 하였다. 전체 산란 파라미터에서 같은 색과 선 종류의 사각형이 의미하는 것은 한 번의 2포트 측정으로부터 얻을 수 있는 4개의 요소들을 의미하며 특히 대각 항 ($S_{11} \sim S_{66}$)은 측정 과정에서 5번씩 겹침을 알 수 있다.

이론 상 나머지 포트를 50 Ω으로 중단하였으나 주파수에 따른 중단 임피던스의 변화로 인해 조립한 전체 산란 파라미터의 신뢰성을 얻으려면 겹치는 대각 항들의 수렴 정도를 이용하여 비교하여야 하며, 이에 따른 6가지의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 앞선 SFRA와의 결과 비교로부터 벡터 회로망 분석기의 낮은 전력과 비선형 특성을 가지는 철심에 의해 1 kHz 미만의 값에서 전달함수의 크기 차이가 낮으나, 전체 산란 파라미터를 얻기 위하여 나머지 4개의 포트를 50 Ω으로 중단하였으므로 철심의 임피던스보다 2차측의 임피던스가 낮게 형성되어 비선형 특성에 의한 변화가 상대적으로 적으며, 각각의 모든 포트는 같은 전력을 입사하기 때문에 비선형 특성은 고려하지 않는 상태로 측정한다. 홀수의 포트인 1차측(H1, H2, H3)에서 본 결과는 1 MHz까지의 넓은 영역에서 약 -1 dB의 값을 가졌으며 이는 50 Ω 임피던스에서 바라 보았을 때, 대부분의 전력이 반사되어 다시 돌아옴을 알 수 있다. 즉, 1차측의 3개의 포트에서 바라 보았을 때, 기준 임피던스 50 Ω과 차이가 많이 남을 의미한다. 하지만 이에 반해 짝수의 포트인 2차측(X1, X2, X3)에서 본 산란 파라미터의 크기는 약 1 kHz미만에서 -10 dB의 값을 가졌으며 이로서 얻을 수 있는 결론은 2차측의 입력 임피던스가 1차측의 입력 임피던스보다 기준 임피던스에 더 가까움을 유추할 수 있다. 이 6개의 대각 산란 파라미터의 크기 비교로부터 전체 산란 파라미터

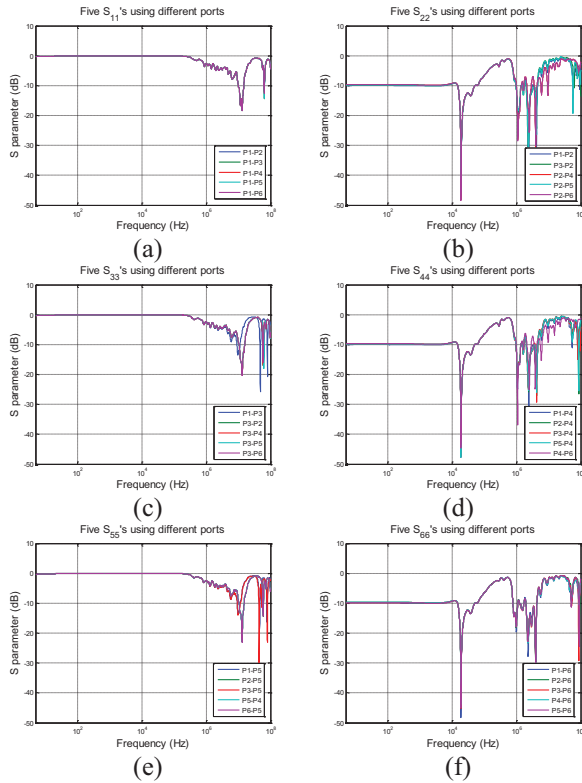


Fig. 5. 3상 변압기의 전체 산란 파라미터 조립의 신뢰성을 검증하기 위한 접치는 대각 항의 파라미터 크기 비교 : (a) S_{11} , (b) S_{22} , (c) S_{33} , (d) S_{44} , (e) S_{55} , (f) S_{66}

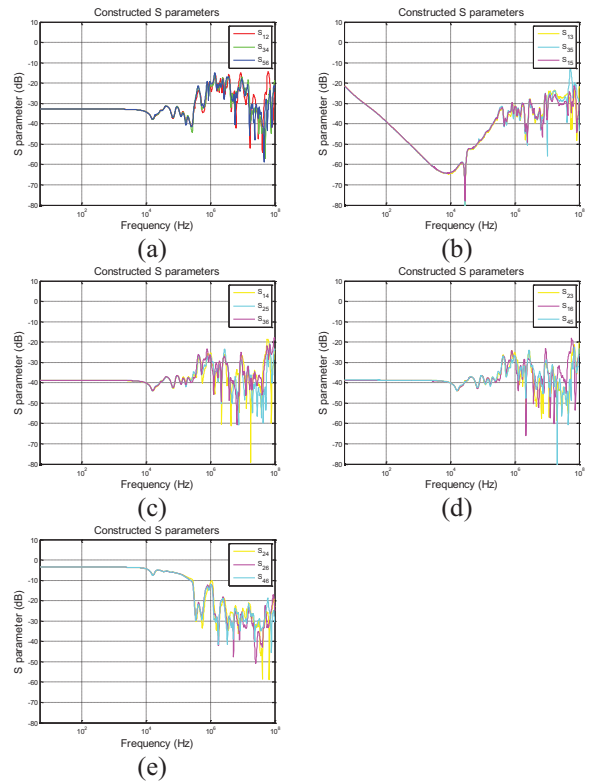


Fig. 6. 조립된 3상 변압기의 전체 산란 파라미터 중 대칭성을 갖는 비대각 파라미터: (a) H1-X1,H2-X2,H3-X3, (b) H1-H2,H2-H5,H1-H3, (c) H1-X2,H2-X3,H3-X1, (d) H1-X3,H2-X1,H3-X2, (e) X1-X2,X2-X3,X3-X1

의 조립 과정이 10 MHz까지의 주파수까지 잘 일치하였으며 따라서 조립된 산란 파라미터의 주파수가 10 MHz까지 유효함을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 36개의 산란 파라미터는 A,B,C 각 상에 따라 대칭을 이루도록 3개씩 (H1-X2, H2-X3, H3-X1) 나타낼 수 있으며 총 12개의 그림 중 5개의 비대각 요소에 대하여 Fig. 6에 각각 나타내었다.

위의 비대각 요소 파라미터들로부터 얻을 수 있는 3상 변압기에 대한 정보는 (a)와 같은 동상으로서의 1차측-2차측간의 전달과 (c)와 (d)같은 타 상의 1차측-2차측 전달이 약 6 dB정도 차이가 난다. 이는 앞서 설명하였던 측정에 사용된 3상 변압기 철심의 구조로부터 각 상의 권선이 철심을 공유하는 특성 상 자계회로가 각 상에서 병렬로 연결되어 있으며, 각 상이 감고 있는 철심의 면적이 동일하다 할 때, 각각의 상의 철심 릴럭턴스는 동일하므로, 전류에 의해 생성된 자속(Ψ)이 동상에 비해 절반만큼 전달이 되며, 이를 로그 형태로 나타내기 위해 $20\log 0.5$ 를 해 주면 -6 dB를 얻을 수 있다. 1차측간의 전달과 2차측 간의 상 전달은 앞선 Fig. 5의 분석과 마찬가지로 2차측의 임피던스가 상대적으로 기준 임피던스와 비슷하여 전달이 높게 일어난 것을 볼 수 있다. 이와 같은 일련의 검증 과정을 통하여 3상 변압기의 6행 6열 전체 산란 파라미터를 얻을 수 있었으며 이를 하나의 시스템 회로망으로서 사용할 수 있다.

IV. 3상 변압기의 산란 파라미터를 이용한 시간 영역 시뮬레이션을 기반으로 한 임펄스 응답 분석

앞서 제안한 방법으로 확보한 산란 파라미터는 넓은 주파수 영역의 정보를 가지고 있다. 따라서 주파수-시간 영역의 변환 중 하나인 푸리에 변환을 이용하여 시간 영역에서의 응답을 얻을 수 있다. 특히 임펄스와 비슷한 형태의 신호와 같이 넓은 주파수 대역을 가지는 신호의 경우 넓은 주파수 영역에서의 정보가 필요하며, 산란 파라미터는 이러한 응답 특성을 얻는 것에 장점을 가지고 있다고 할 수 있다. 3상 변압기의 임펄스 응답을 얻기 위하여 입력 파형 정의 및 산란 파라미터 적용은 ADS (Advanced Design System) 회로 시뮬레이터를 이용하였으며 동상 및 타 상에서의 응답을 분석하였다.

A. 임펄스 신호 정의

입력 신호에 사용하고자 하는 임펄스 신호는 KN61000-4-5과 IEC 60060-1에서 정의한 상승시간 1.2 μ s 반치시간 50 μ s, 각각의 오차는 30%, 20%내를 만족하는 신호이다 [9]. 임펄스 신호의 계측을 얻기 위하여 임펄스 발생기로부터 인가한 최대 1kV의 크기를 가지는 임펄스를 얻었으며, 이에 대한 파형 및 상승 및 반치시간을 Fig. 7에 상세하게 나타내었다. 측정으로부터 얻은 상승 시간 및 반치시간은 1.1 μ s, 46 μ s이며 이는 허용 오차 내에 들기 때문에 규격에 의한 임펄스를 만족한다고 할 수 있다. 임펄스 파형 계측 시 펄스 파형의 특성 상 상승시간이 매우 짧기 때문에, 이에 대한 변화를 정확히 계측하기 위하여 오실로스코프의 샘플링 시간을 100 ns로 설정하였다. 이로 인해 상대적으로 변화가 적은 구간

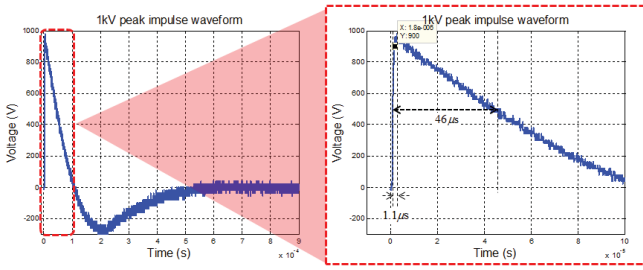


Fig. 7. 1kV의 최대치를 가지는 임펄스 신호의 상승시간 및 반치시간

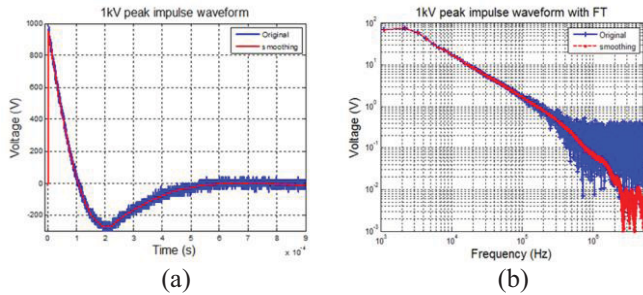


Fig. 8. Smooth 함수를 적용한 (a) 임펄스 파형비교와 푸리에 변환을 통한 (b) 주파수 영역에서의 비교

인 안정 구간에서는 변화 대비 계측 포인트 수가 많아 노이즈처럼 보이는 것을 확인할 수 있다. 본래 주기적인 함수의 계측 시에는, 이러한 노이즈와 같은 여러 성분을 여러 번 중첩하여 평균을 내어 제거할 수 있지만, 임펄스 생성기는 충전 시간이 상대적으로 오래 걸리므로, 한번 계측한 데이터를 사용하였다. 따라서 시뮬레이션 상의 대안으로 하강 구간에 한하여 Matlab상의 smooth 함수를 이용하여 노이즈 성분을 제거하였으며 시간 영역에서의 비교 파형을 Fig. 8의 좌측에 나타내었다. 하지만 실측 파형의 후처리는 기존의 정보를 왜곡 시킬 수 있으며, 따라서 이에 대한 주파수 분석을 비교한 것을 Fig. 8의 우측에 로그 스케일의 주파수와 크기로 나타내었다. 계측 파형에 비해 수백 kHz 이상의 주파수 성분, 즉 사이드로브(sidelobe)가 전반적으로 감소한 것을 확인할 수 있으며, 샘플링 시간 (100 ns) 에 의해 형성된 푸리에 변환에서의 최대 주파수 5 MHz는 3상 변압기의 전체 산란 파라미터가 유효한 10 MHz 내에 형성되어 있어 임펄스에 의한 응답을 보기에 적절하다. 특히 임펄스 파형의 정보를 담고 있는 2.2 kHz~100 kHz의 주파수 대역에서는 후처리 신호와 계측 신호의 주파수 성분이 상당히 일치하므로, 노이즈가 감소된 smooth를 이용한 파형을 시간 영역의 시뮬레이션에 사용하였다.

B. ADS를 이용한 3상 변압기의 시간 영역 시뮬레이션

3상 변압기의 산란 파라미터는 조립한 Matlab 프로그램 내에서 touchstone 형식으로 추출이 가능하며, ADS에서 회로 모델로서 불러올 수 있다. 계통에 사용되는 변압기 이므로, 60 Hz의 저주파 3상 입력에 대한 출력을 확인할 필요가 있다. 다음의 Fig. 9는 시뮬레이션 회로도 와 22,900 V 3상에 대한 입력을 넣었을 때 3상 변압기의 3상 출력에 대한 응답을 보이고 있으며, 입력 및 중단

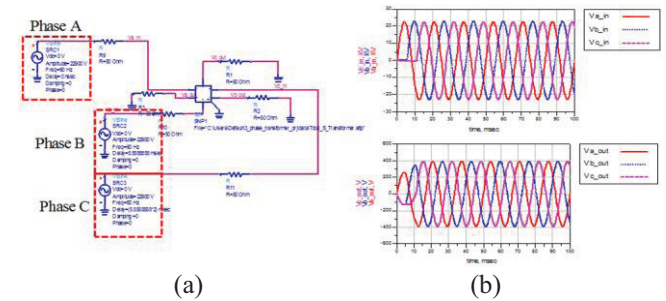


Fig. 9. 산란 파라미터를 이용하여 (a) ADS에 만든 60Hz 22.9kV 입력에 대한 회로 시뮬레이션 셋업과 (b) 입력 3상 파형(상) 및 출력 3상 파형(하)

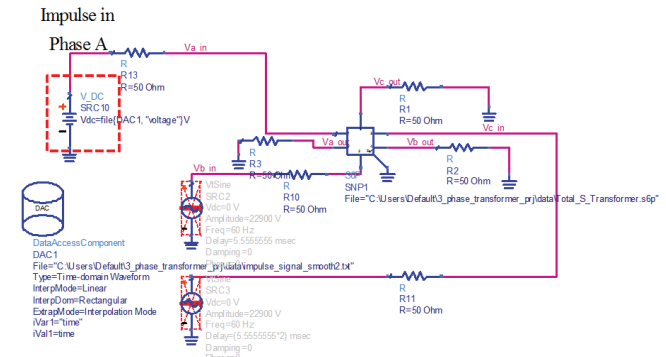


Fig. 10. 산란 파라미터를 이용한 ADS상의 임펄스 인가 회로 시뮬레이션 셋업

임피던스는 50 Ω으로 가정하였다. 각 상의 입력은 60 Hz 사인 형태의 파를 입력하였으며 각 상은 1주기에서 120도만큼 위상을 가지도록 설정하였다. 입력단의 3개의 상과 출력단의 3개 상에서 위상은 동일하게 형성되었으며, 안정영역에서 최대값은 400 V를 가짐을 확인할 수 있었으며, 따라서 전압에 의한 권선비가 잘 맞게 형성됨을 알 수 있다.

다음으로, 앞서 정의한 1 kV 임펄스를 3상 변압기 산란 파라미터에 적용하기 위해서 Matlab으로부터 출력한 파형을 ADS에 적용하였다. 이 때 필요한 소자는 DAC (Data Access Component) 파일이며 텍스트 및 touchstone 형태의 파일들을 데이터화 시켜주는 소자이다. 계측으로부터 얻은 임펄스 파형을 적용하기 위하여 Fig. 9와 같은 회로도를 이용하되, A상에 입력이 되도록 하였다. 임펄스의 최대 값이 1 kV이며, 이는 입력 계통 22.9 kV에 비하여 상당히 작은 값이기 때문에, 순수하게 임펄스 자체가 동상 및 타 상에 미치는 효과를 보기 위하여 60 Hz의 22.9 kV 입력을 없앤 상태로 인가하였다. 이에 대한 회로는 Fig. 10에 나타내었으며, 그에 대한 입력 단 및 출력단에서의 결과를 Fig. 11에 나타내었다. A상의 직류 전원은 임펄스 데이터 파형을 그려내기 위하여 적용하였고, 나머지 중단 임피던스는 60 Hz 시뮬레이션과 마찬가지로 모두 50 Ω으로 가정하여 진행하였다. A상 입력은 계측 및 smooth를 적용한 임펄스와 동일하며, B와 C의 입력단에는 전압이 거의 형성되지 않음을 알 수 있다.

그에 반해 출력에서는 동상에서 약 11 V 최대치를

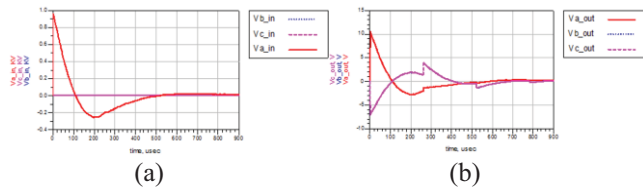


Fig. 11. 임펄스 인가 시뮬레이션의 입력단과 출력단에서의 파형

가졌으며 타 상에서는 위상이 180도 바뀐 상태로 -7 V 최소값을 가졌다. 이로부터 세 가지 결과를 확인할 수 있는데, 첫째로 3상에서의 산란 파라미터 분석으로부터 동상의 2차측과 타 상의 2차측은 유기되는 전압 크기가 절반으로 -6 dB가 차이남을 볼 수 있었으나, 임펄스에 대해서는 약 0.63정도인 -3.9 dB 정도의 차이를 가짐을 확인하였다. 둘째로, 22.9 kV 입력에 대하여 동상에서는 약 400 V의 출력이 확인되어 전압 비가 약 57.25:1을 가짐을 알 수 있으나, 임펄스의 최대치 비는 약 100:1이 형성됨을 알 수 있었다. 마지막으로 세 번째는 총 임펄스 시간인 0.9 ms 내에서 타 상에 반사가 형성되어 약 260 μ s마다 연속적이지 않은 파형이 감쇄되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 세 가지 결과는 60 Hz 근처의 저주파 특성과는 달리 상대적으로 주파수 성분이 높은 임펄스 파형에 대한 응답이므로 특성이 변화하여 생기는 차이이다. 앞서 살펴보았듯, 해당 임펄스 입력에 따른 최대치는 동상인 A상에서 11 V, B와 C상에서 -7 V으로 400 V에 비해 약 2.5%, 1.7%를 차지하고, 입력 최대치가 계통의 3상 전압 22.9 kV 최대치와 비교하여 4.36%를 차지하지만 임펄스 응답에 대한 입력 대비 출력비율이 선형적이라 할 때 입력 단에서 최대치의 30%만큼 임펄스 크기가 넘어서와 같은 요인에 의해 형성될 경우 동상의 출력단에서 약 17%, 타 상의 출력단에서 11.7%만큼 전압 변동이 있을 수 있다. 이러한 결과는 계통에서 상당한 변화라고 보여지며, 각 상이 독립적으로 형성되는 단일 주상 변압기에 비해 자기 커플링에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다.

V. 결론

3상 주상 변압기의 전기적 특성을 얻기 위하여, 벡터 회로망 분석기를 이용하였다. 하지만 10 mW 내외의 낮은 출력에 의해 주상 변압기와 같은 전기적으로 큰 구조를 계측함에 있어 신뢰성 검증을 선행하여야 했고, 이를 end-to-end 방식의 SFRA 측정으로부터 얻은 개방 및 단락 상태의 전달함수 비교를 통해 회로망 분석기의 계측이 개방 상태인 1kHz미만의 주파수 영역을 제외하고 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 3상 변압기는 6개의 부상에 따라 6포트 시스템으로 정의할 수 있으나 통상적으로 사용하는 회로망 분석기는 2포트이므로, 전체 6행 6열의 산란 파라미터를 얻기 위해서 계측 시 남은 4개의 포트에 대해 50 Ω 종단을 해 주었으며, 조립 시 전체 산란 파라미터 대각 요소간의 비교를 통해 10 MHz 미만의 영역에서 산란 파라미터 조합이 유효한 값을 가

짐을 보였다. 이렇게 얻은 전체 산란 파라미터를 첫째로 22.9 kV 60 Hz 사인과 입력에 대하여 시간 영역 시뮬레이션을 수행하였으며, 400 V의 3상 출력이 나오는 것을 확인하였다. 임펄스에 대한 동상 및 타 상의 영향을 확인하기 위하여 IEC 60060-1로부터 정의된 1 kV 최대의 1.2 μ s / 50 μ s파형을 A상에 인가하였으며, 그에 대한 출력으로 동상 최대 11 V, 타 상 최소 -7 V크기의 전압 응답을 얻을 수 있었다. 계통 전압에 비해 인가한 임펄스 크기가 낮으나, 약 30% 크기의 임펄스가 인가되었다고 했을 때, 출력으로 400 V 최대치 기준 동상에 17%, 타 상에 11.7%만큼 유기 전압이 생성될 것으로 보이며 따라서 철심을 공유하는 3상 변압기의 경우 독립적인 3개의 주상 변압기와 비교하여 임펄스에 전기적으로 취약함을 알 수 있었다. 결론적으로 제안한 방법을 이용하여 여러 포트를 가지는 변압기 레벨의 기기들에 대하여 산란 파라미터를 얻음이 유효함을 보였으며, 이를 이용한 시간 영역에서의 시뮬레이션을 통해 펄스에 대한 응답을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (grant number : R14XA02-38)

REFERENCES

- [1] De leon, Francisco, et al. Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2009, 24.1: 160-168.
- [2] Chimklai, S., and J. R. Marti. "Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 10.3 (1995): 1316-1325.
- [3] Pedra, Joaquín, et al. "PSPICE computer model of a nonlinear three-phase three-legged transformer." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 19.1 (2004): 200-207.
- [4] Chen, Xusheng, and S. S. Venkata. "A three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 12.2 (1997): 775-782.
- [5] Brandwajn, V., H. W. Donnel, and I. I. Dommel. "Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies." *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 6 (1982): 1369-1378.
- [6] Dunsmore, Joel P. *Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques*. John Wiley & Sons, 2012.
- [7] Pozar, David M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [8] Jayasinghe, J. A. S. B., et al. "Winding movement in power transformers: a comparison of FRA measurement connection methods." *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* 13.6 (2006)
- [9] International Eletrotechnical Commission. "IEC 60060-1 Standard." *High voltage test techniques* 1994 (1994).