

IQ 복조 기법을 이용한 광대역 접지 임피던스 측정기의 설계 및 구현

김영진 · 길형준* · 김성주 · 김재형†

창원대학교 메카트로닉스대학 전기전자제어공학부 · *전기안전연구원
(2016. 8. 4. 접수 / 2016. 10. 25. 수정 / 2016. 11. 2. 채택)

Design and Implementation of Wideband Grounding Impedance Measurement Device using IQ Demodulation Method

Young-Jin Kim · Hyung-Jun Gil* · Sung-Ju Kim · Jae Hyung Kim†

Changwon National University · *Electrical Safety Research Institute

(Received August 4, 2016 / Revised October 25, 2016 / Accepted November 2, 2016)

Abstract : One of key parameters on lightning protection system design of electric, information and communication system is grounding impedance. Earth impedance includes numerous information about earthing performance of grounding system. This paper suggests grounding impedance measuring device which is comprised of wideband current source, voltage and current measuring components. We used IQ Demodulation to measure more accurate phase difference of voltage and current. The range of frequency is up to 1 MHz that is IEEE defined as the range of lightning surge. We compared developed grounding impedance measuring device with existing one to test its performance, and we used grounding system while we implemented measurement and analysing by using fall of potential method IEEE Std.81 proposed.

Key Words : grounding impedance, grounding system, IQ demodulation, DSP

1. 서론

접지 시스템은 전기, 정보통신 기기의 고장전류나 뇌격전류를 효과적으로 대지에 방출하여 인체의 안전성을 확보하며 기기의 고장과 파손을 방지하는 역할을 한다. 현재까지는 측정 방법의 복잡화 및 해석의 미정립으로 인하여 계통전원에 대한 접지 저항 해석이 주로 이루어지고 있다.

낙뢰 등의 서지나 노이즈의 경우 높은 주파수 성분을 포함하기 때문에 레지스턴스, 인덕턴스, 커패시턴스를 포함한 임피던스 차원의 고려가 필요하다.

또한 접지시스템의 고주파 임피던스는 접지시스템의 고주파 특성에 대한 성능에 큰 의미를 포함하고 있다.

따라서 본 논문에서는 접지 임피던스 측정을 위하여 광대역 전류 발생기, 전압, 전류 측정기로 구성된 접지 임피던스 측정기를 설계 하였으며, 임피던스 측정시 사용될 전압과 전류의 위상차 검출의 정밀성을 위하여 디지털 동기복조 신호처리 알고리즘을 이용하

여 Inphase 및 Quadrature 성분을 추출하는 I/Q 복조방식을 적용하였다¹⁾. 디지털 I/Q 복조기는 ALTERA DSP Bilder를 이용하여 설계와 시뮬레이션을 한 후 FPGA에 구현을 하였다.

본 논문의 2장에서는 I/Q 동기복조방식을 이용한 임피던스 측정 알고리즘, 3장에서는 접지 임피던스 측정기의 구현에 대하여 설명하였다. 그리고 4장에서 측정 시험 및 결과를 기술하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺었다. 본 논문을 통하여 접지저항 측정방식이 확인할 수 없는 접지시스템의 고주파영역에서의 주파수 특성을 확인할 수 있다.

2. 접지 임피던스 측정방법

접지 임피던스의 측정방법은 측정전류를 인가하기 위하여 사용하는 보조전극에 따라 2전극법, 3전극법, 전위강하법으로 분류된다. 전위강하법은 주로 대규모 시스템에서 접지 임피던스의 정확한 측정에 적합하며,

* Corresponding Author : Jae Hyung Kim, Tel : +82-55-213-3664, E-mail : hyung@changwon.ac.kr

College of Mechatronics Engineering, Changwon National University, 20 Changwondae-ro Uichang-gu Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51140 Korea

현재 가장 널리 사용되는 방법이다. 전위강하법은 다시 보조전극의 배치에 따라 61.8%법칙을 적용하는 E-P-C 일직선으로 배치하는 방법과 전위보조 전극과 전류보조 전극을 90도 배치하는 수정된 전위강하법이 사용된다. 전위강하법을 응용한 측정방법은 또한 대규모 접지설비에서 낮은 접지 임피던스를 측정할 때 인가하는 전류에 따라 세분화되며, 표류전류에 의해 나타나는 노이즈의 영향을 제거하는 방법에 따라 다양한 방법이 제시되고 있다²⁾.

2.1 전위강하법 및 복소 접지 임피던스

전위강하법(fall-of-potential method)은 접지저항을 측정하는 방법의 하나로서 무한 원점에 대한 전위상승을 기준으로 하며, 현실적으로 유한 구간의 전위 상승을 택하고 있다. 유한구간을 정하는데 있어서 보조전극의 위치선정이 중요한데 전위강하법은 보조전극의 위치에 대한 영향이 작아 소규모 접지전극 뿐만 아니라 대규모 접지 시스템과 같이 낮은 접지 저항을 가지는 접지시스템에도 적합한 방법이다.

접지 전극에 전류 I[A]를 유입하면 접지 전극의 전위가 무한 원점의 대지에 비해 V[V]만큼 높아지는데 이때의 전위 상승과 접지 전류의 비 V/I가 접지 전극의 접지 저항이 된다. 전위 강하법을 이용한 접지 저항의 측정계의 구성은 Fig. 1과 같으며, Fig.에서 G는 피 측정 접지 전극이고, CP, PP는 측정용의 보조 전극이다. CP와 PP는 G로부터 적당한 거리에 설치하는데, CP가 전류 보조전극, PP가 전위 보조 전극이다.

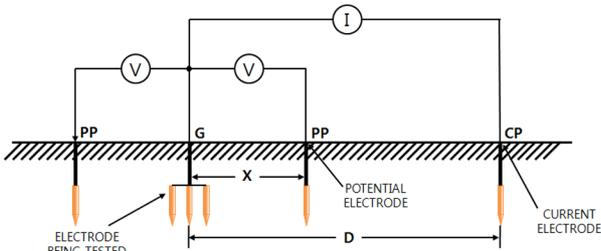


Fig. 1. Fall-of-potential method.

접지 임피던스의 측정은 접지 저항 측정법과 동일하게 구성하나 V와 I의 비와 위상차이 검출이 추가적으로 필요하다. 접지 임피던스는 식(1)과 같이 레지스턴스 성분 R과 리액턴스 X로 표현된다.

$$Z = R + jX \tag{1}$$

식(1)은 다시 절대치와 위상각으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z = |Z| \angle Z \tag{2}$$

단, $|Z| = \frac{|V|}{|I|}$, $\angle Z = \angle V - \angle I$

2.2 가변 주파수 신호의 크기 및 위상 검출 방법

접지 임피던스를 측정하기 위해서는 60 Hz~1 MHz의 가변 주파수를 가지는 전압(V)과 전류(I)의 RMS 및 위상을 측정해야 한다. 디지털 방식으로 신호의 위상 검출을 위해 사용 가능한 방법으로는 Zero-crossing 검출, sine-wave fitting, 그리고 FFT 위상검출법 등을 들 수 있다. 그러나 측정 현장에서 발생하는 잡음과 간섭 신호들을 억제하면서 정확한 측정을 하기 위해서는 가변의 측정 주파수를 중심으로 좁은 잡음 대역폭을 가지는 대역 통과 필터 기능이 필요하다. 본 연구에서는 검출된 광대역 신호를 AD변환한 후, I/Q 복조방식³⁾의 디지털 신호처리를 통한 동기 복조방식을 적용하여 간섭 제거 및 높은 신호대 잡음비를 얻을 수 있는 복소 임피던스 측정기를 제안하고 설계하였다. 임의의 크기와 위상을 가지는 정현파는 Fig. 2와 같이 Inphase 성분과 Quadrature 성분을 이용하여 복소평면에 나타낼 수 있다. 즉, I/Q 성분을 검출하면 신호의 진폭과 위상을 계산할 수 있다.

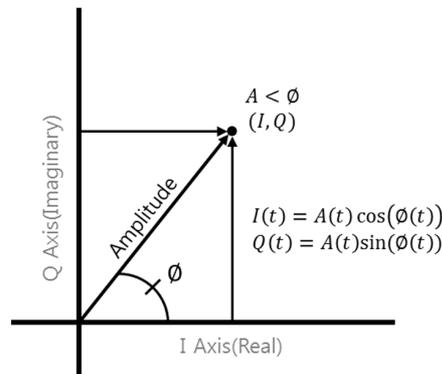


Fig. 2. I and Q represented in polar form.

Fig. 3은 전압 및 전류 신호의 RMS와 위상을 측정하기 위한 I/Q 복조기를 나타낸 것이다.

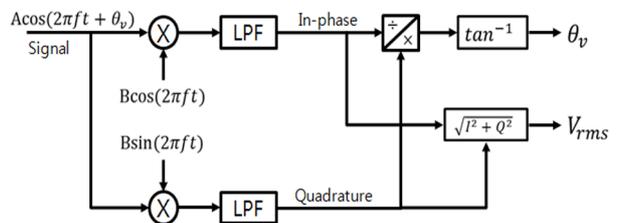


Fig. 3. Phase and amplitude detection process using IQ demodulation.

검출된 신호에는 잡음 및 간섭이 포함되어 식(3)과 같이 주어진다.

$$s(t) = A \cos(2\pi ft + \theta) + n_w(t) + n_i(t) \quad (3)$$

단, A , θ 는 측정 신호의 크기 및 위상, $n_w(t)$ 는 부가성 백색잡음, 그리고 $n_i(t) = C \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$ 는 특정 주파수 f_i 에 존재하는 간섭신호를 의미한다.

신호 $s(t)$ 는 측정 주파수와 동기된 기준 신호 $l_I(t) = B \cos(2\pi ft)$ 와 $l_Q(t) = B \sin(2\pi ft)$ 를 각각 곱하여 각각 Inphase 성분 $s_I(t)$ 와 Quadrature 성분 $s_Q(t)$ 로 주파수 변환시킨다. $s_I(t)$ 와 $s_Q(t)$ 는 각각 식(4)와 식(5)로 주어진다.

$$\begin{aligned} s_I(t) &= s(t)l_I(t) \\ &= \frac{AB}{2} \cos(\theta) + \frac{AB}{2} \cos(4\pi ft + \theta) \\ &\quad + n_w^I(t) + n_i^I(t) \end{aligned} \quad (4)$$

단, $n_w^I = B n_w(t) \cos(2\pi ft)$, $n_i^I = B n_i(t) \cos(2\pi ft)$

$$\begin{aligned} s_Q(t) &= s(t)l_Q(t) \\ &= -\frac{AB}{2} \sin(\theta) + \frac{AB}{2} \cos(4\pi ft + \theta) \\ &\quad + n_w^Q(t) + n_i^Q(t) \end{aligned} \quad (5)$$

단, $n_w^Q = B n_w(t) \sin(2\pi ft)$, $n_i^Q = B n_i(t) \sin(2\pi ft)$

식(4)와 식(5)에서 $n_w^I(t)$ 와 $n_w^Q(t)$ 는 광대역 백색잡음에 정현파가 곱해진 것이므로 신호의 통계적 특성변화는 없다. 따라서 백색 부가 잡음으로 존재한다. 또한 $n_i^I(t)$ 와 $n_i^Q(t)$ 는 $f_i - f$ 의 주파수 대역으로 천이된 간섭 신호이다. $s_I(t)$ 와 $s_Q(t)$ 는 LPF(Low Pass Filter) 통과시켜 $4\pi ft$ 의 주파수를 가지는 이미지성분과 $f_i - f$ 에 위치한 간섭신호를 제거하여 다음과 같이 대역 제한된 부가 잡음 (Band-limited Additive Noise)이 포함된 I/Q 신호를 얻을 수 있다.

$$\tilde{s}_I(t) = \frac{1}{2} AB \cos(\theta) + \tilde{n}_w^I(t) \quad (6)$$

$$\tilde{s}_Q(t) = -\frac{1}{2} AB \sin(\theta) + \tilde{n}_w^Q(t) \quad (7)$$

단, $\tilde{n}_w^I, \tilde{n}_w^Q$ 는 LPF에 의하여 대역 제한된 부가 잡음이며, LPF의 대역폭이 충분히 작을 경우

$$\tilde{s}_I \cong \frac{1}{2} AB \cos(\theta) \quad (8)$$

$$\tilde{s}_Q \cong -\frac{1}{2} AB \sin(\theta) \quad (9)$$

로 주어질 수 있으며, $\frac{\tilde{s}_Q}{\tilde{s}_I} \cong \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} = \tan(\theta)$ 에 의하여 θ 의 추정치는 식(10)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\tilde{s}_Q}{\tilde{s}_I}\right) \quad (10)$$

또한 진폭 A 의 추정치도 식(11)로 주어진다.

$$\hat{A} = \frac{2}{B} \sqrt{(\tilde{s}_I)^2 + (\tilde{s}_Q)^2} \quad (11)$$

3. 접지 임피던스 측정 장치 설계

접지 임피던스 측정 장치의 전체 구성도를 Fig. 4에 나타내었다.

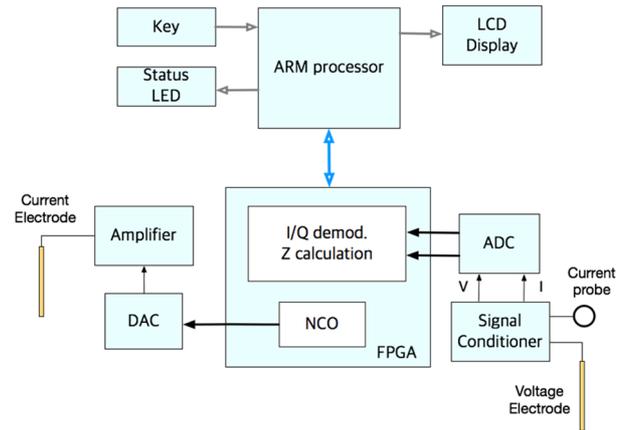


Fig. 4. Ground impedance measurement device configuration.

복소 접지 임피던스의 측정을 위하여 다음의 주요 기능을 설계 및 구현하였다.

- 가변 주파수 정현파 발생기 : 60 Hz~ 1 MHz 범위의 가변 주파수를 가지는 NCO (Numerically Controlled Oscillator)이며 FPGA로 설계
- 임피던스 측정기 : AD 변환된 전압 및 전류 신호의 I/Q 복조 및 임피던스 계산을 수행하는 블록이며 FPGA에 설계
- 제어 및 GUI : 측정기 제어 및 GUI 기능을 ARM 프로세서로 설계

3.1 광대역 전류발생기

접지 임피던스 측정과 주파수 의존성 분석에 적합한

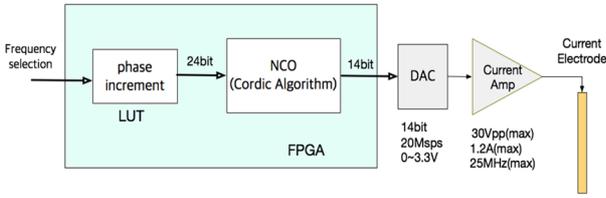


Fig. 5. Wideband variable frequency current generator.

전류를 발생시키기 위하여 전류전극에 인가할 신호는 앞에서 설명한 바와 같이 NCO를 이용하여 주파수 가변을 하도록 하였으며, 최대 30 Vpp의 전압으로 250 mA의 전류를 공급할 수 있는 광대역 전류증폭기를 DA 변환기에 장착하였다. Fig. 5는 광대역 가변 주파수 전류 발생기의 구성도를 나타낸 것이다. NCO는 CORDIC알고리즘을 이용하여 구현이 되었으며, 주파수는 Look-up table(LUT)에서 공급되는 24 bit의 위상증분 (Phase increment)을 선택함으로써 제어된다. 전류 증폭기는 GBP(Gain Bandwidth Product) 즉, $f_T = 25 \text{ MHz}$ 인 광대역 증폭기를 사용함으로써 1 MHz의 주파수에서 30 Vpp를 출력할 수 있도록 설계하였다.

3.2 임베디드 기반의 임피던스 측정장치 구현

Fig. 4에서 나타 내었듯이, 임피던스 측정장치는 임베디드 시스템 기반으로 설계를 하였다. 전압 및 전류의 I/Q 복조 알고리즘은 MATLAB Simulink환경에서 ALTERA DSP Builder를 이용하여 설계 및 시뮬레이션을 수행하고, FPGA에 구현하였다. FPGA에서 계산된 전압 전류 신호의 I/Q 값들은 ARM Processor에 전송이 되어 임피던스를 계산하고 디스플레이 된다. Fig. 6은 FPGA내의 I/Q 복조 기능을 나타낸 것이다.

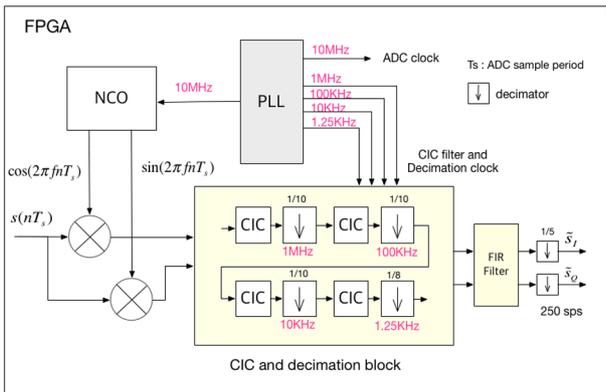


Fig. 6. I/Q Demodulator in FPGA.

(1) 주파수 변환 및 I/Q 검출

전압 및 전류 프루브에서 검출된 신호는 Signal conditioning 회로 및 14 bit AD 변환기를 통하여 10

Mps로 FPGA에 각각 입력된다. I/Q 분리를 위한 Local 신호는 광대역 전류 발생기의 NCO를 공유한다. 식(8)과 식(9)의 I,Q 성분을 검출하기 위하여 Fig. 6과 같이 CIC (Cascaded Integrator and Comb) 필터와 Decimation을 반복적으로 적용한다. 따라서 10 Mps의 전압 및 전류검출 신호는 간섭 신호와 부가잡음이 단계적으로 제거되면서 125 Hz의 잡음 대역폭을 가지는 저주파 신호 \tilde{s}_I 와 \tilde{s}_Q 로 출력된다. ARM 프로세서는 이를 이용하여 접지 임피던스를 계산한다.

(2) 복소 접지 임피던스 계산

I/Q 추정치 (\tilde{s}_I, \tilde{s}_Q), 식(10) 그리고 식(11) 이용하여 전압 및 전류의 진폭과 위상을 구할 수 있고, 식(1)과 식(2)를 이용하여 복소 접지 임피던스를 계산 할 수 있다. I/Q 값으로부터 임피던스의 계산 과정은 \tan^{-1} , 제곱근 등의 비선형 함수들을 이용해야하므로 ARM 프로세서에서 수행하는 것이 효율적이다. Fig. 7은 ARM 프로세서에서 수행하는 임피던스 계산 과정을 나타낸 것이다. \hat{V}_I, \hat{V}_Q 는 각각 전압의 I, Q 추정치, \hat{I}_I, \hat{I}_Q 는 각각 전류의 I, Q 추정치를 의미한다.

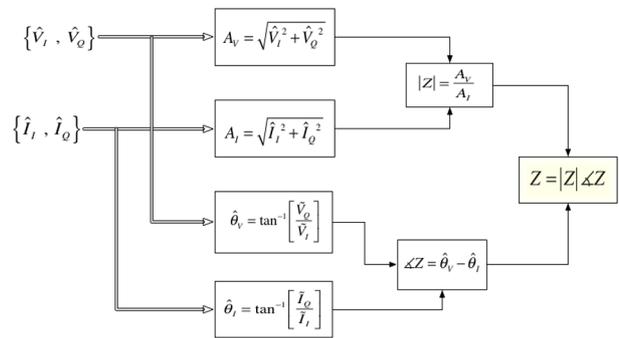


Fig. 7. Impedance calculation for the ARM processor.

4. 측정 시험 및 결과

3장에서 기술한 접지 임피던스 측정 장치는 현장에



Fig. 8. Earths impedance tester.



Fig. 9. GUI of earths impedance tester.

서 사용이 가능한 포터블장비로 실제 제작되어 그 성능을 시험하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 설계 제작된 접지 임피던스 측정기와 측정기의 GUI를 보여준 것이다.

(1) 임피던스 측정기 교정

전압 및 전류 프로브 검출신호는 아날로그 필터 및 증폭기로 구성된 Signal conditioning 회로를 각각 통과한 후 AD변환이 된다. 아날로그 회로의 주파수 응답 및 두 회로간의 특성차이는 검출 신호간의 위상차 및 진폭비 측정에 영향을 미칠 수 있으므로 표준저항을 이용한 교정이 필수적이다.

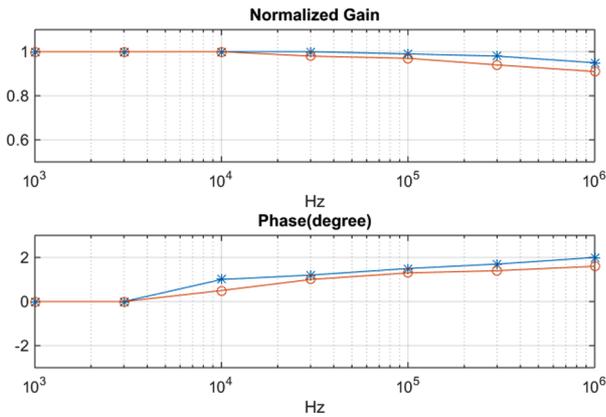


Fig. 10. Frequency characteristic of signal conditioning circuit.

(2) 측정시험

접지 시스템의 임피던스는 분포정수를 이용한 유손실 전송선로에 의하여 모델링이 될 수 있다. 그러나 본 논문에서는 제작된 임피던스 측정기의 성능 시험을 위하여 편의상 Fig. 11과 같이 집중형 소자를 이용하여 접지시스템의 모델을 구성하고 측정을 하였다. R_s 와 L_s 는 각각 접지 시스템 결선(interconnection)에서 발생하는 저항과 인덕턴스, R_p 와 C_p 는 각각 토양의 비저항과 가상 용량(Virtual capacitance)에 위해서 주어지는

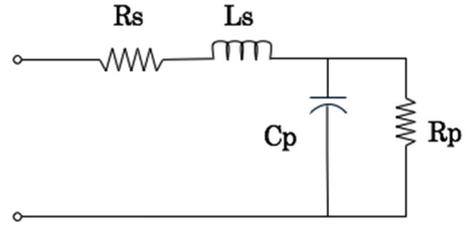


Fig. 11. Grounding system impedance model.

저항과 캐패시턴스를 의미한다.

임피던스 측정기의 성능 시험을 위하여 임의의 2가지 집중 정수 값들을 이용하여 회로를 구성하고 RLC meter 측정치의 평균값과 제작된 임피던스 측정기 (Z meter)의 10회 측정값들을 비교하여 Fig. 12, Fig. 13에 그 결과를 나타내었다. LCR meter의 평균치에 대하여 5% 이하의 측정 편차를 나타내고 있으며, 접지 시스템 시험 현장에서 사용이 가능한 포터블 접지 임피던스 측정기를 경제적으로 제작할 수 있음을 보이고 있다.

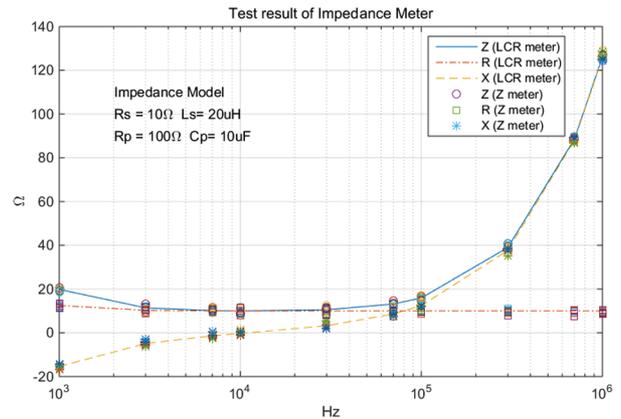


Fig. 12. Measurement test results. ($R_s = 10\Omega, L_s = 20\mu H, R_p = 100\Omega, C_p = 10\mu F$)

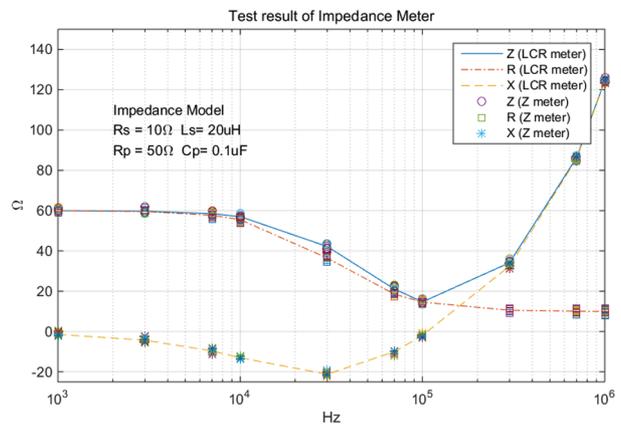


Fig. 13. Measurement test results. ($R_s = 10\Omega, L_s = 20\mu H, R_p = 50\Omega, C_p = 0.1\mu F$)

5. 결론

본 논문에서는 60 Hz~1 MHz 주파수대역의 접지 임피던스 측정 장치를 설계 및 제작하고 그 성능을 시험하였다. 복소 임피던스의 측정을 위하여 전압과 전류 신호의 위상차를 정확하게 추정하는 것이 요구되며, 이를 위하여 Digital 하향변환기, I/Q 분리, CIC decimation 등의 디지털 신호처리를 FPGA에 구현하였다. 제작된 임피던스 측정기는 표준 저항기를 이용하여 교정을 하여 아날로그 회로의 주파수 특성을 보상하였다. 성능 시험을 위하여 R,L,C 집중 소자를 이용한 접지 임피던스 모델을 설정하고 LCR meter의 반복측정 평균치를 참값으로 가정하여, 설계된 임피던스 측정기의 시험 결과와 비교하였다. 충분한 교정을 거친 경우 1 MHz 측정 주파수에서 5% 이내의 오차를 보였으며, 현장에서 사용이 가능한 포터블 접지 임피던스 측정기로 활용이 가능하다고 본다. 이로 인하여 기존 접지저항 측정방식에서 포함하지 않은 고주파 영역에서의 접지임피던스 특성을 확인할 수 있다.

감사의 글 : 이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비지원으로 수행된 연구결과임

References

- 1) C. Rader, "A Simple Method for Sampling In-phase and Quadrature Components," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, Vol. AES-20, No. 6, pp.821-824, 1984.
- 2) IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, 2000.
- 3) C. Ziomek and P. Corredoura, "Digital I/Q Demodulator", Particle Accelerator Conference, 1995, Volume 4, pp.2633-2655
- 4) IEC 62305-3, "Protection against lightning -Part 3:Physical damage to structures and life hazard", IEC TC 81, 2012.
- 5) C. W. Barnett, B. L. Laird, J. L. Blackburn, W. C. Kotheimer, J. R. Linders, D. R. Volzka, J. A. Zulaski and J. W. Walton, "Summary of the Guide for the Grounding of Instrument Transformer Secondary Circuits and Cases", IEEE Trans. on PD, Vol.3, No. 4, pp.1459-1465, 1988.
- 6) IEEE Std 1100-1999, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, IEEE Inc., pp.38-40, pp.128-129, 1999.
- 7) L. Greev and F. Dawalibi, "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems", IEEE Trans. on Power Del., Vol.5, No.4, 1990.