

열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정과 측정불확도

박정규^o, 박석주, 이환상, 장경승, 박명선
전파연구소이천분소

Uncertainty of Calibration using TVC for RF Multimeter

Park Jungkuy, Park Suckjoo, Lee Hwansang, Jang Kyungseung, Park Myungsun
Ichun Branch of Radio Research Laboratory, MOIC

ABSTRACT

측정의 소급성과 신뢰성을 확보한다는 전제하에 오차의 개념을 버리고 측정시의 측정불확도를 분석하는 것이 측정과학에 있어서 세계적인 추세이다. 본 논문에서는 전달표준인 열전압변환기를 사용하여 고주파전압계의 정밀 교정에서 불확도를 산출하기 위하여 수학적 모델을 설정하고 측정에 관계되는 모든 불확도 요인을 분석하였다. 케이블의 영향과 열전대감지기와 직류전압계의 상관관계, 직류소스, RF소스, 감쇠기, 반사계수와 DUT 등 측정에 있어서 관계되는 모든 불확도요인을 분석하여 확장불확도를 산출하였다.

1. 서론

전압측정이 의미를 가질 수 있는 주파수 한계는 전달표준(transfer standard)의 주파수 특성에 의해 제한된다. RF 전압의 1차표준은 NIST 등에서 제작한 Bolovac 이고 이러한 1차표준으로부터 소급되어 하위의 RF전압 측정기기의 성능평가를 하는데 이러한 상위의 표준으로부터 하위의 표준으로 전달해주는 표준을 전달표준이라 한다. 전달표준으로서 열전압변환기(TVC : Thermal Voltage Converter)나 RF 미소전압표준기(micropotentiometer)가 있는데 본 논문에서는 열전압변환기를 이용하여 주파수범위 100MHz-1GHz의 고주파전압계를 교정할 때 교정과정에 있어서 관계되는 불확도 요인을 분석하고 수학적 모델을 세워서 고주파전압계의 교정에 대한 측정불확도[1]를 산출하였다.

2. RF-DC차

열전압변환기의 특성[2]은 다음과 같이 정의되는 RF-DC차에 의해서 결정된다.

$$\delta(\%) = \frac{V_{RF} - V_{DC}}{V_{DC}} \times 100 \quad (1)$$

이 물리량은 RF전압 전달표준이 동일한 열적효과를 얻는데 요구되는 직류전압의 ± 두 방향에 대한 평균값과 RF 전압과의 차이의 비로서 정의되는데 여기서 V_{RF} 는 인가된 RF전압이며, V_{DC} 는 ±의 두 방향에 대한 평균이다.

열전압변환기의 특성인 RF-DC차를 알고 대체 직류전압을 측정하게 되면 RF전압을 결정할 수 있으며, 그 RF전압과 교정대상이 되는 고주파전압계로서 DUT의 측정값 V_{RF}^{DUT} 와의 비로서 다음과 같이 정의되는 교정인자

$$F = \frac{V_{RF}^{DUT}}{V_{RF}} = \frac{V_{RF}^{DUT}}{V_{DC}^{avg}(0.01\delta + 1)} \quad [3] \quad (2)$$

를 구함으로써 고주파전압계를 정확히 교정할 수 있다.

3. 측정시스템의 구성

측정시스템 전체의 구조는 그림 1과 같다. 구성요소는 열전압변환기, 신호발생기, DC소스, 직류전압계, 열전대감지기(직류전압계)와 감쇠기 등과 각종 케이블로 구성되었으며, 측정시 고주파 전압계인 DUT가 연결되어 전체 측정시스템을 이루고 있다. TVC는 Ballantine 1396A 이고 내부 구조는 그림 2와 같다.

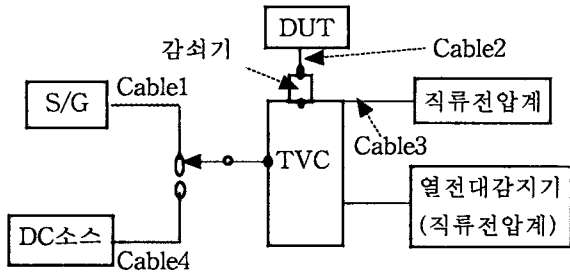


그림1. 시스템의 구성도

Ballantine 1396A 시리즈의 측정범위는 주파수 100-1000MHz 영역이며 전압은 7V까지이다. 정밀 교정을 위해 정합을 위한 감쇠기를 출력단에 연결하여야 한다. TVC는 내부에 T연결기가 내장되어 입력신호를 열전대와 출력으로 분기한다.

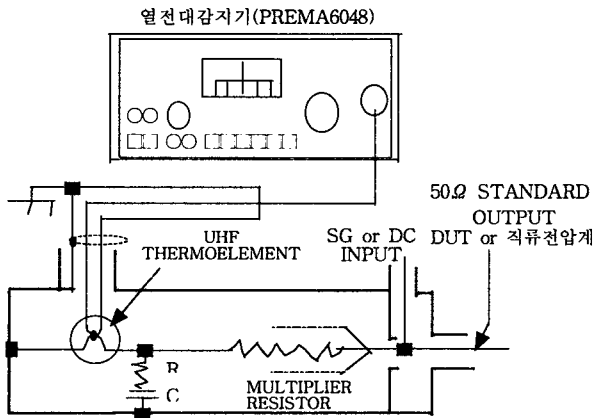


그림2 TVC의 내부구조

그 밖의 다른 측정 장비는 다음과 같다.

- 신호발생기(S/G) : R/S SMGL
- DC 소스 : Meter Calibrator ; Fluke 5700A
- 직류전압계 : PREMA 6048 (S/N 1159)
- 열전대감지기 : PREMA 6048 (S/N 1167)
- 감쇠기 : AGILENT 8491B

교정대상 DUT인 고주파전압계는 R/S에서 제작한 RF Millivoltmeter URV5, NRV-Z5 이다.

4. 수학적 모델

식 (2)에의 분자항은 실제 측정과정에서 DUT가 읽은 값과 정합을 위하여 사용한 감쇠기에 의한 감

쇠값의 보정항 ΔV_{att} 그리고 S/G에서 보낸 신호가 케이블을 통해 TVC의 입력단에 도달했을때 신호세기의 변동에 의한 보정값 ΔV_{SG} 을 고려하여야 한다.

즉 $V_{RF}^{DUT} \rightarrow V_{Read}^{DUT} + \Delta V_{att} + \Delta V_{SG}$ 로 대치되어야 한다. 한편 식 (2)의 분모항에 있어서 V_{DC}^{avg} 는 직류전압계가 읽은 \pm 양방향 전압의 평균값과 DC소스의 보정값 ΔV_{DC}^{sou} 을 더해주어야 한다.

즉 $V_{DC}^{avg} \rightarrow V_{Read}^{avg} + \Delta V_{DC}^{sou}$ 이 되어야 한다. 그러므로 식 (2)의 교정인자는 다음과 같이 변형된다.

$$F = \frac{V_{Read}^{DUT} + \Delta V_{att} + \Delta V_{SG}}{(V_{Read}^{avg} + \Delta V_{DC}^{sou})(0.01\delta + 1)} \quad (3)$$

위에서 보는 방정식이 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정 과정에서 교정인자에 대한 우리가 원하는 식이다.

5. 불확도 분석

불확도 전파법칙[4]에 따르면 합성 표준불확도는

$$u_c^2 = \sum_{i=0}^n c_i^2 u^2(x_i) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \text{로 주어진다.}$$

이 식을 변형된 교정인자에 대한 방정식 (3)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_F^2 = & \left(\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{DUT}}\right)^2 u_{V_{Read}^{DUT}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{att}}\right)^2 u_{\Delta V_{att}}^2 \\ & + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{SG}}\right)^2 u_{\Delta V_{SG}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{avg}}\right)^2 u_{V_{Read}^{avg}}^2 \\ & + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{DC}^{sou}}\right)^2 u_{\Delta V_{DC}^{sou}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \delta}\right)^2 u_{\delta}^2 \quad (4) \end{aligned}$$

여기서 각기 성분에 대하여 분석하면 다음과 같다.

- u_F : 교정인자 F에 대한 합성표준 불확도
- $u_{V_{Read}^{DUT}}$: DUT 자체에 의한 불확도와 DUT와 연결된 감쇠기의 반사계수의 영향에 의한 부정합 불확도의 합성 성분
- ① DUT불확도: DUT 매뉴얼의 분해능, 예러한계, digit등
- ② 부정합 불확도 : $\frac{|T||V_0|}{\sqrt{2}}$ [4]

- Γ : 감쇠기의 반사계수
- V_0 : S/G의 출력전압
- $u_{\Delta V_{eff}}$: 감쇠기의 감쇠에 의한 전압 불확도
 - 감쇠기 감쇠량 교정성적서 상의 불확도
- $u_{\Delta V_{SC}}$: 신호발생기의 교정성적서 상의 불확도
- $u_{V_{R_{rec}}}^{var}$: ① 직류전압계의 불확도로서 교정성적서의

불확도와 매뉴얼의 1년간의 accuracy에 의한 불확도(교정 이후 거의 1년이 경과하였기 때문에 고려한 항)의 합성

② 그림 1에서 열전대감지기(직류전압계)의 마지막 digit에 의한 불확도 성분으로서 마지막 digit가 한자리씩 올라감에 따라 그와 연동된 직류전압계의 측정값의 변동을 반복 측정함으로써 결정함.

이는 교정의 첫 번째 단계에서 S/G에서 보낸 신호가 TVC의 열전대를 통과하면서 열전 전압이 발생하는데 그때 열전대 감지기가 읽은 값과 교정의 두 번째 단계에서 S/G대신 직류전압을 인가하여 똑같은 열전대 전압을 얻기 위하여 첫 번째 단계에서 읽은 측정값을 두 번째 단계에서 같은 값으로 맞춤으로써 원하는 결과를 얻을 수 있으나 이 과정에서 마지막 자리의 digit가 같은 값을 지정 하더라도 digit의 분해능의 한계 때문에 두 비교값의 완전한 동일성을 보장할 수 없으므로 이에 대한 불확도 성분을 고려한 것임.

- $u_{\Delta V_{DC}}$: DC 소스의 교정성적서상의 불확도
- u_{δ} : 열전압변환기의 교정성적서상의 불확도

5. 케이블특성

그림 1의 측정시스템은 전체 5방향의 케이블로 구성되어 있다. 여기서 TVC 내의 열전대로부터 열전대 감지기인 직류전압계로 향하는 케이블은 측정 과정에서 불확도 성분으로 작용하지 않는다. 그러므로 본 측정에서는 4가지 방향의 케이블만을 고려하는데 직류 lead 케이블 2개와 RF케이블 2종이 있다. 케이블의 영향을 조사하기 위하여 각각의 케이블에 대하여 소스와 측정기를 직접 연결하여 소스에서 1V의 신호를 입력하고 측정기에서 직접 측정함으로써 그 값의 차이와 소스와 측정기의 불확도를 고려하였다. 그 결과는 표 1에서 보는바와 같다.

케이블	입력값(V)	주파수(MHz)	측정값(V)	SG불확도(V)
cable1	1	100	0.9890	0.0034
		500	0.9608	0.0034
		1000	0.9413	0.0034
cable2	1	100	1.0097	0.0034
		500	1.0088	0.0034
		1000	1.0104	0.0034
cable3	1	DC	0.9999987	0.0000020
cable4	1	DC	0.9999963	0.0000020

케이블	주파수	측정기불확도	합성불확도	보정값
cable1	100	0.000647	0.0036	+0.0076
	500	0.000647	0.0036	+0.0358
	1000	0.000647	0.0036	+0.0553
cable2	100	0.000647	0.0036	-0.0063
	500	0.000647	0.0036	-0.0054
	1000	0.000647	0.0036	-0.0070
cable3	DC	0.0000040	0.0000045	0
cable4	DC	0.0000040	0.0000045	0

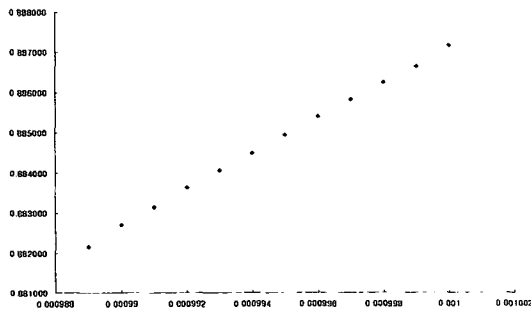
표 1 케이블에 의한 영향

cable2의 길이는 130cm 이고 나머지 케이블은 115cm 이다. 표1에서 보듯이 cable1과 2는 1V의 입력소스에 대해 불확도를 고려하면 95%의 신뢰수준으로 그 입력전압은 $(1 \pm 0.0036)V$ 의 범위에 있으므로 케이블의 영향에 의한 보정값을 표에서처럼 보정해 주어야 하지만 cable3과 4는 $(1 \pm 0.0000045)V$ 의 범위임으로 측정값이 그 범위를 만족하기 때문에 보정해 줄 필요가 없는 것이다. 실제 측정과정에서는 SG에서 입력신호는 케이블1을 거쳐서 케이블2를 경유하여 DUT에서 읽혀짐으로 최종적인 보정값은 100MHz, 500MHz와 1000MHz 각각에 대해서 +0.0015, +0.0304 그리고 +0.0483이 된다.

6. 열전대감지기와 직류전압계의 상관 관계

교정과정에서 RF소스에서 보낸 RF전압이 TVC 내의 열전대에서 열로 바뀌고 그 열을 직류전압으로 변형함으로써 그 전압을 열전대감지기로 측정한다. 그 다음 DC소스를 인가해줌으로써 같은 열전대 효과를 나타내는 것을 보장하기 위하여 RF소스에 의하여 열전대감지기의 측정값과 같은값을 열전대감지기

에 나타내도록 DC소스를 조정한다. 이때 그 직류전압을 측정하는 것이 직류전압계이다. 그러나 열전대감지기와 직류전압계와의 직접적인 상관관계를 알수 없기 때문에 열전대감지기의 맨 마지막 digit의 숫자가 한 단계씩 올라가도록 DC소스를 조정하면서 직류전압계가 읽은 값을 측정하였다. 열전대감지기의 값이 0.000989V에서 0.0001000V까지 0.000001V의 간격으로 DC소스를 조정하면서 직류전압계의 변화값을 측정하였는데 그래프 1에서 보는바와 같다.



그래프 1 열전대감지기(x축)과 직류전압계(y축)의 관계

그래프에서 보듯이 직류전압계는 0.882160V에서 0.887182V 까지 선형적으로 변화됨을 알 수 있다. 열전대감지기의 0.000001V의 간격에 대해 직류전압계는 평균 0.0004565V 간격으로 변하고 그것의 표준편차는 0.0000406V가 된다.

7. 측정불확도 산출

측정불확도는 A형 및 B형으로 분류되는데 A형은 반복측정에 의하여 산출하고 B형은 그외의 모든 정보를 통하여 구한다. S/G와 DC소스 각각에서 1V를 인가하여 100MHz, 500MHz와 1000MHz에 대하여 교정측정을 하는데 있어서 필요한 데이터 목록은 표2와 같다.

	100MHz	500MHz	1000MHz
DUT측정값 (V_{Read}^{DUT})	0.4712V	0.4499V	0.3989V
감쇠기감쇠값 (ΔV_{att})	0.4960V	0.4814V	0.4709V
SG보정값 (ΔV_{SG})	0.0015V	0.0304V	0.0483V
직류전압계측정값 (V_{Read}^{avg})	0.88648V	0.875955V	0.800952V
DC소스보정값 (ΔV_{DC}^{avg})	0V	0V	0V
RF-DC차 (δ)	3.720	3.510	8.951

감쇠기의반사계수 ($ \Gamma $)	0.0104	0.0040	0.0035
-------------------------	--------	--------	--------

표2 데이터

감도계수	100MHz	500MHz	1000MHz
$\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{DUT}}$	1.087598V ⁻¹	1.102899V ⁻¹	1.145941V ⁻¹
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{att}}$	1.087598V ⁻¹	1.102899V ⁻¹	1.145941V ⁻¹
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{SG}}$	1.087598V ⁻¹	1.102899V ⁻¹	1.145941V ⁻¹
$\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{avg}}$	-1.188472V ⁻¹	-1.210859V ⁻¹	-1.313548V ⁻¹
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{DC}^{avg}}$	-1.188472V ⁻¹	-1.210859V ⁻¹	-1.313548V ⁻¹
$\frac{\partial F}{\partial \delta}$	-0.010158	-0.010247	-0.009657

표3 감도계수표

	분포		100MHz	500MHz	1000MHz
$U_{V_{Read}^{DUT}}$	직각분포, U분포	메뉴얼 부정합성분	$7.33 \times 10^{-4}V$	$2.88 \times 10^{-4}V$	$2.53 \times 10^{-4}V$
$U_{\Delta V_{att}}$	T분포	성적서	$1.94 \times 10^{-4}V$	$1.88 \times 10^{-4}V$	$1.84 \times 10^{-4}V$
$U_{\Delta V_{SG}}$	T분포	성적서	$3.35 \times 10^{-4}V$	$3.35 \times 10^{-4}V$	$3.35 \times 10^{-4}V$
$U_{V_{Read}^{avg}}$	직각분포 T분포	측정 성적서	$1.32 \times 10^{-4}V$	$1.32 \times 10^{-4}V$	$1.32 \times 10^{-4}V$
$U_{\Delta V_{DC}^{avg}}$	T분포	성적서	$1 \times 10^{-6}V$	$1 \times 10^{-6}V$	$1 \times 10^{-6}V$
U_{δ}	T분포	성적서	$5 \times 10^{-4}V$	$5 \times 10^{-4}V$	$5 \times 10^{-4}V$

표4 불확도 인자표

식 (4)에서 필요한 감도계수의 계산값은 표3에 있다. 성분별 불확도는 표4에 나타내었으며 표3과 4의 데이터와 식 (4)를 이용하여 교정인자의 B형불확도를 구할 수 있고 반복측정 데이터로부터 A형불확도를 구한다. 전체불확도는 표5와 같다.

그러므로 측정결과는 교정인자 F의 평균측정값은 100MHz, 500MHz와 1000MHz에 대하여 각각 1.053627, 1.042716와 1.079029이다.

	A형불확도	B형불확도	합성불확도	확장불확도 (k=1.96)
100MHz	6.32×10^{-5}	9.02×10^{-5}	9.020×10^{-5}	1.768×10^{-4}
500MHz	1.49×10^{-4}	5.30×10^{-5}	5.302×10^{-5}	1.039×10^{-4}
1000MHz	1.29×10^{-4}	4.16×10^{-5}	4.162×10^{-5}	8.158×10^{-5}

표4 불확도결과

8. 결어

측정결과에 대한 측정불확도의 표시는 측정과학에 있어서 오랫동안 논의되어온 과제이다. 근자에 세계적인 추세는 소급성과 측정의 신뢰도를 담보하기 위

하여 측정불확도의 표시를 권고하고 있다. 본 논문에서는 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정측정시, 가능한한 모든 불확도요인을 분석하여 불확도를 분석 산출하였다. 그 결과는 95%의 신뢰수준으로 다음과 같은 범위에 교정인자의 값이 놓여 있음을 보였다.

$$1.053627 \pm 1.768 \times 10^{-2} \text{ (100MHz)}$$

$$1.042716 \pm 1.039 \times 10^{-2} \text{ (500MHz)}$$

$$1.079029 \pm 8.158 \times 10^{-3} \text{ (100MHz)}$$

*참고문헌

- [1] 한국표준과학연구원, 측정불확도표현지침, 1998
- [2] F.L. HERMACH etc. "Thermal Converters for Audio Frequency Voltage Measurements of High Accuracy" IEEE Tran. on Inst. and Meas., Vol Im-15, No.4 p260-268, December, 1966
- [3] 한국측정기기교정협회, 고주파전압계의 표준교정절차, 1998
- [4] European co-operation for Accreditation, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" December 1999