

TDG 및 최적화 기법을 활용한 대전력시험 측정 소프트웨어의 성능 개선 연구

윤지호, 박상희, 우성한
엘에스 일렉트릭

Performance Improvement of High-Power Testing Measurement Software Using TDG and Optimization Techniques

Ji-Ho Yun, Sang-Hee Park, Sung-Han Woo
LS ELECTRIC

Abstract - PT&T는 국제단락시험협회의체(STL)에서 제공하는 TDG(Test Data Generator)를 활용하여 대전력시험 계산용 소프트웨어(Perception)의 성능을 평가 및 운영하고 있다. 기존의 성능 평가에서는 STL 요건에 따라 첫 번째 극점과 %DC가 20% 미만인 극점을 제외한 구간의 실효값과 %DC값을 대상으로 하였다. 그러나 최근 발전소용 차단기 시험 등 가혹한 과도 상태에서의 평가 요구가 증가함에 따라, 첫 번째 극점에서의 정확한 실효값 계산 및 성능 입증이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 계산용 모듈을 양극성 지수함수(Bi-polar Exponential) 방식으로 개선하여 첫 번째 극점의 불확도를 0.90% 수준으로 대폭 개선하였다. 나아가, 제한된 극점 정보의 한계를 극복하기 위해 비선형 최적화 알고리즘(Nelder-Mead Simplex 및 Levenberg-Marquardt)을 도입하여 사고전류 수식의 매개변수를 역산하고 파형을 복원하는 방안을 검토하였다. 본 연구 결과는 대전력시험용 측정 시스템의 신뢰성을 높이고 향후 더욱 정밀한 파형 분석 기법을 개발하는 데 기여할 수 있다.

1. 서 론

대전력시험의 측정 시스템은 센서, 케이블, 신호처리기, 디지털 레코더, 그리고 계산용 소프트웨어로 구성되며, 시스템의 종합적인 성능은 이들 구성 요소의 합성 불확도로 표현된다. 하드웨어 요소는 교정을 통해 성능을 평가할 수 있는 반면, 실효값 및 비대칭 성분을 산출하는 계산용 소프트웨어는 국제단락시험협회의체에서 제공하는 표준 파형 발생기인 TDG를 이용하여 그 신뢰성을 검증할 수 있다. 현재 많은 시험소에서 범용으로 사용 중인 퍼셉션(Perception) 소프트웨어는 자체적인 실효값 계산 기능을 제공하나, 특수한 과도상태나 극초반부 파형에 대해서는 STL의 권장 요건을 온전히 충족하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 사용자들은 기본 함수들을 조합하여 독자적인 계산 모듈을 개발하고 평가해야 하는 실정이다. 기존에는 STL 지침에 근거하여 첫 번째 극점과 %DC 20% 미만 구간을 평가에서 제외해 왔으나, 최근 발전소용 차단기와 같이 극초반부의 높은 비대칭 전류 차단 성능을 요구하는 기기들의 시험이 증가하면서 첫 번째 극점에 대한 실효값 산출의 중요성이 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 TDG 모의 파형을 활용하여 기존 계산 모듈의 한계를 분석하고, 포락선 함수 개선 및 AI 기반 플랫폼(LS GPT)을 활용한 비선형 매개변수 추정 알고리즘을 적용하여 계산 소프트웨어의 성능을 개선하고 불확도를 재평가하고자 한다.

2. 본 론

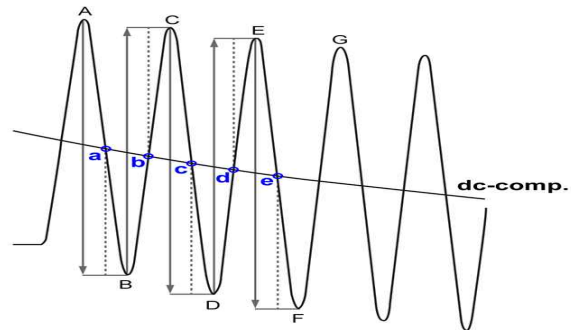
2.1 기존 계산 방법 및 평가 결과

평가 당시, TDG에서 제공하는 8개의 기준 파형으로부터 먼저 극값들을 계산하고, 이들로부터 각 극점에 해당하는 실효값과 %DC값을 계산하였다. 첫 번째 극점을 제외한 모든 극점에서 STL 요건이 충족됨을 확인하였다(<표 1> 참조). 다음과 같이 명시되어 있는 STL 내용을 근거로 첫 번째 극점과 %DC가 20% 미만인 극점들에 대한 평가를 제외하였다.

- The r.m.s. and dc-components cannot be calculated during the first and last half cycle.
- Since DC-components of less than 20% are not mentioned in the Standards, only higher asymmetries were considered in the calculations.

2.1.1 DC 시정수 및 실효값 계산 방법

측정 시점을 기준으로 3개의 극점을 찾고, 중앙 극점과 좌우 극점의 중간값들로 DC 시정수를 계산한 다음, 정극성 및 부극성 극점을 통과하는 2개의 지수함수를 산출하여 측정 시점에 해당하는 실효값과 %DC를 계산하였다.



<그림 1> 시정수 계산

2.1.2 평가 결과

아래 <표 1>은 첫 번째 극점을 제외하고 %DC가 20%를 초과하는 극점에 국한하여 평가한 결과로, 모든 평가 대상이 STL 요건을 충족한다는 것을 알 수 있다.

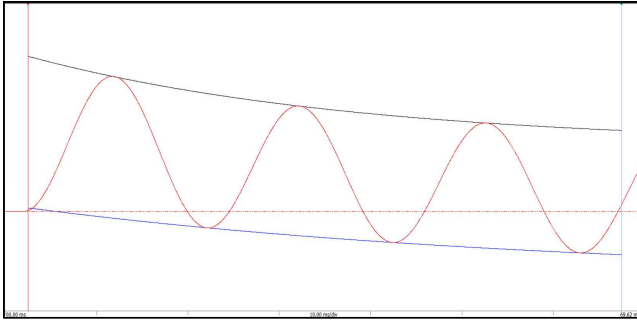
<표 1> 시험변수항목별 측정불확도

Curve no.	Deviation %			
	PeakX	PeakY	RMS	%DC
1	0.036	0.067	0.084	0.268
2	0.037	0.108	0.255	0.337
3	0.007	0.076	0.100	0.354
4	0.035	0.062	0.084	0.270
5	0.036	0.079	0.098	0.269
6	0.068	0.140	0.048	0.381
7	0.127	0.082	0.159	0.461
8	0.007	0.076	0.105	0.224
Max.	0.127	0.140	0.255	0.461
U/DE	0.147	0.162	0.294	0.532
STL 요건	≤0.3	≤0.2	≤0.4	≤2.0

2.2 개선된 첫 번째 극점에서의 실효값 계산방법

2.2.1 퍼셉션 포락선 함수를 이용한 방법

전류 시작부터 정극성과 부극성에서 각각 3개의 극점들을 찾은 다음, <그림 2>와 같이 2개의 포락선을 그려서 실효값과 %DC를 계산한다. 3개의 극점은 퍼셉션 포락선을 위한 최소 요건이다.



〈그림 2〉 양극성 지수함수(Bi-polar Exp.)

2.2.2 포락선 함수 개선에 따른 평가 결과

〈표 2〉는 계산 방법별 첫 번째 극점에 대한 실효값 편차를 보여준다. '3-Crests'는 소프트웨어의 기본 기능이며, 'Mid-point Exp'는 기존에 당사가 적용하던 방식, 'Bi-polar Exp'는 본 연구에서 새롭게 제안한 방식이다. 분석 결과, 새로운 방식을 적용했을 때 측정 불확도가 기존 5.35%에서 0.90%로 크게 개선되는 성과를 확인하였다. 그러나 여전히 STL의 권장 요건을 충족하기에는 미흡하였다. 이는 추출된 소수의 극점 정보만으로 전체 파형의 과도 특성을 정의하는 물리적 한계에서 기인한 것으로 판단된다.

〈표 2〉 계산방법별 첫 번째 극점에 대한 편차

계산방법	곡선								불확도 %
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3-Crests	0.68	3.70	4.64	0.67	0.64	0.66	1.56	2.47	5.35
Mid-point Exp.	0.19	3.66	4.93	0.21	0.23	0.22	1.38	2.89	5.69
Bi-polar Exp.	0.17	0.42	0.78	0.18	0.19	0.31	0.14	0.41	0.90

2.3 사고전류 수식의 매개변수를 이용한 계산방법

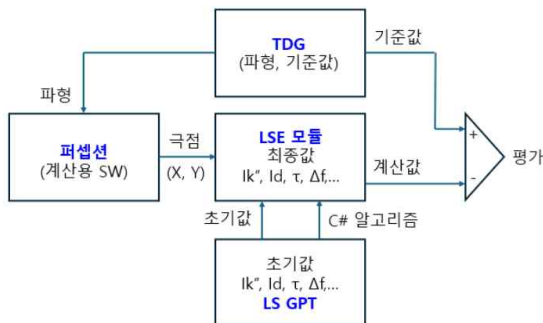
기존의 극점 추출 방식이 갖는 정보의 물리적 한계를 극복하기 위해, TDG가 기준 파형을 생성할 때 사용한 '사고전류 이론 수식'을 역으로 추정하여 전체 파형의 매개변수를 구하는 방안을 검토하였다. 식 (1)은 교류(AC) 및 직류(DC) 성분을 포함한 사고전류 수식으로, 〈표 3〉에서와 같이 총 10개의 매개변수로 구성되어 있다. 한정된 추출 극점의 수를 감안하고 회귀분석(Regression Analysis)의 신뢰성을 높이기 위해, 사전에 인지가 가능한 시작 주파수(f_0), 통전시간(T), 투입각(ϕ)을 상수화하고, 나머지 7개 변수를 추정 대상으로 선정하였다.

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (1)$$

$$i_{ac}(t) = [(I_k'' - I_k')e^{-\frac{t}{\tau_{ac'}}} + (I_k' - I_d)e^{-\frac{t}{\tau_{ac}}} + I_d] \cdot \sin(\theta)$$

$$i_{dc}(t) = I_k'' \sin(\phi) e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}}, \theta = 2\pi t(f_0 + \frac{t}{T}\Delta f) - \phi$$

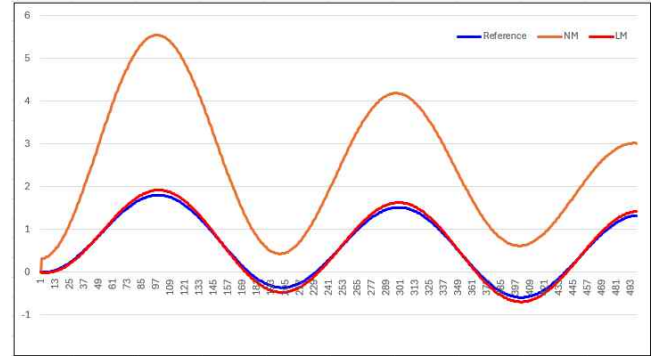
본 연구에서는 식 (1)과 추출된 극점 데이터 쌍을 활용한 비선형 회귀분석을 통해 매개변수를 추정하고자 하였다. 이러한 문제의 최적화 해법으로 AI 기반 플랫폼(LS GPT)을 활용하여 도출한 'Nelder-Mead Simplex' 알고리즘과 IEC 60060-1에서 임펄스용 소프트웨어 개발 기법으로 권장하는 'Levenberg-Marquardt(LM)' 알고리즘을 각각 적용하고 그 결과를 비교 분석하였다.



〈그림 3〉 최적화 적용 개념도

2.3.1 Nelder-Mead Simplex 알고리즘 적용 결과

초기 접근 방식으로 미분을 사용하지 않는 Nelder-Mead Simplex 알고리즘을 적용하였다. 〈표 3〉의 초기값을 부여하여 최적화를 수행한 결과, 도출된 파형이 기준 파형과 상당한 오차를 보였다(〈그림 3〉 참조). 이는 함수가 다수의 지역 최적해(Local Minima)를 가지는 복잡한 비선형성을 띠고 있음에도 불구하고, 해당 알고리즘이 곡률(Gradient) 정보를 활용하지 못해 초기값에 과도하게 의존하고 오차를 누적시켰기 때문으로 분석된다.



〈그림 4〉 기준파형과 계산된 매개변수로 생성한 파형

2.3.2 Lvenberg-Marquardt 알고리즘 적용 결과

앞선 한계를 보완하기 위해 Levenberg-Marquardt(LM) 알고리즘을 적용하였다. 동일한 초기값을 적용했음에도 곡선의 기울기를 효과적으로 활용하여 기준 파형에 매우 근접한 매개변수를 도출하였지만, 기준 파형과 상당한 오차를 보였다(〈그림 3〉 참조). 그리고, 데이터 활용 개수에 따른 민감도 분석 결과, 전체 데이터(18개)를 모두 사용할 경우 시간(t) 경과에 따른 위상 오차가 누적되어 후반부 오차가 커지는 경향을 확인하였다. 반면 초기 10개 극점만 활용했을 때는 첫 번째 극점을 포함한 과도 구간에서 매우 높은 정합도를 보였다.

〈표 3〉 적용한 극점수에 따른 매개변수계산결과

구분	Ik''	Ik'	Id	$\tau_{ac''}$	$\tau_{ac'}$	τ_{dc}	Δf	f0	T	Φ	
Ref	1.0	1.0	1.0	0.016	0.40	0.045	0.00	50.00	0.18	90.00	
LS GPT 초기값	0.90	0.80	0.90	0.010	0.10	0.100	2.50	50.00	0.18	90.00	
NM	3.30	2.99	-5.98	0.000	0.22	0.088	3.16	50.00	0.18	90.00	
LM Crests	7	1.0	-1569.0	-1568.8	852.35	0.00	0.044	1.88	50.00	0.18	90.00
	10	1.0	1.1	1.1	0.0002	-0.06	0.045	0.14	50.00	0.18	90.00
	18	1.0	1.1	-8969.2	0.0051	12364.73	0.045	0.33	50.00	0.18	90.00

2.4 불확도 산정

첫 번째 극점의 실효값을 포함하여 성능을 평가한 결과, 개선된 계산 모듈의 불확도는 약 0.90%로 산출되었다. 이는 기존 평가치인 0.30%보다는 높으나, 물리적으로 변동성이 극심한 첫 번째 극점을 포함했다는 점에서 유의미한 성과다. 실무 적용 시, 발전소용 차단기 시험과 같이 첫 번째 극점 평가가 필수적인 특수 시험과 일반 시험을 구분하여 불확도를 이원화하여 관리하는 방안이 타당할 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 대전력시험용 측정 소프트웨어의 실효값 및 %DC 계산 성능 개선을 위해 TDG 기준 파형을 분석하였다. 포락선 알고리즘을 양극성 지수함수(Bi-polar Exponential)로 개선하여, 가장 오차가 컸던 첫 번째 극점의 실효값 불확도를 4.94%에서 0.90%로 대폭 낮추었다. 비록 STL의 요건을 전 구간에서 충족하지는 못했으나, 극점 데이터만을 활용한 곡선 추정의 한계를 확인하고 대안을 제시한 데 의의가 있다. 특히 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 도입해 사고전류 매개변수를 역산하는 기법은 파형의 과도 특성을 정확히 모사함을 입증하였다. 향후 누적 위상 오차 문제를 해결하기 위해, 가중 최소자승법(Weighted Least Squares)이나 과도 구간과 정상상태 구간을 분리 추정하는 부분 피팅(Piecewise Fitting) 기법을 도입하여 소프트웨어 성능을 고도화할 계획이다.