

154 kV 3상 4선식 고객 2소자 계량방식 계량오차 개선대책

김석곤*, 박창호*, 신동열*, 이종순**, 최용성***
 한국전력공사 전력연구원*, 세종전력(주)**, 동신대학교***

A reform measure on error rate of 2 CT metering method for 3P 4W customer in 154kV system

Seok-Gon Kim*, Chang-Ho Park*, Dong-Yeol Shin*, Jong-Soon Lee**, Yong-Sung Choi***
 KEPCO RI*, Sejong Electric Power**, Dongshin Univ***

Abstract - 3상3선식 2소자 계량방식을 적용하고 있는 154kV 3상4선식 중성점 접지 고압 고객은 상 불평형시 계량오차가 발생하게 된다. 상 불평형시의 3상4선식 정상 계량방식과 3상3선식 계량방식의 계량오차에 대한 기 공개된 시험분석 자료를 기반으로 하여 본 논문에서는 3상4선식 공급선로에서 2소자 계량을 적용하고 있는 3상4선식 고객에 대하여 전력계량의 신뢰도 향상을 위해 제안된 기존의 3상4선식 전력량계를 활용하여 계량 환경을 개선하는 시공기술로서, 설비개선 비용이 거의 소요되지도 않고 무정전 시공과 함께 전력량계의 제작사양을 변경하지 않는 방법으로 계량 정밀도를 개선 할 수 있는 방안에 대한 검증시험과 적용성 분석 등의 개선대책에 대하여 기술한다.

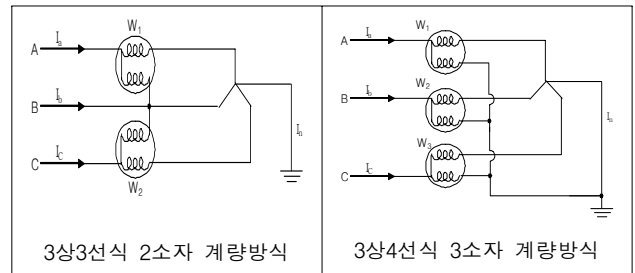
평형 조건은 A상과 B상의 역율을 지상 72%, C상은 정상조건인 손실이 없는 지상 99.9%로 설정한 시험환경에서 3상4선식 정상 계량방식으로 계량오차 시험을 수행한 경우는 총10회의 시험결과, 최소 오차율은 0.02%, 최대 오차율은 0.1%로 매우 정밀도가 높은 것으로 확인 되었고, 3상3선식 계량방식 계량오차 시험에서는 평균 계량오차율이 약 20%, 최소 오차율은 20.4%, 최대 오차율은 20.53%로 과다 계량으로 나타났다. 한편 오차시험 후 분석을 통하여 각 상별 위상차를 벡터도로 확인한 결과, B상전류는 나타나지 않으며, 지상전류인 A상에 비해 C상의 전압, 전류값이 크고 위상차는 상대적으로 적게 나타나는 것을 확인하였다[1].

1. 서 론

국내 고압용 전력량계를 적용하고 있는 고객의 수는 전체 고객수의 1%에도 미치지 못하고 있으나, 전기요금 기준으로는 약 60% 이상을 점유하고 있기 때문에 고압용 전력량계의 계량 정밀도는 매우 중요하다. 국내의 154kV 3상4선식 중성점 접지 고압 계기 사용고객 중, 3상3선식 계량방식으로 전력량을 계량하는 개소가 존재한다. 3상3선식의 2소자 방식으로 전력계량을 하게 되면, 상불평형이 발생시에는 계량오차가 발생하게 된다. 이러한 계량오차의 개선을 위한 전력량계 및 관련설비의 개선작업은 고압고객이라는 특수성으로 인하여 정전방지와 고객의 비용부담이 수반되어 이행이 쉽지 않기 때문에 이를 개선하기 위한 계량방법이 일부 공개되었으나, 현장의 전력량계 운용환경을 충분히 고려하지 않아 적용상의 어려움이 따랐다. 본 논문에서는 3상4선식 154kV 고객에 대하여 전력량계 운용환경을 충분히 고려하여 계통의 상 불평형시 3상4선식 전력량계를 이용하여 저비용, 무정전 정밀 계량을 이행 할 수 있는 방안의 소개와 함께 배전 선로상에서의 실증적 시험을 통하여 계량오차의 크기를 검증함으로써 고 신뢰 전력계량 대책을 제시해 보고자 한다.

2.2 상 불평형시 전력계량 정밀도 개선방안 사례

이미 소개한 바와 같이 아래의 [그림1]에서 3상 3선식 2소자 계량방식에서 상평형 즉, $I_n=0$ 일 때는 3상 4선식 3소자 계량방식과 동일한 값을 얻을 수 있으며 전력값은 모두 $P = \sqrt{3} V_{ab} I_a$ 가 된다.



<그림 1> 154kV 중성점 접지고객 2소자 및 3소자 계량방식

2. 본 론

2.1 상 불평형시 계량오차 분석 사례

3상3선식 2소자 계량을 적용하고 있는 154kV 중성점 접지 3상 4선식은 상 불평형시에는 각 상별 전류의 상대적 크기에 따라 과다 또는 과소 계량이 발생하게 된다. 이 경우 기존의 3상 3선식 전력량계를 제거하고 3상 4선식 전력량계를 설치 운용한다면 정확한 계량이 가능하지만, 3상 4선식 계량을 위해서는 A,B,C 3상 모두에 대해 CT가 부설되어 있어야 한다. 그러나, 3상 3선식 계량을 위한 기존 수전설비에는 B상의 전류검출을 위한 CT가 부설되지 않아 추가 설치를 위해서는 수억원 이상의 공사비용이 소요와 함께 상당기간 동안의 정전이 함께 수반된다. 또한 GIS 급 수전설비의 경우 설비 간 상호 연계되어 있기 때문에 사실상 계량 개선 공사가 곤란하다. 이러한 고객에 대하여 계량오차를 개선하기 위한 몇가지 방식이 과거에 소개된 사례가 있다. 대표적인 예는 2개의 전력량계를 추가 사용하는 방법과 전력량계 또는 계기용단자대를 변형하여 계량하는 방법이 있으며, 본 논문에서 소개하는 내용과 관련된 직접 배선접속방식을 이용한 B상전류 간접검출방식이 있다.

서두의 '2.1항'에서와 같이 상 불평형으로 인한 계량오차를 개선하기 위해서는 전력량계의 2S단자에 정확한 B상전류를 입력해야 한다. 그 방안으로 중성점 접지방식에서의 중성점 전류(I_n)를 이용하여 다음 식 (1)과 같이 B상 전류(I_b)를 도출 할 수 있다.

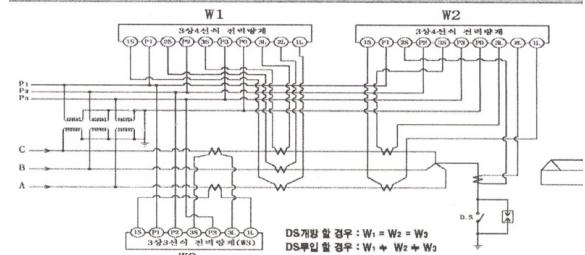
$$I_n = I_a + I_b + I_c, \quad I_b = -(I_a + I_c + I_n) \quad \text{-----(1)}$$

2.2.1 전력량계 추가 적용 계량 방식

영상전류 보상용 3상 전력계량장치

특고압 154kV측 선로에 2개 CT와 중성점 접지선 1개 CT(저압)를 이용한 3상 4선식 계량방식

수전기준



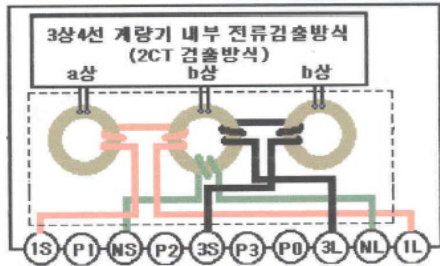
<그림 2> 계량오차 개선을 위한 계기 추가 계량방식

3상4선식 전력량계를 이용하면서도 B상에 추가 CT를 부설하지 않고 정확한 계량을 수행할수 있는 직접 배선접속방식 B상전류 간접계량방식의 검증에 앞서 이미 소개된 3상 3선식 계량과 3상4선식 정상계량방식의 계량오차 분석결과에 의하면 각 상 전압이 110V, 부하전류는 각상 공통으로 2.7A를 가하였고 상 불

[그림2]는 기 공개된 연구자료로서 영상전류 보상용 3상 전력 계량장치를 설명하기 위한자료[2]로 판단되나, 그림에서 중성점 접지선 CT를 이용한 3상 4선식 계량방식은 명확하지 않고, 중성점 접지유무에 따라 고객에게 부설된 3상3선식 전력계량방식과 3상 4선식 계량방식 그리고 중성선에서의 CT를 이용한 계량의 상관관계를 나타내고 있다. [그림2]는 실제 현장에서 설치가 불가능한 구조로서 개념적인 설명을 위한 구성도로 파악할 수 있다. 소개된 관련 연구내용을 추론하면, 원래의 설명취지는 기존의 전력회사 관리용으로 설치된 3상3선식 전력계량 외에 중성선 전류 측정용 CT를 추가하여 별도의 계량장치에 의해 중성선의 전류를 측정하여 오차전류 및 오차전력을 도출함으로써 전체 합성계량 값을 산출하는 방안으로 판단된다. 이 방법은 계량 오차 및 종합 계량값의 확인[2]은 가능하지만, 기존 운용중인 계량설비에 비해 계량장치가 복잡하고 계량 관련설비의 운용 및 관리주체가 모호하기 때문에 전력요금의 산정을 위한 공식적인 계량장치로서의 사용이 불가능하다. 만약 [그림2]에서 'W2'가 계량오차 개선을 위해 제시된 계량방식이라면, 인정시험 규격품인 기존의 3상4선식 전력계량의 수정, 보완 없이는 그대로 사용할 수는 없다.

2.2.2 A,C,N상 전류 B상 CT 입력 계량방식

[그림3]은 A상, C상, N상 CT로부터 측정된 전류값을 전력량계 내의 B상 CT를 관통하게 함으로써, B상의 전류를 측정하는 방식으로 상기 '2.2.1'항의 2개의 전력량계를 활용하는 방법을 획기적으로 개선한 방식으로 신속한 전력계량과 현장 설치 활용 시 상대적으로 간결하면서도 안정적인 운용이 가능한 구조이다[3].



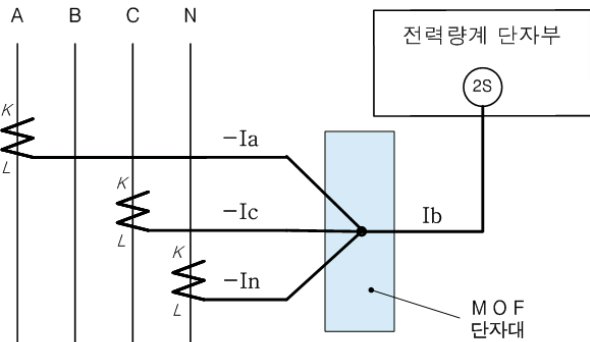
<그림 3> A,C,N상 전류 B상 CT 계량방식

그러나, 이 방식은 전력량계 내에서 A상, C상, N상 전류 배선을 통과시키기 위해 기존 CT의 크기를 확대 적용해야 하며, 전력량계의 내부구조를 개선해야 하는 형태이기 때문에 전력량계의 사양개정과 함께 별도의 검정시험절차를 거쳐야 하는 등의 제도적인 보완이 병행되어야 하기 때문에 현장에서의 활용이 곤란한 단점이 있다.

2.3 상 불평형시 최적 전력계량 개선 방식

2.3.1 기존계기 활용 직접 배선접속 B상전류 검출방식

서론에서와 같이 154kV 중성점 접지 3상4선식 2소자 계량고객은 모두 이미 가동 중인 고객으로 계량방식 개선을 위해 대규모의 공사 또는 장시간의 정전이 발생하지 않아야 하고, 별도로 전력량계 규격 개정과 신규 계기 개발 및 검정시험 이행은 현실적으로 이행하기 어렵다.



<그림 4> 기존계기 활용 직접 배선접속방식 구성도

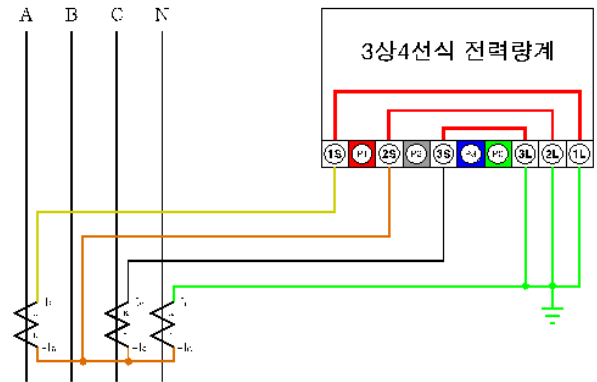
이러한 근본적인 문제점을 해결하기 위해 B상의 전류를 MOF가 설치된 현장에서 CT의 추가 없이 직접 배선접속방식을 이용하여 B상 전류를 간접 추출하는 방법을 적용하였다. [그림4]는 기존 계기를 활용하여 직접적인 배선접속을 통한 B상 전류를 간접적으로 직접 검출하는 방식의 배선 구성도를 나타낸 것이다.

이 방식은 회로내의 어느 지점에서나 들어오거나 나가는 전류의 총계는 제로라는 키르히호프의 법칙을 수식 그대로 배선접속 결선한 단순한 방식이지만 전력량계의 규격개정과 추가 검증 없이 즉시, 시행이 가능한 구조이다.

[그림4]에서 나타낸 바와 같이 식(1)의 $I_b = -I_a - I_c - I_n$ 이론식을 현장의 MOF의 단자대에서 그대로 직접 배선을 접속 결선한 구조로 A상, B상 CT 단자에서 $-I_a$ 와 $-I_b$ 전류를 추출하고, 중성선(N)에 별도의 CT를 부설하여 B상 전류($-I_b$)를 추출하는 구조를 갖는다. 한편, N상의 CT 부설은 정전이 수반되지 않으며, 기존 3상에 비해 소전류이기 때문에 CT부설로 인한 공사비용 부담은 매우 제한적이다.

2.3.2 기존 계기 활용방식 정밀도 시험

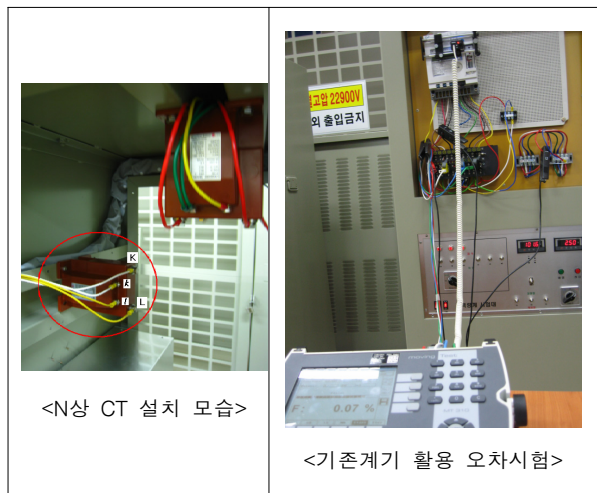
3상4선식 공급고객의 3상3선식 계량오차 예방을 위한 기존의 규격품의 3상4선식 전력량계를 이용하여 직접 배선접속방식으로 B상전류를 간접 검출하는 방식의 타당성을 확인하기 위한 시험장치의 구성도는 [그림5]와 같다. 부하전류 및 부하 역율조건은 '2.1'항의 상 불평형시 계량오차 분석시의 조건과 동일하며, 3상3선식 2소자 계기 대신에 3상4선식 3소자 전력량계를 이용하였다.



<그림 5> 기존계기 활용 직접접속 배선방식 결선도

식(1)의 I_b 의 향으로 표시되는 전력량계의 B상 입력단인 '2S' 단자로 입력되는 합성 전류값이 3상4선식 3소자를 이용한 정상 계량방식에 의한 B상 전류값과 동일한지 실험을 통해 확인하고자 하며, 추가로 계측값을 기반으로 이론적으로 도출한 중성선 전류값과 간접 계량방식에 의한 중성선 전류의 계측값을 함께 비교 검증하고자 한다.

[그림6]은 기존계기를 활용한 오차시험과 중성선에 추가로 CT를 설치한 모습이다.



<그림 6> 직접 배선접속방식 정밀도 시험장치 설치도

2.3.3 기존계기 활용 직접배선방식 계량시험 결과

	UB	IB	MM
Meas settings	250.0 V	C5.000 A	4LW
U-Ratio	1.0/1.0		
I-Ratio	1.000/1.000		
Ratio cons.	Actual Values	Meter-Constant	Meter-Register
	On	On	On

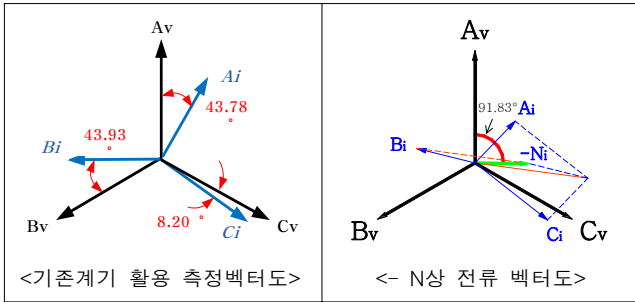
	L1	L2	L3		S	
UPN	111.62	110.84	110.08	V	SP	0.5822 kW
UPP	192.70	190.62	192.65	V	SQ	0.3147 kVAr
UD	0.91	1.02	0.95	%	SS	0.6948 kVA
I	1.7232	1.8006	2.7515	A	F	59.988 Hz
ID	1.29	2.80	2.33	%	PS	132
PhiU	43.78	163.83	283.11	deg	SL	0.8379
Phil	0.00	119.90	274.91	deg		
PhiUI	43.78	43.93	8.20	deg		
Lambda	0.721904	0.719793	0.989393			
P	0.1389	0.1436	0.2997	kW		
Q	0.1331	0.1384	0.0432	kVAr		
S	0.1923	0.1996	0.3029	kVA		

<그림 7> 기존계기 활용 Actual Value 출력값

기존계기를 활용하여 B상 전류를 간접 검출 시험결과는 [그림 7]과 같이 유효전력(kW)의 값은 C상이 A, B상보다 높고 부하전류 역시 C상에서 높게 나타났다.

2.3.4 기존계기 활용 직접배선 방식 계량오차 분석결과

상기 [그림 7]에서 측정된 실측 값(Actual Value)을 근거로 하여 각 상별 위상각 및 벡터도와 중성선 전류의 벡터도는 [그림 8]과 같다.



<그림 8> 직접 배선방식 측정값 및 N상 전류 벡터도

[그림 8]의 좌측부 그림 에서와 같이 A상, C상 및 N상 전류의 합으로 도출된 상기의 B상전류는 B상 전압과의 위상차가 43.93°로 나타나고 있으며, A상의 경우에도 지상 72%의 역률 조건에 의해 위상차가 B상과 거의 동일하게 43.78°로 나타나고 있고, 역률 약 1.0인 C상의 경우에는 8.2°의 위상차를 보이고 있어 정상적으로 계량이 이루어 졌음을 알 수 있으며, 측정장비에서 제공되는 벡터도에서도 동일한 패턴을 확인하였다.

한편, A, C, B상 측정값을 통한 (-N)상 전류값을 이론적으로 도출하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 -I_n &= I_a(\cos 43.78^\circ - j \sin 43.78^\circ) \\
 &+ I_c(\cos 283.88^\circ - j \sin 283.88^\circ) \\
 &+ I_b(\cos 128.87^\circ - j \sin 128.87^\circ) \\
 &= -0.0506 - j1.5865
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

따라서, 상기 식 (2)로부터 위상각 $\theta = \tan^{-1}(\frac{Y}{R})$ 및 중성선 전류의 크기는 '1.59(A)∠91.8°'가 되며 이에 따른 중성선 전류(Ni)의 위상각 및 벡터도를 [그림 8]의 우측부에 나타내었다. 한편, 표준오차 시험장비를 이용한 정밀도 시험은 오차측정값의 객관성을 높이기 위해 총 10회를 실시하였다.

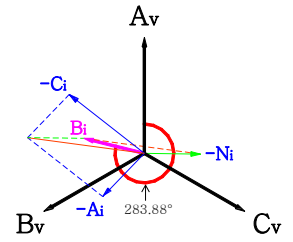
<표 1> 직접배선 접속방식 계량오차 회차별 정밀도

회차	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
오차(%)	0.07	0.10	0.03	0.17	0.07	0.14	0.03	0.10	0.14	0.07

오차시험 결과는 [표 1]에서 보이는 결과 값과 같이 평균오차는 0.092%, 그리고 최대 측정오차는 0.17%로 0.5급 전력량계에 대한 정밀도로서 매우 양호한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

2.4 기존계기 활용 직접접속 간접검출방식 분석 결과

기존 계기를 활용한 간접 계량방식에서 -A상, -C상, -N상 합성 전류에 의한 B상 벡터도는 식 (1)에 의해 [그림 9]의 벡터도에서와 같이 위상각은 283.88°이며, B상 전류의 크기는 $|I_b| = 1.8006 A$ 이므로 3상 4선식 3소자를 이용한 정상계량방식을 이용한 시험결과 값[1]인 '1.8033(A)∠283.5°'와 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 정상계량방식과 기존계기를 활용한 간접 계량방식에 의한 각 상별 측정값의 비교 결과, 전류값의 최대 변화율은 0.64%, 역률의 변화율은 0.14%로 매우 양호함을 확인하였다.



<그림 9> 간접검출 B상 벡터도

3. 결 론

본 논문은 전력계량설비의 개선안을 담당하는 관련부서의 실증 검증요청에 따라 시행한 기술지원결과를 토대로 구성한 것으로 전기회로망에서 일반화된 이론인 키르히호프의 전류법칙을 이용함에 있어서 불특정 한 개의 상 전류값을 구하기 위해 나머지 3개 상의 전류값을 별도의 CT 센서를 이용하여 직접적으로 계속하는 것이 아니라, 전류법칙 그대로의 수식을 직접 배선접속하는 형태로 적용함으로써 전류검출비가 추가 소모되지도 않고 전력량계의 사양 변경없이 응용할 수 있는 방안을 실증적 검증을 통해 확인하였다.

기 공개된 3상 4선식 정상계량방식을 적용한 실 부하 측정값을 기본으로 하여 이론적으로 도출한 중성선 전류값[1]과 기존계기를 활용한 직접 배선접속방식인 간접 계량방식에 의해 측정된 중성선 전류값이 거의 동일함을 확인하였다. 또한 3상 4선식 정상계량 계량시의 B상 전류값과 기존계기를 활용한 직접 배선 접속에 의한 간접계량 방식의 실험결과 값인 -A상, -C상, -N상 값의 조합에 의해 도출한 B상전류의 크기와 위상각이 거의 동일함을 확인하였다.

그리고, 3상 유효전력의 비교에 있어서는 3상 4선식 정상계량 방식에서는 0.5821 kW, 기존계기 활용 간접계량방식에서는 0.5822 kW로 유효전력량 오차율은 0.01%로 나타나 유효전력량의 변화도 거의 없음을 알 수 있다.

이 방식을 적용함으로써 현장개선을 위해 추가 CT를 부설하지 않고 무정전 시공과 함께 제도적, 절차적인 문제점을 쉽게 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 본 논문에서 소개한 관련시험 및 검증결과를 활용하여 154kV 3상4선식 2소자 전력량계 적용고객의 계량오차 개선을 위한 실질적인 업무가 성공적으로 진행되어, 현장 운용계기의 계량오차 개선과 전력거래 신뢰도의 향상에 일조하기를 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김석근, 이건행, 김상준, "154 kV 고압고객 상불평형시의 계량오차 실증시험 연구", 대한전기학회 추계학술대회(전력계통보호제어연구회), 2010. 10
- [2] 전명수 외, "154 kV 계통의 2CT에 의한3상 4선식 계량방법" 대한전기학회 추계학술대회(전기설비부문회), 2010. 11
- [3] 신동열(한국전력공사) 외, "154kV 중성점 접지방식 3상 전력계량방법", 특허등록, 등록No. 10-0591437, 2006