Correlation Analysis about Loop Impedance and Load Condition

정진수[†] · 김한상^{*} · 김선구^{**} · 한운기^{**} · 박찬엄^{***}
(Jin-Soo Jung · Han-Sang Kim · Sun-Gu Kim · Woon-Ki Han · Chan-Eom Park)

Abstract - This paper presents a loop impedance(inner loop impedance & external impedance) measurement method in TN system. When the measurement of a loop impedance then the measurement result have a some error by load condition. In this paper suggest the loop impedance measurement on actual loading condition by two experiment. one was laboratory condition and the other was the actual measurement on site. Analysis result, measuring error by load condition has not effect on measuring loop impedance.

Key Words : Loop impedance, Reference impedance, Load condition, IEC 60364, TN system

1. 서 론

루프임피던스(loop impedance)란 변압기를 시작으로 전원선과 보호도체의 임피던스를 의미한다. 즉, 측정지점의 저압배전계통에서 수용가에 이르는 하나의 루프회로 임피던스를 측정한다. IEC 60364에 의한 접지설비는 TN, TT, IT로 분류가 된다. 루프임피던스는 IEC 60364로 시공된 전기설비의 설비 및 인체감전을 보호하기 위해 측정하는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이중 TN 접지계통은 다시 TN-S, TN-C-S로 분류가 되는데 이때 전력사업자의 설비인 배전계통의 임피던스인 기준임피던스와 수용가 내부의 임피던스인 루프임피던스로 구분을 하게 된다[1]. 현재 IEC 60364의 국내적용을 위한 실태조사가 이루어 졌다[2]. 국내에서 감전사고 및 설비사고 보호를 위한 접지설비의 시공 및 검사방법에 대한 연구가 진행되었다[3].

또한, IEC 접지계통이 국내 접지계통과의 차이점으로 인해 시공 혹은 안전관리 시 발생할 수 있는 문제점 및 해결방안에 대한연구가 진행되었다[4]. 그러나 루프임피던스 측정시 부하상태에 따른 루프임피던스의 측정결과에 대한 검증이 이루어지지 않아 루프임피던스 측정결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 없다는 문제점이 있어 이에 대한 검증이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 실험실조건과 실제현장에서 부하상태에 따

른 루프임피던스의 측정결과 및 수용가의 형태를 분류하여 루프임피던스를 측정한 결과를 비교·분석하고 전기사업자 계통의 설비인 배전계통 말단부와 수용가 인입부 사이의 루프임피던스를 측정하여 2010년도 전기설비기술기준에 신설된 TN 접지계통이 본격적으로 국내에 시공되기 이전 본 연구결과를 활용하여 관련 기준을 정립하고 이와 관련되어 발생할 수 있는 분쟁을 미연에 예방하는 기본 자료로 활용하고자 한다.

2. 루프임피던스와 부하영향 분석

2.1 루프임피던스 측정원리[5]

루프임피던스 측정방식은 공칭전압을 측정할 수 있는 전압계(V_0), 순수한 저항성분만을 가진 저항을 R_1 이라 정의하고 R_1 양단의 전위차를 측정할 수 있는 전압계(V_1)를 이용하여 전압을 측정한다. 이때 전압은 부하상태에 따라서도 영향을 받게 되므로 수용가의 부하에 따른 루프임피던스 변환 특성을 분석해볼 필요가 있다. 루프임피던스 측정은 무부하상태에서 측정하는 것이 가장 정확한 측정결과를 취득할 수 있지만 실제 운영되고 있는 건축전기설비에서는 이와 같은 방법이 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해결하는 하나의 방법이 부하에 따른 루프임피던스 영향 분석을 통해 루프임피던스에 큰 변화가 없다면 부하운전 중에서도 루프임피던스 측정이 가능할 것이다. 본 실험을 위해 그림 1과 같은 회로를 구성하여 선로의 루프임피던스를 측정하였다.

여기서 루프임피던스(Z_S)는 전원선의 임피던스(Z_L)와 보호도체선의 임피던스(Z_{PE})를 합한 값이 된다.

$$Z_S = Z_L + Z_{PE} \quad (1)$$

[†] 교신저자, 정회원 : 전기안전연구원 선임연구원

E-mail : mirmir0822@kesco.or.kr

^{*} 정 회원 : 전기안전연구원 수석연구원

^{**} 정 회원 : 전기안전연구원 책임연구원

^{***} 정 회원 : 전기안전연구원 연구원

접수일자 : 2011년 7월 19일

최종완료 : 2012년 1월 27일

그림 1 루프임피던스 측정 방법
Fig. 1 Measuring Method of Loop Impedance

이때 전원선과 보호도체 사이의 측정전압을 측정하기 위해 스위치(SW₁)를 개방한 상태에서 전원의 전압을 측정한 결과는 V_0 가 된다.

또한 회로의 흐르는 전류를 측정하기 스위치(SW₁)를 닫은 상태에서 전압을 측정한 값이 V₁이며 이때 흐르는 전류(I₁)는 식(2)를 통해 구할 수 있다.

$$I_1 = V_1 \div R_1 \quad (2)$$

위의 식(2)를 이용하여 구해진 전류와 실측을 통해 측정된 V_0 , V_1 과 식(2)를 이용하여 위에서와 같은 회로의 루프임피던스를 구할 수 있다.

$$V_0 = (Z_S + R_1) \times I_1$$

위의 식에 I_1 대신 식(2)를 대입하면 다음과 같다.

$$V_0 = (Z_S + R_1) \times (V_1 \div R_1) \quad (3)$$

여기서 루프임피던스를 구하기 위해 Z_S 의 식으로 변환하면 식(4)와 같이 되며 이를 이용하여 루프임피던스의 측정이 가능하다.

$$Z_S = (V_0 - V_1) \div V_1 \times R_1 \quad (4)$$

2.2 루프임피던스 측정 방법

위의 루프임피던스 측정방법에서와 같이 변압기 부분의 전압을 측정하여 루프임피던스를 측정하면 가장 정확한 루프임피던스의 측정이 가능하지만 실제 현장의 경우 거리 및 공간의 문제로 변압기 부분의 전압측정이 불가능하다. 이로 인해 측정지점의 전압을 측정할 경우 중간 부하들로 인해 전압변동이 발생하여 V_0 의 크기가 변동되며 이로 인해 측정 결과의 오류가 발생할 수 있다. 이때 오차의 예측이 불가능하여 본 실험에서는 선로의 임피던스(전원선, 보호도체선)를 0.5, 1.0, 5.0 Ω 으로 순차적으로 변환을 시켜가며 부하 2개를 사용하여 부하 및 선로임피던스 변화에 따른 루프임피던스 변화 실험을 실시하였다. 본 실험에서 부하 1은 2,450 W 용량의 열풍기를 사용하였고 부하 2는 10.5 kW 용량의 열풍기를 사용하여 실제 수용가 계통과 동일하게 구성하여 실험

그림 2 부하상태에 따른 루프임피던스 특성분석 회로도
Fig. 2 Diagram for Characteristic Analysis of Loop Impedance by Load Condition

2.3 루프임피던스 측정 결과

그림 3은 부하상태에 따른 루프임피던스 측정결과를 그래프를 나타내었으며 표 1은 그림 3의 결과를 나타내었다.

그림 3 부하상태에 따른 루프임피던스와 측정 결과
Fig. 3 Measuring Result of Loop Impedance by Load Condition

부하와 루프임피던스와의 상관관계 분석 결과 초기 임피던스에 비해 부하 한 개를 연결하여 운전을 하면 임피던스가 약간 증가를 하며 부하의 용량이 클수록 임피던스의 변화량은 작은 것으로 나타났다. 또한 2개 이상의 부하를 연결시켜 임피던스를 측정 한 결과 측정된 최대 임피던스보다 낮게 측정되었다. 결과적으로 부하의 용량이 증가할수록 루프임피던스와의 감소는 하게 되며 여러 개의 부하가 연결될

경우 최소크기의 용량을 가진 부하에서 최대 크기의 루프임피던스가 측정되고 이후 루프임피던스가 감소된다.

표 1 부하상태에 따른 루프임피던스와 측정 결과

Table 1 Measuring Result of Loop Impedance by Load Condition [단위 : Ω]

선로 임피던스		부하	2,450 [W]	10.5 [kW]	(2,450+10.5) [kW]
전원선	보호도체				
0.5	0.5	2.32	2.67	2.75	2.60
	1.0	2.76	3.14	2.80	3.10
	5.0	6.76	7.13	6.87	7.11
5.0	0.5	6.74	7.21	6.88	7.23
	1.0	7.16	7.59	7.18	7.62
	5.0	11.28	11.81	11.55	11.62

또한, 표 1에서 무부하시 루프임피던스와 부하를 연결한 후의 루프임피던스를 비교한 결과 변압기 임피던스는 약 1 Ω 정도 측정되었으며 이후 선로의 임피던스와 비례적으로 루프임피던스가 증가함을 확인하였다. 이는 건축전기설비 시공시 수용가 내부 혹은 외부의 전원공급용 변압기 임피던스에 따라 수용가 내부에서 지락사고가 발생할 경우 전기설비 및 인체감전보호에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다.

3. 기준임피던스와 부하영향 분석

3.1 측정 방법

기준임피던스 전기사업자의 변압기, 전원선 및 중성선의 임피던스를 의미한다. 이때 정확한 기준임피던스를 측정하기 위해서는 수용가의 모든 회로를 차단한 상태에서 임피던스를 측정해야 한다. 그러나 실제 현장의 경우 PC, 단말기 등 24시간 동작되는 전기설비가 정전으로 인해 동작이 멈출 경우 금전적 피해가 발생하기 때문에 수용가의 전원을 차단한 상태에서 기준임피던스를 측정하는 것은 현실적으로 어려움이 크다. 이와 관련하여 본 절에서는 실제 현장의 기준임피던스를 차단기가 on인 상태와 off인 상태에서 측정하여 그 결과를 비교 분석하였다. 그림 4는 이때 측정모습을 나타내었다.

그림 4 외부루프임피던스 측정 방법

Fig. 4 Measuring Method of External Loop Impedance

3.2 측정 결과

기준임피던스 측정결과는 다음과 같다. 측정대상은 단독주택, 아파트, 상가, 공장 등을 대상으로 하였다. 측정개소는 총 30개 개소에 대하여 측정을 실시하였다. 측정결과 대부분 수용가의 메인차단기 상태에 따라 2개소를 제외한 나머지 측정 대상에서 측정오차가 대부분 0 ~ 0.1 Ω 이내인 것으로 확인되었다. 결과적으로 기준임피던스를 측정할 경우 부하상태에 따라 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 표 2는 기준임피던스 측정시 부하영향 현장실측 결과를 나타내었다.

표 2 기준임피던스 측정결과

Table 2 Measuring Result of Reference Impedance

분류	차단기 상태	측정결과[Ω]	측정비
상가	on	0.21	0.000
	off	0.21	
	on	0.20	0.000
	off	0.20	
	on	0.28	(0.003)
	off	0.27	
	on	0.14	0.000
	off	0.14	
	on	0.25	0.007
	off	0.26	
	on	0.34	(0.005)
	off	0.34	
공장	on	0.28	0.024
	off	0.30	
아파트	on	0.31	0.000
	off	0.31	
	on	0.31	0.011
	off	0.32	
	on	0.34	0.007
	off	0.34	
단독주택	on	0.60	0.065
	off	0.66	
	on	0.30	0.006
	off	0.30	
	on	0.31	0.025
	off	0.34	
	on	1.35	(0.923)
	off	0.43	
	on	0.42	(0.040)
	off	0.38	
	on	0.27	0.005
	off	0.27	
	on	0.33	0.000
	off	0.33	
	on	0.21	0.021
	off	0.23	

표 2 기준임피던스 측정결과
Table 2 Measuring Result of Reference Impedance

분류	차단기 상태	측정결과[Ω]	측정비
단독주택	on	0.28	(0.026)
	off	0.25	
	on	0.34	(0.004)
	off	0.33	
	on	0.17	0.005
	off	0.17	
	on	0.30	0.010
	off	0.31	
	on	0.43	(0.135)
	off	0.30	
	on	0.34	0.027
	off	0.36	
	on	0.21	0.001
	off	0.21	
	on	0.27	(0.046)
	off	0.22	
	on	0.10	0.001
	off	0.10	
	on	0.30	0.009
	off	0.31	
	on	0.61	0.060
	off	0.67	
	on	0.36	0.006
	off	0.36	

표 3은 기준임피던스의 각 수용가의 분류 형태에 따라 측정결과를 평균 낸 결과이다.

표 3 기준임피던스 측정결과 평균값
Table 3 Measurement Average Result of Reference Impedance

분류	임피던스 평균값[Ω]
상가	0.24
공장	0.29
아파트	0.32
단독주택	0.33

표 3에 대한 분석 결과 수용가 분류에 따라서 임피던스의 평균값에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 향후 IEC에 따른 TN 접지계통이 국내 보급되는 시점에서 외부 루프임피던스를 결정하는데 매우 중요한 요소가 된다.

4. 결 론

실험실 조건 및 실제 현장을 통한 루프임피던스 측정 및 분석결과 부하에 따라 기준임피던스 및 루프임피던스가 영

향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 측정오차의 범위가 대부분 5 % 이내로 나타났다. 이는 차단기의 도체 상태에 따라 혹은 측정시점에 접점의 접촉강도에 따라 발생 할 수 있을 정도의 오차로서 부하가 동작을 하는 시점(무정전)상태에서 루프임피던스를 측정하여도 문제가 없다. 이는 향후 국내 건축전기설비가 TN 접지계통으로 시공되는 시점에서 차단기의 정격차단용량을 선정하고 보호계통의 임피던스를 측정하는데 매우 중요한 요소로 작용한다.

또한 외부루프임피던스 측정결과 수용가의 분류 형태에 따라 임피던스의 크기가 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이는 TN 접지계통에 대한 루프임피던스를 측정할 경우 수용가의 형태에 따라 루프임피던스의 제한값을 따로 규정하지 않아도 됨을 의미한다. 또한 전기사업자의 외부루프임피던스를 규정짓는데 매우 중요한 요소로서 향후 외부루프임피던스의 관련 규정 신설시 매우 중요하게 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.
(과제번호 : 2010T100100461)

참 고 문 헌

- [1] KS C IEC 60364, "건축전기설비", 기술표준원, 2006.
- [2] 정진수, 한운기, "국제 건축전기설비기준(IEC60364)의 국내 적용 실태조사", 한국조명·전기설비학회논문지, Vol. 22, No. 10, pp 134~140, 2008.10.
- [3] 정진수, 한운기, 이한상, "IEC 60364기반 건축전기설비 점검기법 개발을 위한 현장실태 조사", 한국조명·전기설비학회논문지, Vol. 23, No. 5, pp 36~41, 2009.5.
- [4] 정진수, 한운기, 김오환, 김재철, "IEC 60364 기반 접지계통 비교 분석", 한국조명·전기설비학회논문지, Vol. 24, No. 1, pp 56~62, 2010.01.
- [5] Ryszard Roskosz, "A New Measurement of Earth Fault Loop Impedance", IEEE Trans. Power delivery Vol. 6, No. 2, April 1991.
- [6] 전기안전연구원, "산업현장의 감전사고 예방을 위한 최적의 보호도체 현장적용화 연구", 한국에너지기술평가원, 2009.10.
- [7] 전기안전연구원, "국제전기기준(IEC) 국내 적용에 따른 감전위험성 분석 및 개선방안 제시", 한국에너지기술평가원, 2011.07.
- [8] S. Czapp, "Measurement of the Earth Fault Loop Impedance in Low Voltage", IJES, Vol. 29, No. 4, pp 266~271, 2009.
- [9] J.P. Rhode, A.W Kelley, & M.E. Baran, "Complete characterization of utilization voltage power system impedance using wideband measurement", IEEE Trans. Industry Applications, 33(6), pp 1472~1479, 1997.

저 자 소 개

정진수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 친환경연구팀 선임연구원.

김한상 (金翰相)

1966년 2월 14일생. 1994년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2004년 강원대학교 전기공학과(공학석사). 2010년~현재 동대학원 박사과정. 1989~현재 전기안전연구원 수석연구원

김선구 (金善球)

1961년 2월 25일생, 1985년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사), 1991~2002년 한국전기안전공사 재직, 2009년 시립대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002~현재 전기안전연구원 정책기준연구부 책임연구원

한운기 (韓雲基)

1973년 6월 20일생. 1997년 목포대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2001년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1998년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 친환경연구팀 책임연구원.

박찬업 (朴燦嚴)

1977년 5월 8일생. 2001년 2월 강원대학교 삼척캠퍼스 제어계측공학과 졸업(공학사). 2003년 2월 중앙대학교 일반대학원 전자전기공학부 졸업(공학석사). 2007년 2월 동대학원 전자전기공학부(공학박사). 2007년 3월~2009년 2월 중앙대학교 정보통신연구원 연구교수. 2009년 3월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 친환경연구팀 연구원.