Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.3, pp. 120~127 May 2004 논문 18-3-19

접지 임피던스가 중성선 고조파 전류에 미치는 영향

(The Ground Impedance Influence on Neutral Harmonic Currents)

김경철* · 백승현 · 이일무 · 김종욱

(Kyung-Chul Kim · Seung-Hyun Paik · Il-Moo Lee · Jong-Uk Kim)

요 약

스위칭 모드 전원 공급 장치와 같은 비선형 부하의 증가로, 3상 4선식 배전계통을 채용하는 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다. 중성선은 접지 시스템과 연결되어 있기 때문에 접지 임피던스는 중성선 고조파 전류에 영향을 끼친다고 알려져 있다. 현장에서 실측한 고조파 전류와 전압으로 고조파 해석용 3상 등가 회로를 구성하였다. 실측한 값과 MATLAB으로 시뮬레이션 한 값을 수치와 파형으로 비교 검토하였다. 또한 본 논문에서는 중성선 고조파 전류와 접지 임피던스와의 관계를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Abstract

With the proliferation of nonlinear loads such as switching mode power supplies, high neutral harmonic currents in three-phase four-wire distribution system have been observed. It has been known that the grounded impedance has an effect on the neutral current of a system which operates with harmonics present since the neutral conductor is grounded. On-site measurements of harmonic currents and voltages were made and the corresponding equivalent circuit was developed. The circuit model under study was simulated numerically and graphically through the use of the software MATLAB. Simulation results verifying the relationship between the neutral harmonic current and ground impedance are presented.

Key Words : Neutral harmonic currents, Ground impedance, Equivalent circuit, Switching mode power supply, Total harmonic distortion

1. 서 론

우리나라는 3상 4선식 배전 시스템을 채용하고 있다. 컴퓨터, 프린터, 조명시설, 반도체 소자의 스위칭을 이용하는 전자 장비등 비선형 부하가 많이 쓰이고 있다. 이들 비선형 부하는 중성선에 고조파를 발생시키는 주요 원인이 되고 있다. 과다한 중성선 전류는 중성선 도체의 과열, 배전 변압기의 성능저하, 전압의 왜곡, 통신선 잡음, 전기 전자 장비의 오동작 등 고주파 장해를 일으키게 되므로 중성선 고조파 해석이 요구된다[1].

본 논문에서는 비선형 부하와 유사한 특성을 가진 고조파 발생장치[2]를 사용하여 실측을 통하여 데이터를 취득하고, 실측한 데이터를 근거로 고조파 해석용 등가 회로를 모델링 하고자 한다.

중성선은 접지시스템과 연결되어 있다. 중성선과 대지간의 전압은 공중의 안전과 절연의 적합성 등에

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2003년 12월 26일
1차심사 : 2004년 1월 5일
심사완료 : 2004년 1월 29일

중요한 요인이 된다. 대지 전압은 중성선 고조파 전류와 접지 임피던스에 의해 결정 되므로 접지 임피던스 모델링이 필수적이다[3].

본 논문에서는 고조파 해석용 등가 회로에 접지 임피던스 모델을 포함시켜 실측한 중성선 고조파 전류와 대지 전압을 MATLAB[4]으로 시뮬레이션 한 값과 비교하여 개발된 등가 회로를 검증하고자 한다.

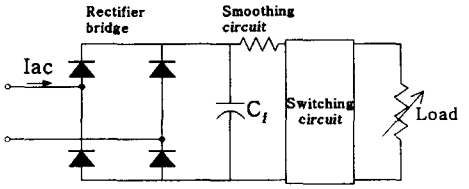
2. 고조파 해석용 등가회로 모델링

고조파 해석용 등가회로를 구성 하려면 비선형 부하의 모델링과 접지 임피던스 모델링이 우선되어야 한다.

2.1 고조파 발생장치

고조파를 발생시키는 장비[2]는 (주)피에스디테크에서 시험용으로 제작한 것을 사용하기로 한다.

그림 1은 간략 회로도와 고조파 발생장치의 외관이다. 주요구성은 교류를 직류로 변환하는 정류부, 평활용 필터부, 스위칭 회로와 변화 가능한 부하로 되어 있다. 편의상 3상 중에 한 개의 상만을 나타내었고, 스위칭 회로의 제어부는 생략한다.



(a) 간략 구성도

(b) 외관

그림 1. 고조파 발생 장치
Fig. 1. Harmonic generating equipment

고조파 발생 장치의 사양은 3상, 220[V], 60[Hz], 0-40[A]이고 전류 왜형률은 70[%]정도이다.

2.2 접지 임피던스

접지 임피던스는 토양의 특성, 대지 저항률, 온도, 습도, 접지체 모양과 접속 상태등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지 임피던스를 수식적으로나 정량적으로 분석하기는 쉽지 않다[3].

본 논문에서 사용하고자 하는 고조파 해석용 접지 임피던스 모델은 참고 문헌 [5,6]에서 제시한 간단한 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C 의 조합으로 그림 2와 같다.

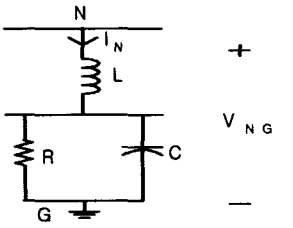


그림 2. 접지 임피던스 모델
Fig. 2. Ground impedance model

그림 2에서 N은 전원의 중성점, IN은 중성선 고조파 전류이고, VNG는 중성선과 대지 사이의 전압. 즉 대지 전압이다. G는 기준 접지극을 나타낸다. 접지 임피던스는 다음과 같다.

$$Zg = jwL + R \mid \frac{1}{jwC}$$

$$= \frac{R}{1+(wCR)^2} + j\left[wL - \frac{wCR^2}{1+(wCR)^2} \right][\Omega] \quad (1)$$

2.3. 시스템 모델링

고조파 해석용 등가회로를 구성 하려면, 비선형 부하의 고조파 전압과 측정이 우선되어야 한다. 측정점에서 본 전압원은 기본파 전압과 고조파 전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{AN} &= V_{A1} + V_{Ah} \\ V_{BN} &= V_{B1} + V_{Bh} \\ V_{CN} &= V_{C1} + V_{Ch} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 VA1은 A상의 기본파 전압이고, VAh는 A상의 고조파 전압으로 h는 2, 3, ...이다.

IEEE Std 519-1992[7]에 따르면 비선형 부하는 기본파 전류에 의한 임피던스 부하와 고조파 전류원의 합으로 나타 낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{Ah} \\ I_B &= I_{B1} + I_{Bh} \\ I_C &= I_{C1} + I_{Ch} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 IA1은 A상의 기본파 전류로 부하 A의 임피던스 ZA로 등가 변환된다. IAh는 A상의 고조파 전류로 h는 2, 3, ...이다.

즉,

$$Z_A = R_A + jX_A = \frac{[V_{AN}]^2 (P_A + jQ_A)}{P_A^2 + Q_A^2} [\Omega] \quad (4)$$

여기서 PA는 A상의 유효전력[W], QA는 A상의 무효전력[VAR]이다. 부하의 중성점 N'와 전원의 중성점 N 사이의 거리가 짧아서 선로 임피던스는 무시한다. 전원의 중성점 N과 접지 시스템은 연결되어 있으므로 앞에서 설명한 접지 임피던스 모델을 적용하기로 한다.

따라서 측정점에서 본 비선형 부하의 3상 등가회로는 그림 3과 같이 유도된다

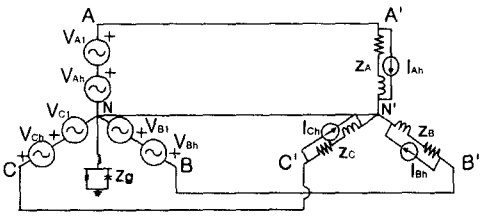


그림 3. 3상 등가회로
Fig. 3. Three-phase equivalent circuit

3. 적용 사례 연구

고조파 전류 및 전압측정은 충북 진천 소재의 동양 산전 내의 변압기 2차측 에서 수행하였다.

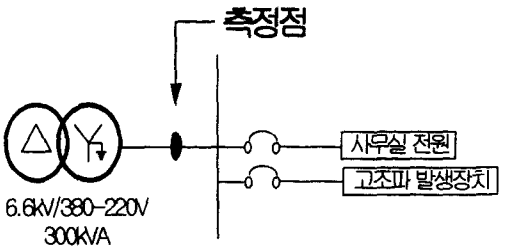


그림 4. 사례연구 배전 시스템
Fig. 4. Single-line diagram of the distribution system under study

그림 4는 사례연구 배전 시스템의 단선도이다. 주변압기는 6.6[kV]의 공급전압을 2차측에 380-220[V] 전압으로 낮추어 사무실 전원과 주로 고조파 발생장치에 전력을 공급하고 있다.

고조파 측정 장비는 BMI 모델 3030A[8]을 사용하였다. 그림 5는 측정 장비 외관으로 노트북과 연결시켜 50 고조파까지의 전압 및 전류를 측정할 수 있다.

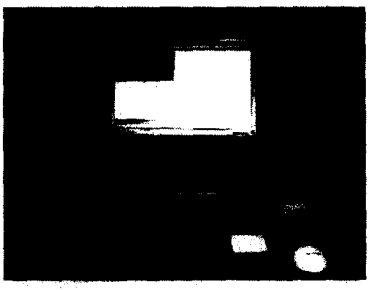


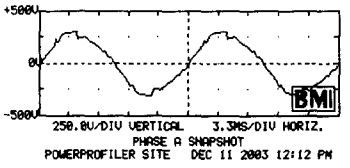
그림 5. BMI 측정 장비
Fig. 5. BMI measurement equipment

그림 6은 측정된 전압 파형이고, 그림7은 전류 파형이다. 측정시 전력은 다음과 같다.

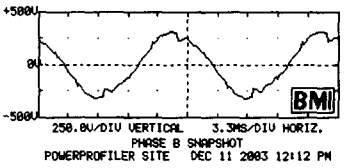
$$\begin{aligned} S_A &= 2.835 + j2.667\,[kVA] \\ S_B &= 2.683 + j2.717\,[kVA] \\ S_C &= 2.690 + j2.749\,[kVA] \end{aligned}$$

전압파형은 비선형 부하로 인해 고조파를 약간 함유하고 있음을 알 수 있다. 측정된 전압을 수치로 나타내면 다음과 같다. 첨자 A는 A상을 나타내고, 첨

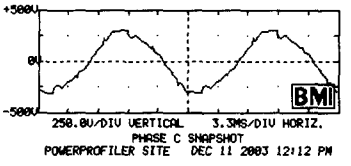
자 1은 기본파를 의미하고, 첨자 THD는 왜형율(Total Harmonic Distortion)을 표시한다. 전압 VNG는 중성선과 접지극간의 전압으로 BMI장비는 실효치 값만을 계산한다.



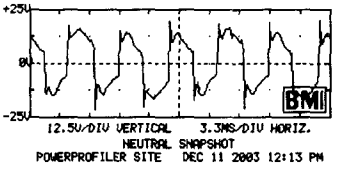
(a) A상



(b) B상

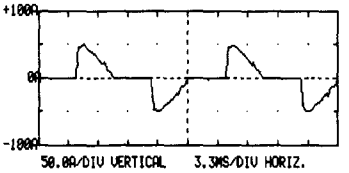


(c) C상

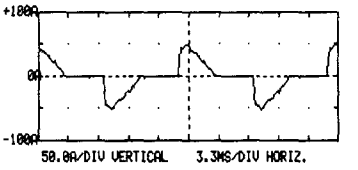


(d) NG상

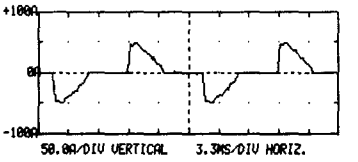
그림 6. 측정된 전압 파형
Fig. 6. Measured voltage waveforms



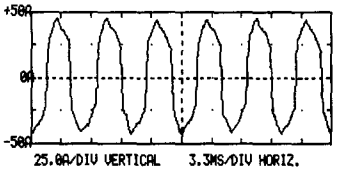
(a) A상



(b) B상



(c) C상



(d) N상

그림 7. 측정된 전류 파형
Fig. 7. Measured current waveforms

$V_{AN}=211.9[V_s]$, $V_{A1}=210.9[V_s]$, $V_{THD,A}=10.2[\%]$
$V_{BN}=216.4[V_s]$, $V_{B1}=215.0[V_s]$, $V_{THD,B}=10.9[\%]$
$V_{CN}=217.0[V_s]$, $V_{C1}=214.9[V_s]$, $V_{THD,C}=10.7[\%]$
$V_{Ng}=13.2[V_s]$

전류파형은 고조파 발생장치 부하로 인하여 고조파가 많이 포함되어 있음을 그림 7에서 알 수 있다. 고조파 함유율 분석표는 표 1에 간추려 놓았다. 편의상 25고조파 차수까지만 나타내기로 한다. 측정된 실효치 전류는 다음과 같다.

$$I_A=23.4[A_s], \quad I_B=22.7[A_s]$$
$$I_C=22.7[A_s], \quad I_N=34.5[A_s]$$

그림 2에서 접지 임피던스를 전달함수로 나타내면

$$Z_g(s)=\frac{V_{NG}}{I_N}=\frac{s^2LCR+sL+R}{sCR+1} \tag{5}$$

이 된다. BMI로 측정한 중성선 전류와 중성선과 대지간 전압으로부터 접지저항 R 값을 구한다.

$$R = \frac{V_{NG}}{I_N} = \frac{13.2}{34.3} = 0.385[\Omega]$$

인덕턴스 L과 커패시턴스 C는 측정한 중성선 전류와 중성선과 대지간 전압으로부터 구할 수 있다. 구하는 방법은 일종의 시행착오법인 Pattern Search[9]로 구하기로 한다. 그림 8과 같이 Pattern Search법은 L과 C값을 변화시키면서 실측된 $V_{NG,m}$값(실효치)과 파형을 시뮬레이션 한 $V_{NG,s}$ 값과 파형을 비교해서 일정 범위 내에 들 때 까지 반복하여 구한다.

표 1. 측정된 전류의 고조파 함유율
Table1. Harmonic spectrum of current waveforms

고조파 차수	A상		B상		C상		N상	
	크기 [%]	위상 [°]	크기 [%]	위상 [°]	크기 [%]	위상 [°]	크기 [%]	위상 [°]
1	100.0	-41	100.0	76	100.0	-164	100.0	160
2	0.3	-68	0.3	126	0.5	23	7.7	-156
3	58.6	63	60.7	52	59.7	54	2939.6	-127
4	0.2	25	0.3	136	0.5	-88	3.2	97
5	21.7	-153	23.5	64	22.2	-52	111.6	123
6	0.4	-136	0.3	-151	0.6	-174	19.8	17
7	19.1	11	19.4	103	19.5	-131	106.0	-130
8	0.3	6	0.5	-170	0.6	100	9.6	-66
9	11.7	156	13.2	114	12.5	121	586.5	-60
10	0.3	177	0.4	-133	0.5	-5	3.3	63
11	9.4	-37	9.1	151	9.0	41	108.9	-155
12	0.3	-54	0.4	-115	0.5	-98	16.1	75
13	6.3	114	6.5	180	5.9	-52	72.3	-43
14	0.3	145	0.1	-147	0.4	-173	11.1	-19
15	5.2	-63	5.4	-133	5.7	-113	235.4	60
16	0.3	-71	0.4	-6	0.4	121	3.2	140
17	6.5	96	5.3	-98	5.2	148	96.2	-55
18	0.3	116	0.3	-11	0.6	16	14.3	-169
19	5.9	-123	6.7	-67	5.5	77	79.8	50
20	0.3	-89	0.1	-16	0.5	-72	12.9	87
21	3.7	41	5.6	-67	6.1	-37	189.3	128
22	0.3	69	0.5	56	0.4	-170	8.0	-122
23	5.3	-152	2.6	-10	2.9	-126	89.0	22
24	0.5	-108	0.3	47	0.5	103	6.1	-70
25	3.8	-24	5.5	16	4.5	166	57.1	135

주] $I_{A1} = 19.1[A_s]$, $I_{THD,A} = 69.3[\%]$
$I_{B1} = 18.5[A_s]$, $I_{THD,B} = 70.6[\%]$
$I_{C1} = 18.7[A_s]$, $I_{THD,C} = 69.8[\%]$
$I_{N1} = 0.8\ [A_s]$, $I_{THD,N} = 4366.9[\%]$

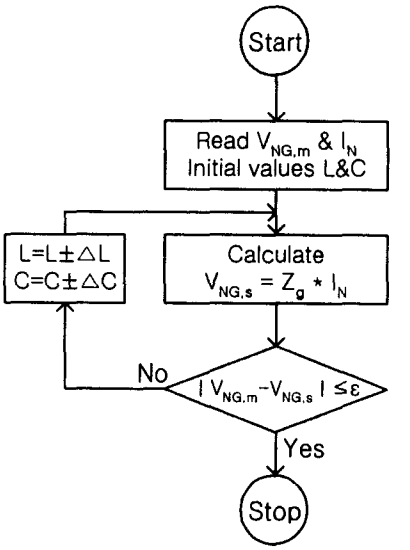
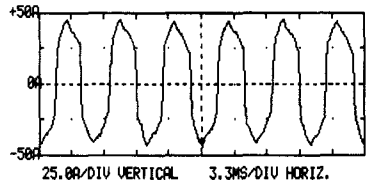


그림 8. PSM 순서도
Fig. 8. Flow chart of Pattern Search Method

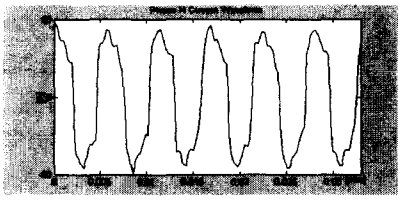
Pattern Search법으로 구한 값은 다음과 같다.

$$L = 0.135[mH], \quad C = 650[\mu F]$$

접지 임피던스 모델에 R, L, C값을 넣고 측정 한 값과 시뮬레이션 한 값을 비교한다. 그림 9는 측정된 중성선 전류 파형과 시뮬레이션한 중성선 전류 파형이다. 그림 10은 측정된 전압과 시뮬레이션 한 대지 전압을 비교한 그림이다.

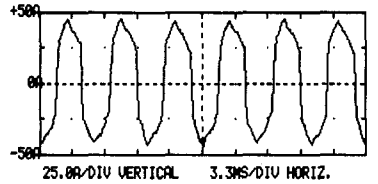


(a) 측정

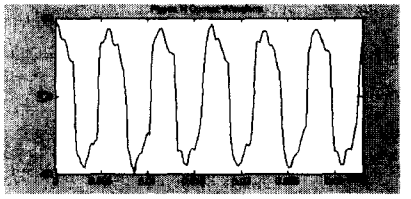


(b) 시뮬레이션

그림 9. 중성선 전류 파형
Fig. 9. Neutral current waveforms



(a) 측정



(b) 시뮬레이션

그림 10. 대지 전압 파형
Fig. 10. Neutral-to-ground voltage waveforms

시뮬레이션한 중성선 전류는 측정된 상전류에서 구한 것이다.

$$I_{NS} = I_{Alm} + I_{Blm} + I_{Clm}$$
$$I_{Nm} = 34.5[A_{\ s}],\ I_{THD,Nm} = 4366.9[\%]$$
$$I_{Ns} = 34.47[A_{\ s}],\ I_{THD,Ns} = 3703.0[\%]$$

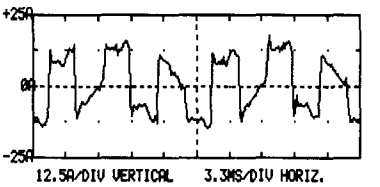
측정된 대지 전압 ($V_{NG,m}$)과 시뮬레이션한 대지 전압($V_{NG,s}$)의 비교는 다음과 같다.

$$V_{NG,m} = 13.2[Vrms]$$
$$V_{NG,s} = 13.2[Vrms],\ V_{NG,s\ THD} = 3513[\%]$$

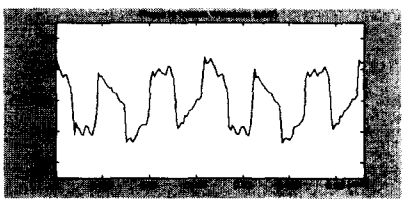
다른 중성선 고조파 전류에 대한 앞서 구한 접지 임피던스 모델을 적용하여 대지 전압을 측정치와 시뮬레이션 값을 비교하여 R, L, C값이 적절한지를 검토하고자 한다. 같은 비선형 부하에 영상 고조파 전류 저감 장치[10]를 설치하여 중성선 전류와 대지전압을 측정하였다. 사용된 영상고조파 전류 저감 장치는 상용화된 것으로 사양은 3상, 380[V], 40[A], 60[Hz] 이다.

그림 11은 측정된 중성선 전류 파형과 시뮬레이션한 중성선 전류 파형이다. 그림 12는 측정된 대지 전압과 시뮬레이션한 대지 전압을 비교한 것이고, 측정시 전력은 다음과 같다.

$$S_A = 3.520 + j2.599\,[kVA]$$
$$S_B = 3.739 + j2.787\,[kVA]$$
$$S_C = 3.334 + j3.142\,[kVA]$$

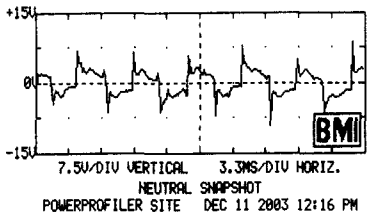


(a) 측정

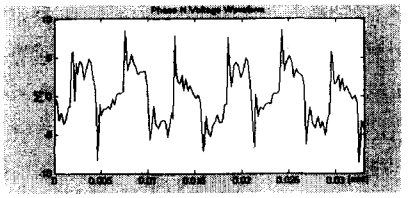


(b) 시뮬레이션

그림 11. 중성선 전류 파형
Fig. 11. Neutral current waveforms



(a) 측정



(b) 시뮬레이션

그림 12. 대지 전압 파형
Fig. 12. Neutral-to-ground voltage waveforms

수치로 비교한 중성선 전류는 다음과 같다.

$$I_{Nm} = 8.7[A_{\ s}],\ I_{THD,Nm} = 358.7[\%]$$
$$I_{Ns} = 8.4[A_{\ s}],\ I_{THD,Ns} = 307.1[\%]$$

수치로 비교한 대지 전압은 다음과 같다.

$$V_{NG,m} = 3.0[Vrms]$$
$$V_{NG,s} = 3.3[Vrms],\ V_{NGs,THD} = 320.0[\%]$$

고조파 해석용 접지 임피던스 모델은 그림 2와 같이 간단한 R, L, C 조합으로 나타내었다.

중성선의 고조파 전류가 대지 전압에 미치는 영향을 수식과 정량적으로 표현할 수 있었다고 사료 된다. 상용 주파수(60Hz) 에서는 접지 임피던스가 $0.3815 + j0.01428[\Omega]$으로 주로 접지 저항 R 값이고, 주파수가 커지면 리액턴스 성분이 영향을 많이 끼치게 된다. 커패시턴스 C의 영향인 과도 현상은 대지 전압 파형에서 관측할 수 있었다.

4. 결 론

우리나라 배전 시스템은 3상4선식을 채택하고 있어 중성선에 비선형 부하로 인한 고조파 발생으로 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다.

사례 연구 시스템의 중성선 전류는 34.5[A]이고 전류 왜형율은 선전류인 경우는 약 70.0[%]이고, 중성선은 4366.9[%]이나 포함되어 있었다.

중성선은 접지 시스템과 연결되어 있어 접지 임피던스의 영향으로 중성선과 대지간의 전압이 발생하여 공중의 안전에 문제가 되고 전기전자 장비의 오동작을 일으킬 수도 있다. 본 논문에서는 고조파 해석용으로 접지 임피던스의 모델링과 비선형 부하 모델링을 포함한 3상 등가회로를 제안 하였다.

사례연구 시스템의 접지 임피던스는 저항 0.385[Ω], 인덕턴스 0.135[mH], 커패시턴스 650[μF]을 얻어 측정한 값과 시뮬레이션 한 값을 비교한 결과로 등가회로의 타당성을 검증하였다. 중성선 전류는 실측한 34.5[A], 왜형율 4366.9[%]였고, 시뮬레이션한 중성선 전류는 34.47[A], 왜형율 3703.0[%]으로 유사하였다. 다른 중성선 고조파 전류가 유입되었을 때는 실측한 중성선 전류 8.7[A], 시뮬레이션한 중성선 전류 8.4[A]이었고, 실측한 대지 전압은 3.0[V]이고 시뮬레이션 한 대지전압은 3.3[V]로 다소 차이는 있었지만 중성선 고조파 전류가 대지전압에 미치는 영향을 수식과 정량적으로 나타낼 수 있었다. 상전류의 고조파 측정만으로 중성선 고조파 전류와 대지전압을 MATLAB 시뮬레이션으로 수치와 파형을 예측할 수 있다고 사료된다.

향후 IEEE 표준으로 사례연구 접지 시스템을 시험하여 정상상태 및 과도상태의 접지 임피던스를 모델링 하고자 한다. 또한 중성선 고조파 전류와 접지 임피던스의 관계를 정립할 예정이다.

본 연구는 전력산업 기술개발사업으로 수행되었음.

References

[1] J.C. Balda and etal, "Measurements of Neutral Current and Voltages on a Distrivution Feeder", IEEE Transaction on Power Delivery, October 1997.
[2] "고조파 발생 장치 사양서", (주)피에스디테크, 2002.
[3] IEEE Std 81-1983, " IEEE guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", IEEE Inc, 1983.

[4] "MATLAB User's Manual", Math Work, 2002.
[5] M. Nayel and etal, "A Study on a Mutual Grounding Impedance and Its Transient Characteristic", IEEE Transmission and Distribution Conference , 2002.
[6] I.F. Gonos, F.V Topalis and I.A. Stathopulos, "Transient Impedance of Grounding Rods", IEEE High Voltage Engineering Symposium, 1999.
[7] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE Inc, April 1993.
[8] "3030A Profiler ", Dranetz BMI, 2000.
[9] J.A. Cadzow and H.R. Martens, "Discrete-time and Computer Control Systems", Prentice-Hall Inc, 1970.
[10] "중성선 영상 고조파 저감 장치 사양서", (주) 피에스디테크, 2003.

◇저자소개◇

김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국 전기연구소 선임 연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.

백승현 (白承鉉)

1975년 7월 13일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.

이일무 (李一茂)

1971년 7월 16일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 (주)피에스디테크 연구원. 2003~현재 동 대학원 박사과정.

김종욱 (金種郁)

1972년 5월 21일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 홍익대학교 대학원 졸업. 2002~현재 동양산전(주) 연구원.