

A Study on The Shunting Rates Evaluation of GIS type Grounding Systems

金在珥^{*} · 鄭吉朝^{*}
(Jae-Yee Kim · Gil-Jo Jung)

Abstract - The testing and evaluating shunting rates of operating substations have become difficult recently due to various factors including increased fault current, limited area of urban substations and construction of substations in mountain location. In this paper, we have analysed the computation and measurement method of shunting currents that be applied grounding system maintenance of power substations. Also, simple and detailed test methods using 70Hz current injection are explained. A computer program is developed for a study on the shunting properties such as grounding impedance and shunting rates of grounding current, and the simulation results are compared with the measurement data to prove validity and effectiveness of the program and measurement method under commercial operation of a GIS type model substation respectively.

Key Words : Shunting Rate, Substation, Grounding System, GIS, Maintenance

1. 서 론

오늘날 전력회사에서는 환경친화적 송변전설비를 조성하고 용지난 등을 극복하기 위한 노력의 일환으로 도심 변전소(S/S, Substation)를 GIS(Gas-Insulated Switchgear) 옥내형으로 바꾸어 온 결과 최근에는 GIS형 변전소가 그 주류를 이루고 있다.

지락사고시 접지계에 유입되는 사고전류의 분류율 산정은 경제적이고 안전한 접지설계를 위하여 인입T/L(Transmission Line)의 종류나 회선 수, D/L(Distribution Line)의 형태와 회선 수 등을 고려하여 합리적이고 타당하게 결정하여 적용하여야 하고, 경년변화에 기인한 유지보수를 위한 접지계 진단은 변전소 상업운전 상태에서 행하여야만 휴전을 예방하고 정확한 진단이 가능하다.^[1~9]

분류율의 측정 및 산정에 관한 문헌^[10~11]은 상업운전중인 변전소에 대한 측정의 특수성 때문에 소수에 지나지 않고, G/L(over-head Grounding Line)로의 분류만을 가정했거나 축소된 모델접지계에 적용한 것이다.

따라서, 본 연구에서는 최근에 건설된 가장 일반적인 GIS

형 변전소를 모델로 선정하여 운전중인 변전소 접지계의 종합적인 분류율 산정을 위한 시스템적 접근방법을 보이고 그 타당성을 입증하여 접지계 진단의 실용화에 기여하기 위한 실증적 연구를 수행하고자 한다.

2. 접지계의 분류율

지락사고가 발생하면 지락전류 일부가 T/L의 가공지선이나 D/L의 중성선을 따라 흐르고 나머지 전류가 접지망을 통하여 대지로 흐르게 되며, 각 접지계를 통하여 흐르는 접지전류의 지락전류에 대한 비율을 분류율이라고 한다.

이론적으로는 접지임피던스가 낮을수록 사고전류 유입시의 전위상승 측면에서 유리하겠지만, 한정된 공간에서 접지임피던스를 1[Ω]이하로 낮추는 데는 기술적인 어려움이 있고 경제적으로도 바람직하지 못하기 때문에 접지망에 연결된 G/L 이나 D/L의 중성선을 감안한 종합적인 접지계로서의 분류율을 정확히 산정하여 접지계의 설계 및 유지보수에 적용하지 않으면 안된다.

분류율 산정을 위한 대기귀환임피던스와 기타 다양한 임피던스 계산은 일반적으로 그림 2.1의 사다리형 모의 등가회로에 의해 Carson-Pollaczek 방정식에 의거하여 행한다.^[11]

^{*} 교신저자, 正會員 : 東新大 工大 情報通信工學科 教授, 工博
E-mail : j@dsu.ac.kr

^{*} 正會員 : 電力研究院 責任研究員, 工博
接受日字 : 2004年 12月 31日
最終完了 : 2005年 3月 4日

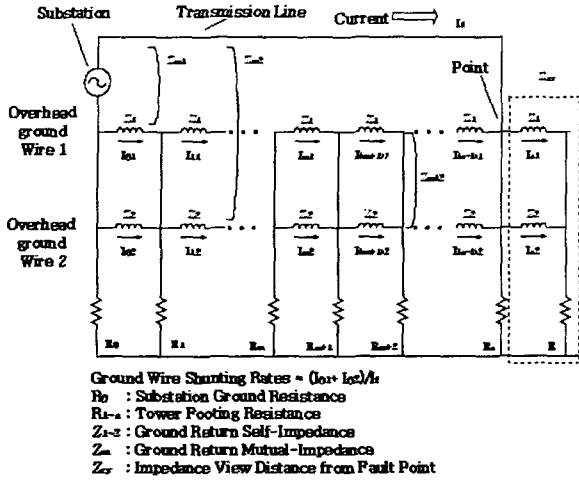


그림 2.1 모의등가회로
 Fig. 2.1 Equivalent circuit for simulation

$$V_{m+1} = V_m - Z_1 I_{m1} - Z_{M12} I_{m2} - Z_{M1} I_a \quad (2.1)$$

$$V_{m+1} = V_m - Z_2 I_{m2} - Z_{M12} I_{m1} - Z_{M2} I_a \quad (2.2)$$

$$I_{(m+1)1} + I_{(m+1)2} = I_{m1} + I_{m2} - \frac{V_{m+1}}{R_{m+1}} \quad (2.3)$$

$$\frac{V_0}{R_0} + I_{01} + I_{02} + I_2 = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{V_n}{R_n} + \frac{V_n}{Z_{rs}} = I_a + I_{(n-1)1} + I_{(n-1)2} \quad (2.5)$$

$$I_{n1} + I_{n2} = \frac{V_n}{Z_{rs}} \quad (2.6)$$

$$I_{n1} = I_{n2} \quad (2.7)$$

여기서, 각각의 파라미터는 다음과 같다.

I_a : 사고전류,

I_{mi} : m 과 $(m+1)$ 번째 철탑사이에 있는 i 번째

가공지선의 전류

V_m : m 번째 철탑의 전위

Z_i : i 번째 가공지선의 대지귀환 자기임피던스

Z_{mi} : 전력선과 i 번째 가공지선간의 대지귀환

상호임피던스

Z_{m12} : 가공지선의 대지귀환 상호임피던스

l : 경간 길이 (span length)

R_m : m 번째 철탑 footing 저항

V_0 : 고장점 전위

R_n : 고장점 철탑 footing 저항

Z_{rs} : 고장점으로부터의 임피던스

3. 분류율 계산 프로그램의 주요 구성내용

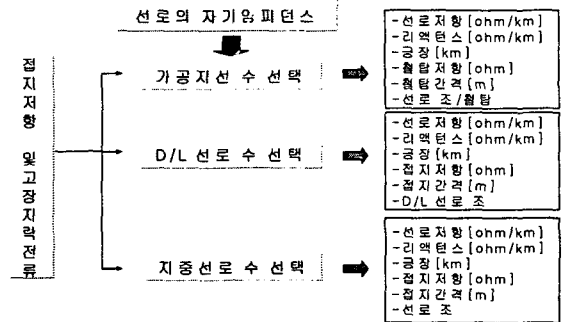


그림 3.1 프로그램의 구성
 Fig. 3.1 Program composition

분류율 계산 프로그램의 구성은 그림 3.1과 같이 먼저 선로의 자기 임피던스를 구하고, G/L, D/L, 지중선로에 적용하여 단위 m당 저항 및 리액턴스를 구하며, 적용이 곤란한 경우 선로의 자기 임피던스를 직접 입력하여 단위 m당 저항 및 리액턴스를 구한다. 그리고 변전소에 연결된 G/L, D/L, 지중선로의 제원을 입력하고, 변전소의 접지저항과 고장지락전류에 대해 G/L, D/L의 중성선, 지중선로의 쉬스에 흐르는 전류와 분류율을 구한다.

대지귀환 임피던스와 기타 다양한 임피던스 계산은 Carson-Pollaczek 방정식에 기초하였고, 집중상수는 사다리 회로에 의해 모의했다고 가정하였다.^[10~11]

상기 참고문헌은 주로 T/L측 가공지선으로의 분류전류만을 감안하였기 때문에 간과되거나 생략된 D/L측 중성선으로의 분류전류도 본 프로그램에서는 계산할 수 있게 구성함으로써 다중접지방식을 채택하고 있는 우리나라의 배전선로 실정을 감안하여 개발하였다.

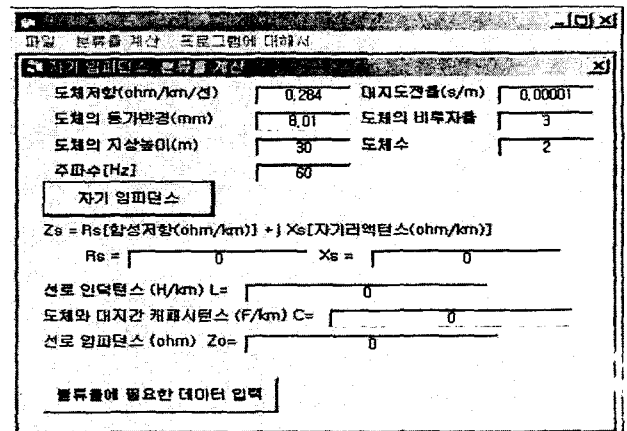


그림 3.2 프로그램 구성화면
 Fig. 3.2 Program composition screen

분류율 계산 프로그램의 구성화면은 그림 3.2와 같고, 도체저항[Ω/km/선], 대지 도전율[s/m], 도체의 등가반경[mm], 도체의 비투자율, 도체의 지상높이[m], 도체의 수, 주파수 [Hz] 등을 선택하여 선로의 자기 임피던스를 구할 수 있는 기본 조건을 표시하고 수정할 수 있다.

프로그램 구성화면에서 수정된 조건에 따라 자기 임피던스 버튼을 누르면 자기 임피던스가 그림 3.3과 같이 계산되고, 자기임피던스에 따라 저항[Ω]과 선로 인덕턴스[H/km], 도체와 대지간 캐퍼시턴스[F/km], 선로 임피던스가 계산된다.

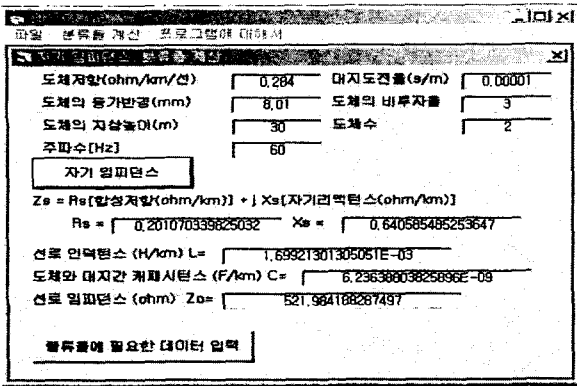


그림 3.3 자기 임피던스 계산
Fig. 3.3 Self-impedance computation

프로그램 구성화면에서 자기 임피던스 버튼을 누르고 계산된 상태에서 분류율에 필요한 데이터 입력 버튼을 누르면 분류율에 필요한 데이터 입력 카드가 그림 3.4와 같이 나타난다. 변전소의 전압[kV], 지락전류[kA], 지락전류 주파수[Hz], 변전소 접지 저항[Ω]을 입력한 다음, 변전소에 연결된 G/L 수, 지중선로 수, D/L 중성선수를 선택한다. 선택된 G/L, 지중선로, D/L 중성선등의 각각에 대한 입력 탭을 선택하여 기록한다.

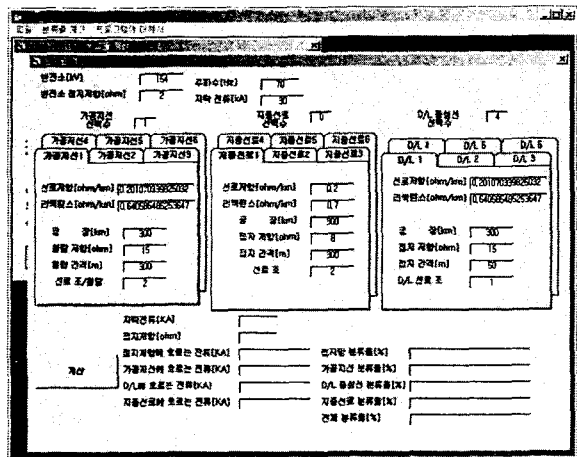


그림 3.4 데이터 입력 및 제 계산
Fig. 3.4 Data input and computations

4. 시뮬레이션 및 측정결과 고찰

4.1 시뮬레이션

PC에 기반을 둔 모델변전소의 분류전류 측정시스템 구성은 그림 4.1과 같다. 시험전류 주입을 위한 보조전극은 변전소로부터 500[m] 떨어진 곳까지 선을 끌고 나가서 접지봉을 1[m]간격으로 10개 타설하고, 주파수를 가변하여 시험전류를 주입할 수 있는 발전기와 변전소의 접지전극과 연결한다.

모델변전소는 육내식변전소로서 G/L 2조가 변전소 건물 옥상으로부터 철탑에 연결되어 있어서 G/L 1, 2에 Fluke36의 클램프를 걸어서 휴대용 오실로스코프(Pico Scope)와 노트북에 연결하여 G/L 1, 2에 유입된 전류를 측정한다.

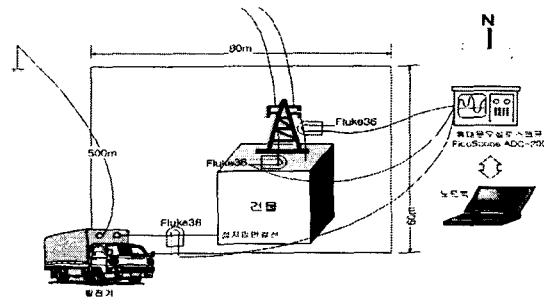


그림 4.1 분류전류 측정시스템
Fig. 4.1 Measurement system of shunting currents

따라서, 최근에 완성된 GIS 육내식 모델변전소의 측정 등가회로 모델(정상상태)을 그림 4.2와 같이 구성하여 개발한 프로그램으로 분류율을 계산하였다.

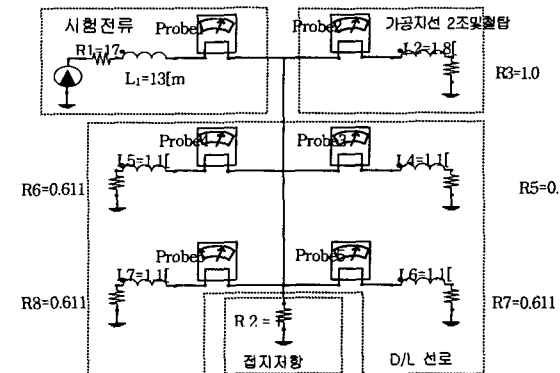


그림 4.2 분류전류 측정 등가회로 모델
Fig. 4.2 Equivalent circuit model for shunting currents measurement

계산된 값은 표4.1과 같고, 접지저항에 최대치 30[A]를 주입하는 경우 접지저항 1[Ω], T/L 공장을 30[km]로하고, 300[m]마다 접지저항 15[Ω]에 연결되어있다고 가정하였다. 이 경우 두 개의 G/L로 분류되는 전류는 5.83[%], 4개의 D/L로 분류되는 전류는 66.95[%]이므로 전체 분류율은 72.78[%]로 나타났다.

표 4.1 분류전류 계산 값

Table 4.1 Computation values of shunting currents

구분	S/S 접지 저항	T/L 공장	철탑 기수 [ea]	철탑 접지 저항 [Ω]	입력 전류 [70Hz] [A]	G/L (2조) [A]	D/L(4 회선) [A]	G/L & D/L [A]
옥내식	1[Ω]	30[km]	100	15	30[A]	1.750	20.085	21.835
분류율 [%]	-	-	-	-	-	5.83	66.95	72.78

4.2 측정결과 및 고찰

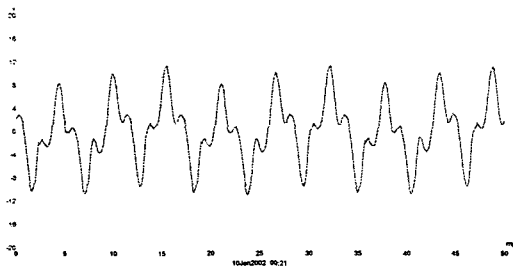


그림 4.3 접지전위

Fig. 4.3 Grounding potential

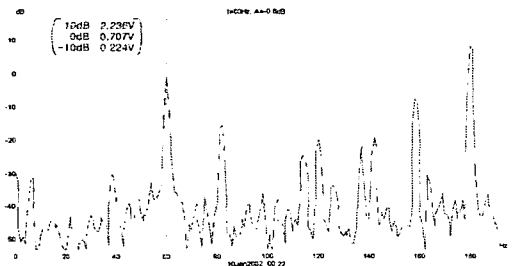


그림 4.4 접지전위 스펙트럼

Fig. 4.4 Grounding potential spectrum

접지방과 무한원점이라 할 수 있는 변전소 접지전극으로부터 500[m] 이격된 보조접지전극 간의 영전위 측정은 그림 4.3 과 같으며, 전압의 피크-피크치가 약 20Vp-p정도이며, 주파수 분석을 위한 영전위 스펙트럼은 그림 4.4와 같다. 주로 60[Hz]와 3고조파에서 불요파가 많이 발생하고 있으며, 70[Hz]로 고정시켰다.

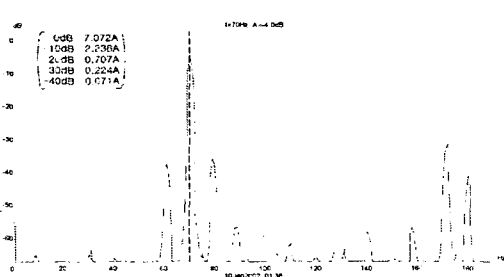


그림 4.5 시험전류 스펙트럼

Fig. 4.5 Test current spectrum

인가된 시험 전류를 주파수 분석한 것은 그림 4.5와 같으며, 70[Hz]에서 4.4622[A]가 인가되고 있음을 측정하였다.

그림 4.6은 G/L 1, 2의 전류 스펙트럼을 나타내고 있는데, G/L 1은 190.3[mA]가 흐르고 있고, G/L 2는 149.4[mA]가 흐르고 있다. 인가된 시험전류 4.4662[A]로부터 G/L 1, 2에 분류된 분류율은 7.61[%]이다.

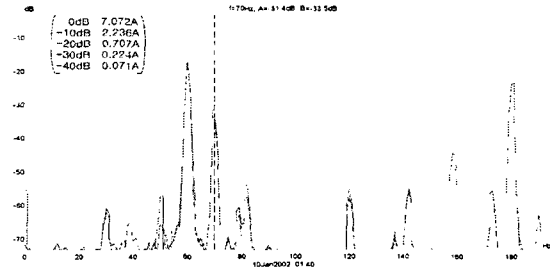


그림 4.6 G/L 1, 2 전류 스펙트럼(시험전류 : ON)

Fig. 4.6 G/L 1, 2 Current spectrum(test current : ON)

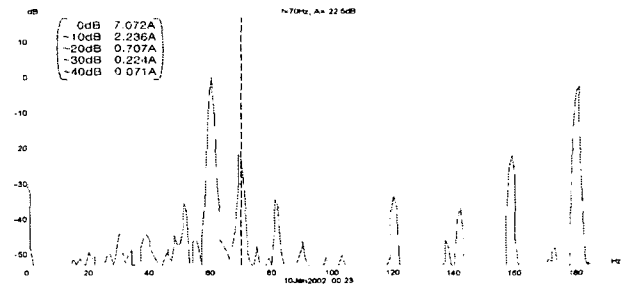


그림 4.7 #1 D/L 중성선 전류 스펙트럼(시험전류 : ON)

Fig. 4.7 #1 D/L N-Line Current spectrum(test current : ON)

70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 #1 D/L에 흐르는 전류를 주파수 분석한 스펙트럼은 그림 4.7과 같다. 그림 4.7은 시험전류를 인가하지 않은 상태의 주파수 스펙트럼과 시험 전류의 스펙트럼을 나타내고 있으며, #1 D/L에 흐르는 전류(70 [Hz])는 530.33[mA]가 흐르고 있다. 인가된 시험전류 4.4622[A]로부터 #1 D/L의 분류율은 11.88[%]이다.

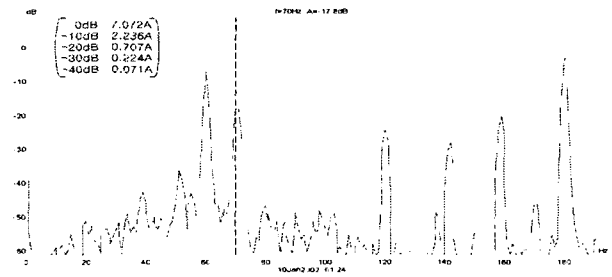


그림 4.8 #2 D/L 중성선 전류 스펙트럼(시험전류 : ON)

Fig. 4.8 D/L N-Line Current spectrum(test current : ON)

70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 #2 D/L에 흐르는 전류를 주파수 분석한 스펙트럼은 그림 4.8과 같으며, 시험전류를 인가하지 않은 상태의 주파수 스펙트럼과 시험전류의 스펙트럼을 나타내고 있으며, #2 D/L에 흐르는 전류(70[Hz])는 91.1[mA]가 흐르고 있다.

인가된 시험전류 4.4622[A]로부터 #2 D/L의 분류율은 20.41[%]이다.

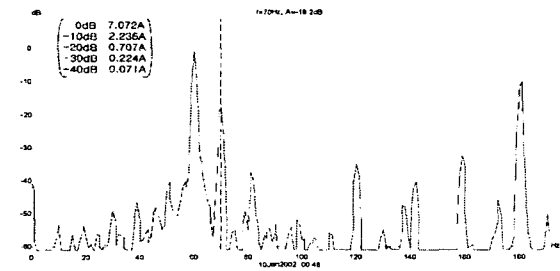


그림 4.9 #3 D/L 중성선 전류 스펙트럼(시험전류 : ON)
Fig. 4.9 #3 D/L N-Line Current spectrum(test current : ON)

70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 #3 D/L에 흐르는 전류를 주파수 분석한 스펙트럼은 그림 4.9와 같다. 그림 4.9는 시험전류를 인가하지 않은 상태의 주파수 스펙트럼과 시험전류의 스펙트럼을 나타내고 있으며, #3 D/L에 흐르는 전류(70[Hz])는 870[mA]가 흐르고 있다. 인가된 시험전류 4.4622[A]로부터 얻은 #3 D/L의 분류율은 19.50[%]이다.

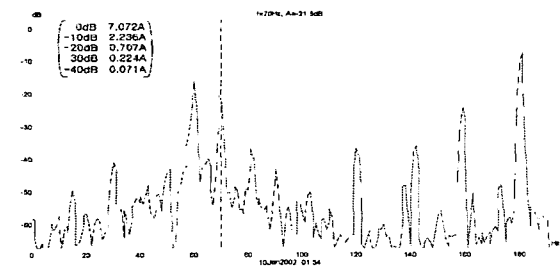


그림 4.10 #4 D/L 중성선 전류 스펙트럼(시험전류 : ON)
Fig. 4.10 #4 D/L N-Line Current spectrum(test current : ON)

70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 #4 D/L에 흐르는 전류를 주파수 분석한 스펙트럼은 그림 4.10과 같다. 그림 4.10에서 나타나 있듯이 시험전류를 인가하지 않은 상태의 주파수 스펙트럼과 시험전류의 스펙트럼을 나타내고 있으며, #4 D/L에 흐르는 전류(70[Hz])는 608.9[mA]가 흐르고 있다. 인가된 시험전류 4.4622[A]로부터 얻은 #4 D/L의 분류율은 13.65[%]이다.

70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 G/L 1, 2에 흐르는 전류와 #1 D/L, #2 D/L, #3 D/L 및 #4 D/L 중성선에 흐르는 전류는 클램프 Fluke36 (100[mV/A])을 사용하

여 디지털오실로스코프로 측정된 것이 표 4.2와 같다. G/L 1, 2에 흐르는 전류는 339.7[mA]가 흐르고, G/L로의 분류율은 7.61[%]이다. 또한 4개의 D/L 중성선에 흐르는 전류의 합은 2.9204[A]가 흐르고, D/L로의 분류율은 65.45[%]이다.

측정전류 중 입력전류의 주파수와 동일한 70[Hz]대역에서 나타나는 전류크기 및 입력전류와 분류전류의 위상차를 표 4.2에 요약하였다.

이상의 결과로부터 인가된 시험전류는 G/L 보다는 대부분 D/L로 분류됨을 확인 하였고, 전체 분류율은 73.06[%]임을 알 수 있으며, 입력전류와 분류전류의 위상차가 180°라는 것은 접지망으로부터 G/L 및 D/L 중성선으로 분류되어 나감을 의미한다.

표 4.2 모델변전소의 분류율

Table 4.2 Shunting rates of a model substation

입력 전류 [A](1)	G/L(2)		D/L(3)				분류율 [%]	(1)과 (2) 및 (3)의 위상차
	#1	#2	#1	#2	#3	#4		
4.4622	0.1903A (4.26%)	0.1494A (3.35%)	0.5303A (11.88%)	0.9111A (20.41%)	0.8701A (19.50%)	0.6089A (13.65%)	3.2601A (73.06)	180°
	0.3397A (7.61%)		2.9204A (65.45%)					

5. 결 론

GIS형 변전소 접지계(정상상태시)의 분류율 해석에 관한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 상업 운전중인 변전소 접지계의 분류율 측정방법을 제안하여 시뮬레이션을 위해 개발된 프로그램을 이용한 결과와 비교한 결과, 분류율의 측정치는 73.06[%]이고 계산치는 72.78[%]로 두 결과가 매우 잘 일치하였다.
- 측정시 인가전류는 상호결합에 의한 잡음의 영향을 피하고 측정 및 분석의 용이성을 제고하기 위하여 상용주파수(60[Hz])와 다르게 모델변전소에서 나타나지 않는 70[Hz] 신호를 적용하였다.
- 모델변전소의 분류율 측정치는 설계치의 79.5[%]로써 가압 후 측정치이므로 G/L 및 D/L의 중성점이 접지망에 연결된 효과로 볼 수 있다.
- 모델변전소의 경우 70[Hz]의 시험전류가 4.4622[A]가 인가된 상태에서 G/L 1, 2에 흐르는 전류는 339.7[mA], G/L 분류율은 7.61[%]이다. 또한 4개 D/L 중성선에 흐르는 전류의 합은 2.9204[A]이므로 D/L 중성선 분류율은 65.45[%]이며, 이는 인가된 시험전류는 G/L보다는 대부분 D/L 중성선으로 분류됨을 의미한다.
- 따라서, 제안한 측정시스템과 개발한 프로그램은 경제적인 접지설계와 안전한 접지계 진단의 실용화에 크게 기여 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, 변전설계기준-2602 접지시설제지침 (1968년 제정, 1984년 개정, 2000년 재개정) ;
- [2] 전력연구원, 운전중인 변전소의 접지계통 진단기술 개발 연구보고서, 한국전력공사, pp.3~106, 2002.
- [3] J. MA and F. P. Dawalibi, "Effects of Inductive Coupling Between Leads In Ground Impedance Measurements using the Fall-Of-Potential Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No. 1, pp. 266~271.1999.
- [4] 電気設備工事技術研究會 編, 接地工事 設計 地工マニコアル(第2版), オーム社, pp.317~326. 昭和54年.
- [5] IEEE Std-80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE, pp.113~118, 2000.
- [6] IEEE Std-142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE, pp.71~95, 1972.
- [7] 高橋健顔, 接地技術入門, オーム社, pp.69~100, 1993.
- [8] 高橋健顔, 接地設計入門, オーム社, pp.157~180, 1993.
- [9] EPRI, Transmission Line Reference Book-345 [kV] and Above(Second Edition), Electric Power Research Institute, pp.643~665,1982.
- [10] P. R. Pillai, E. P. Dick, "A Review on Testing and Evaluating Substation Grounding Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp.53~61, January, 1992.
- [11] Hiroyuki Makino, Hirokazu Itakura, "Study of Overhead Ground-wire Shunting Rates during Ground Failure, for 500[kV] Substation Ground System Design", IEEE Proceedings, pp. 994~999, 1999.

저 자 소 개



김재이 (金在珮)

1952년 12월 1일생.
 1979년 건국대 전기공학과 졸업.
 1990년 건국대 대학원 졸업(공학박사)
 1992~1993 동지사대학 Visiting Scholar
 현재 동신대학교 정보통신공학과 교수
 Tel : 061-330-3192
 Fax : 062-330-3190
 E-mail : j@dsu.ac.kr



정길조 (鄭吉朝)

1949년 8월 16일생.
 1983년 중앙대 전기공학과 졸업
 1995년 연세대 대학원 졸업(공학석사)
 2002년 숭실대 대학원 졸업(공학박사)
 현재 전력연구원 책임연구원