

지락고장에 의해 금속제 유연전선관에 유도된 개폐서지전압의 특성

(Characteristics of the Switching Surge Voltages Induced at Metal Flexible Conduits Due to Ground Faults)

이복희* · 신건진 · 박희열 · 엄상현 · 김유하

(Bok-Hee Lee · Gun-Jin Shin · Hee-Yeoul Park · Sang-Hyun Um · You-Ha Kim)

Abstract

This paper presents the transient behavior of the switching surge voltages generated by interruption of DC ground fault currents flowing through metal flexible conduits. All fault circuits consist of line parameters such as resistance, inductance, capacitance and conductance. The use of nonmagnetic metal conduits should be taken into account in order to reduce the inductance of battery charger distribution circuits. The frequency-dependent circuit parameters of metal flexible conduits were measured. The switching surge voltages generated at the ground fault circuit consisted of steel-galvanized alloy and aluminium conduits were investigated. As a result, the impedances of metal flexible conduits are significantly increased over the range of the frequency above 10 kHz and the switching surge voltages generated along aluminium flexible conduit are lower than those along steel-galvanized alloy conduit when DC fault current is interrupted.

Key Words : Metal Flexible Conduit, Switching Surge, Ground Fault, Nonmagnetic Conduit, Circuit Parameter

1. 서 론

산업의 현대화와 정보통신기술의 발달로 전기에너지의 사용이 증대하였으며, 전력공급의 중단이 없

는 높은 신뢰도와 고품질 전력의 수요가 급증하고 있다. 또한 태양광 발전설비를 비롯하여 신재생 전기에너지의 발생과 저장 및 전기자동차의 이용 기술과 관련된 스마트그리드분야에서도 직류를 사용하는 비중이 증대하고 있으며, 앞으로 확대될 전망이다[1]. 예비전원설비와 비상용의 소방설비, 병원설비, 전산센터 등의 무정전 전원공급이 요구되는 부하가 늘어남에 따라 직류전원공급 및 이용이 날로 증대하고 있다. 따라서 직류전원공급을 위한 배선설비의 시설이 필수적이며, 이에 대한 치밀하고 효과

* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2013년 2월 8일
1차심사 : 2013년 2월 16일
심사완료 : 2013년 3월 26일

적인 대응이 필요하다. 전력설비에서 안정성의 향상을 위하여 신뢰도가 높은 전원공급이 요구되고 있다. 일반적으로 발전소나 변전소용 제어기기의 전원공급장치로 축전지가 사용되고 있으며, 통신, 방송, 병원 등의 무정전전원장치에도 사용되고 있다[2-3]. 서지전압은 기기의 절연에도 좋지 않은 영향을 미치지만, 특히 반도체 소자의 소손을 야기하여 전력설비에 전원공급이 이루어지지 않는 사고가 발생할 수 있다[4]. 인덕턴스가 작은 비자성체 전선관을 사용하면 직류고장전류를 차단할 때, 개폐서지전압을 줄일 수 있으므로 축전지 배선에서 고장이 발생한 때, 고장회로의 인덕턴스를 줄이기 위해서 축전지 배선용으로 비자성체 전선관을 사용하도록 IEEE 946-1992에 규정되어 있다[5].

본 논문에서는 전기회로의 배관재료로 아연도금 전선관과 비자성체인 알루미늄 전선관을 사용한 경우 직류고장전류의 차단에 의해 발생하는 서지전압의 특성을 분석하기 위한 목적으로 아연도금 유연전선관과 알루미늄 유연전선관의 저항과 리액턴스 등을 기반으로 전선관 자체의 회로파라미터를 산출하고 지락고장의 발생과 차단에 의한 개폐서지전압을 분석하는 연구를 수행하였다. DC 12V인 축전지로 공급되는 직류전원회로의 고장전류의 차단에 의해 발생하는 개폐서지전압을 측정하여 축전지 회로의 배선재료로 적합한 전선관의 효용성에 대하여 검토하였다.

2. 직류회로의 차단특성

직류로 공급되는 회로에서 단락 또는 지락고장이 발생한 때 고장전류가 흐르는 경로는 그림 1에 나타난 바와 같이 R-L 직렬회로로 볼 수 있으며, 이 회로에서 고장전류의 차단특성은 다음과 같다[6].

그림 2 (a)에 나타난 바와 같이 스위치를 통하여 흐르는 전류가 순간적으로 차단되는 것을 가정한다. 실제의 회로에는 항상 인덕턴스가 존재하므로 스위치의 접점을 개방하는 과정동안 개방되는 접점 사이에 아크가 발생하며, 전류의 감소율을 느리게 한다.

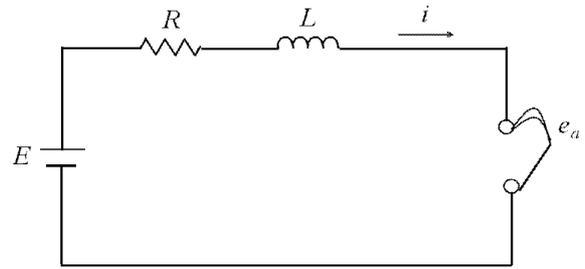
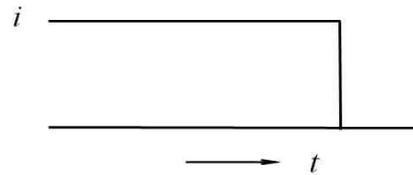
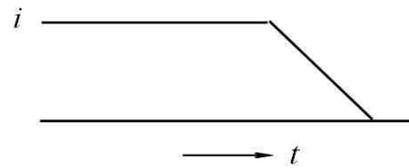


그림 1. R-L 직렬회로의 개방특성
Fig. 1. Opening characteristics of series R-L circuit



(a) 개방 전의 전류



(b) 개방과정 동안의 전류

그림 2. R-L 직렬회로에서 전류차단
Fig. 2. Current interruption in series R-L circuit

이때 그림 1로부터 다음의 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e_a = E \quad (1)$$

아크전압 e_a 가 일정하고 저항에서의 전압강하를 무시하면

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - e_a}{L} \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)은 아크전압 e_a 가 전원전압 E 보다 클

지락고장에 의해 금속제 유연전선관에 유도된 개폐서지전압의 특성

때만 전류가 차단될 수 있음을 의미한다. 이 경우 전류는 그림 2 (b)에 나타낸 것처럼 램프(ramp)함수로서 0까지 감소할 것이다. 또한 스위치를 통하여 입사되는 전류는 반대 극성의 램프함수로 된다. 식 (1)으로부터 전류 i 를 구하면 식 (3)과 같이 된다.

$$i = i_0 - \frac{e_a}{E} i_0 (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (3)$$

여기서 $i_0 = E/R$ 이다.

일반적으로 차단기 접점의 개리와 더불어 발생하는 아크전류 i 및 아크전압 e_a 는 그림 3에 나타낸 바와 같이 변화하며, 소호되는 순간에는 아크전압이 급격히 높아진다. 이상적으로는 절연을 위협하지 않을 정도의 어느 일정한 전압 e_a 를 가지게 된다[7].

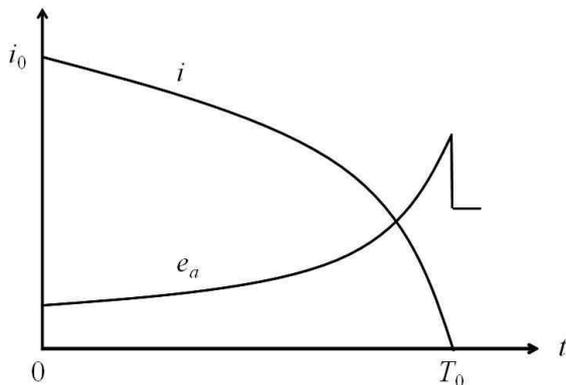


그림 3. R-L직렬회로를 차단할 때의 직류 아크전압 및 전류의 변화

Fig. 3. Variations of DC arc voltage and current when interrupting series R-L circuits

이상의 관계로부터 아크전압이 높으면 아크시간이 짧아지며, 아크에너지가 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 인덕턴스가 클수록 아크시간이 길어지며, 차단기 접점을 개리할 때 인덕턴스에 축적되는 자기에너지도 크게 되어 소호가 어렵게 된다. 따라서 고장회로의 인덕턴스가 작아야 고장전류의 차단이 용이하며, 인덕턴스에 의해 유도되는 개폐서지전압도 낮아져 기기의 절연에 대한 위협도 낮아지게 된다.

3. 실험장치 및 방법

전선관에 흐르는 직류고장전류의 투입 또는 차단에 의해 발생하는 개폐서지전압을 측정하기 위하여 축전지에 의한 전원공급회로를 모의하기 위해 DC 12V의 자동차용 배터리를 전원으로 사용하였다. 자동차용 배터리로 전원을 공급하는 실험회로를 그림 4에 나타내었다. 측정회로는 전원장치, 스위치, 저항과 실험대상 전선관을 직렬로 접속하여 구성하였고, 2.5mm²의 절연전선으로 배선하였다. 알루미늄 유연전선관, 아연도금 유연전선관의 직경과 길이는 각각 28mm와 2m이고, 알루미늄 유연전선관, 아연도금 유연전선관에 흐르는 직류고장전류의 투입 또는 차단을 모의하기 위해 회로의 중간에 스위치를 설치하고 이를 개폐할 때 발생하는 서지전압을 측정하였다.

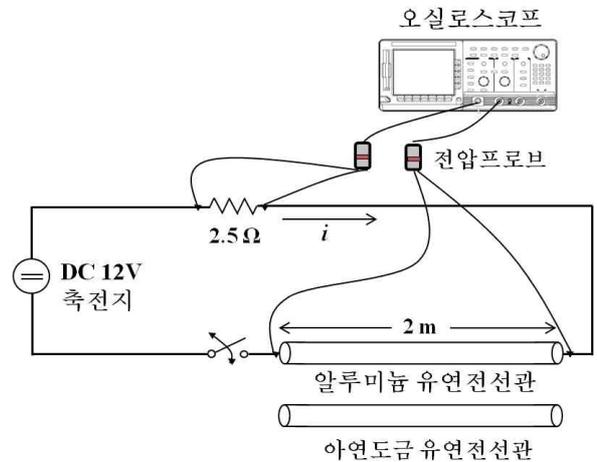


그림 4. 실험회로

Fig. 4. Experimental circuit

저항 양단에 걸리는 개폐서지전압을 측정하여 고장전류의 파형과 크기를 산출하였다. 개폐서지전압은 주파수대역 0-100MHz인 능동성 차동전압프로브로 검출하고, 5GS/s의 sampling rate를 가지는 디지털 축적형 오실로스코프로 관측하였다. 알루미늄 유연전선관 또는 아연도금 유연전선관에 흐르는 5A의 직류전류의 투입 또는 차단하였을 때 전선관의 양단에 발생하는 개폐서지전압을 측정하여 인가전류로 나눠서 1A당의 서지전압으로 평가하였다. 또한 알루미늄 유

연전선관과 아연도금 유연전선관의 회로정수의 주파수의존성은 임피던스분석기(Agilent 4294A)로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유연전선관의 회로정수

알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관에 흐르는 직류전류의 차단에 의해 발생하는 개폐서지전압의 크기에 영향을 미치는 전선관 자체의 회로정수를 임피던스분석기를 이용하여 주파수에 따른 임피던스를 측정하고, 식 (3)과 식 (4)를 적용하여 전선관의 전기저항(R)과 리액턴스(ωL), 시정수 L/R 등의 파라미터를 산출하였다.

터

$$R = Z \cos \theta \tag{4}$$

$$\omega L = Z \sin \theta \tag{5}$$

유연전선관의 임피던스는 0.1m의 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관의 표본에 대하여 측정하였다. 측정전류의 주파수 100Hz-100kHz범위에서 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관의 임피던스를 측정된 결과를 그림 5 (a)에 나타내었다. 주파수가 증가함에 따라 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관의 임피던스는 서서히 증가하였으며, 100Hz에서 임피던스는 알루미늄 유연전선관 0.59Ω

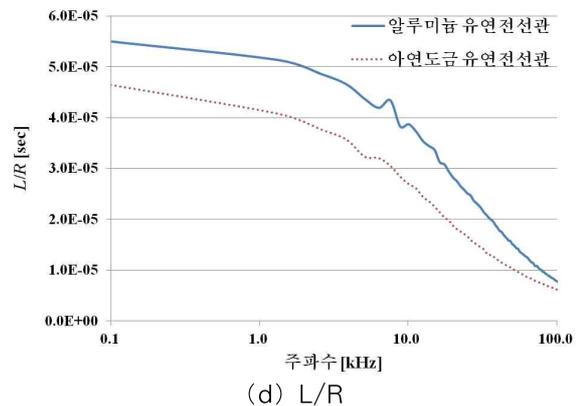
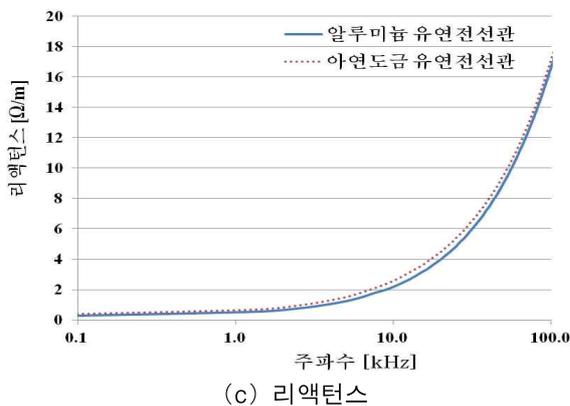
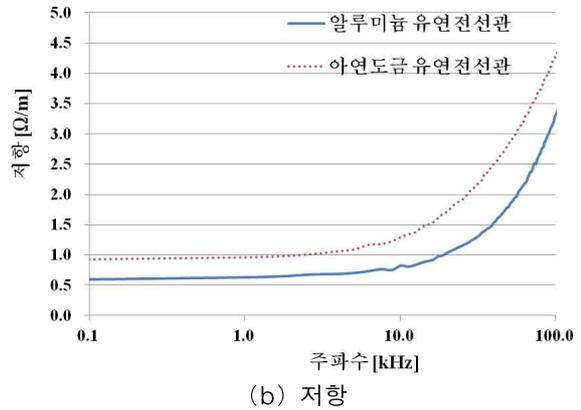
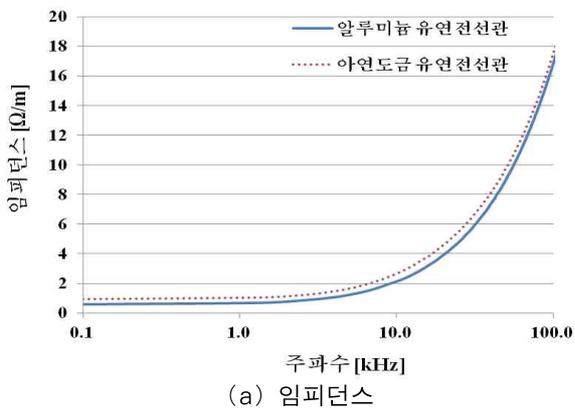


그림 5. 아연도금 유연전선과 알루미늄 유연전선관의 회로정수
Fig. 5. Circuit parameters of the steel-galvanized alloy and aluminium flexible conduits

지락고장에 의해 금속제 유연전선관에 유도된 개폐서지전압의 특성

/m, 아연도금 유연전선관 0.93Ω/m으로 측정되었다. 측정전류의 주파수 100kHz에서의 임피던스는 알루미늄 유연전선관 16.86Ω/m, 아연도금 유연전선관 17.55Ω/m으로 측정되었다. 그림 5 (b)는 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관의 전기저항을 식 (3)으로 산출한 결과이다. 측정전류의 주파수가 증가함에 따라 전기저항은 표피효과에 의하여 서서히 증가하였고[8-9], 100Hz에서의 알루미늄 유연전선관의 전기저항은 0.59Ω/m, 아연도금 유연전선관의 전기저항은 0.93Ω/m로 산출되었다. 100kHz에서의 전기저항은 알루미늄 유연전선관 3.3Ω/m, 아연도금 유연전선관 4.29Ω/m으로 산출되었다.

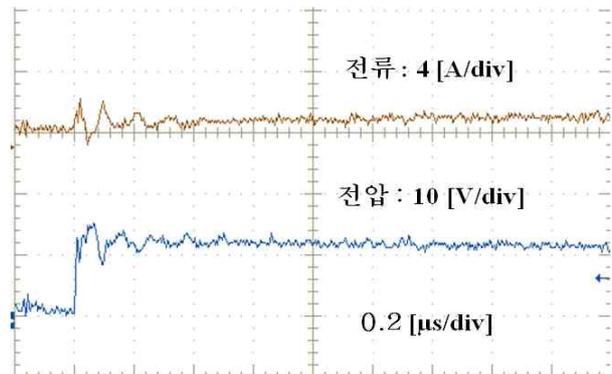
그림 5 (c)는 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관의 리액턴스를 식 (4)으로 산출한 결과이다. 주파수가 증가함에 따라 리액턴스 또한 서서히 증가하였지만 10kHz이후부터는 급격한 리액턴스의 상승을 보였다. 100kHz에서의 리액턴스는 알루미늄 유연전선관은 16.54Ω/m, 아연도금 유연전선관은 17.02Ω/m로 산출되어 거의 같게 나타났다. 그림 5 (d)는 알루미늄 유연전선관과 아연도금 유연전선관으로 이루어진 직렬회로의 시정수 L/R 을 산출한 결과이다. 주파수가 증가함에 따라 시정수 L/R 은 모두 서서히 감소하다가 2kHz 이후부터 급격한 감소를 보였다. 아연도금 유연전선관의 회로시정수는 알루미늄 유연전선관의 것보다 작은 것으로 나타났다.

4.2 지락고장에 의한 개폐전압

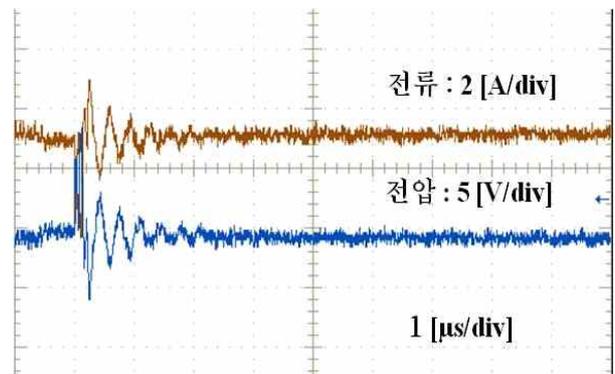
축전지로 공급되는 전원회로에서 지락고장의 발생과 차단을 모의하기 위해서 12V의 축전지에 전류측정용 2.5Ω의 무유도저항과 길이 2m의 금속제 유연전선관을 접속한 회로에 스위치를 투입 또는 개방할 때 알루미늄 유연전선관의 양단에 발생한 개폐서지전압을 측정할 파형의 대표적인 예를 그림 6에 나타내었다.

개방서지전압이 투입서지전압보다 크게 나타났으며, 진동주파수는 작았으나 지속시간이 길게 나타났다. 지락고장의 발생과 차단에 의해 발생하는 서지전압파형이 확연하게 차이가 나타났고, 지락고장을 차단할 때 기기나 축전지에 가해지는 스트레스가 크며 절

연을 위협하게 될 것으로 예상된다.



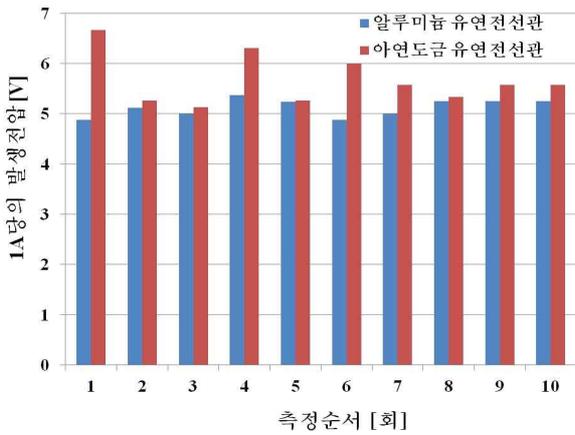
(a) 투입서지전류와 전압



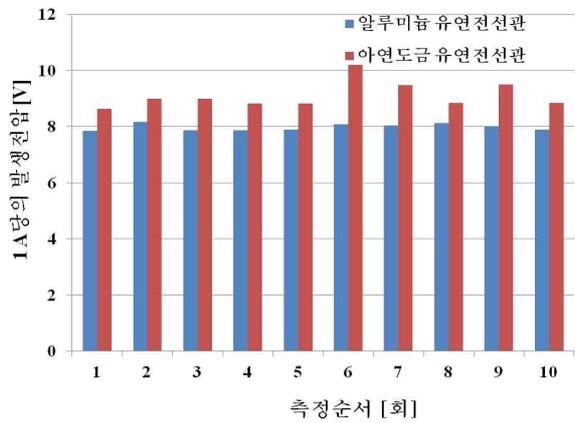
(b) 개방서지전류와 전압

그림 6. 알루미늄 유연전선관에서 지락고장회로의 투입과 개방으로 발생한 서지전류와 전압 파형의 예
Fig. 6. Typical waveforms of the surge current and voltages generated during the process of closing and opening the ground fault circuit along aluminium flexible conduit

동일한 실험회로일지라도 스위치의 투입 또는 개방 조건에 따라 시료 전선관에 발생하는 개폐서지전압의 크기가 변동하게 된다. 따라서 축전지를 이용하여 정상상태에서 5A의 직류전류를 공급할 수 있는 아연도금 유연전선관과 알루미늄 유연전선관으로 구성된 실험회로에서 스위치를 10회 투입 또는 개방하는 조작을 반복하여 개폐서지전압을 측정하였다. 스위치를 투입할 때와 개방할 때 고장전류 1A당 아연도금 유연전선관과 알루미늄 유연전선관의 양단에 발생한 개폐서지전압의 측정결과를 그림 7에 나타내었다.



(a) 투입서지전압



(b) 개방서지전압

그림 7. 실험회로의 투입 또는 개방 과정동안 직류전류 1A당 아연도금 및 알루미늄 유연전선관의 양단에 유도된 개폐서지전압

Fig. 7. Switching surge voltages induced across the steel-galvanized alloy and aluminum flexible conduits during the process of closing and opening the test circuit flowing the direct current of 1A

실험회로에서 스위치를 10회 투입 또는 개방하였을 때 직류전류 1A당 아연도금 및 알루미늄 유연전선관에 유도된 투입서지와 개방서지 전압의 최대값, 최소값, 평균값을 각각 표 1과 표 2에 나타내었다. 아연도금 유연전선관의 회로에서 스위치를 투입할 때 발생한 서지전압의 평균값은 알루미늄 유연전선관보다 1A당 0.55V 정도 높았으며, 스위치를 개방할 때 발생한 서지전압의 평균값 또한 아연도금 유연전선관이

알루미늄 유연전선관보다 1A당 1.14V 정도 높았다.

표 1. 투입서지전압

Table 1. Closing surge voltages

		알루미늄 유연전선관	아연도금 유연전선관
고장전류 1A당 서지전압 (V)	최대값	5.37	6.67
	최소값	4.87	5.13
	평균값	5.12	5.67

표 2. 개방서지전압

Table 2. Opening surge voltages

		알루미늄 유연전선관	아연도금 유연전선관
고장전류 1A당 서지전압 (V)	최대값	8.17	10.21
	최소값	7.84	8.62
	평균값	7.98	9.12

실험회로를 투입 또는 개방할 때 발생한 서지전압의 최대값은 직류전류 1A당 아연도금 유연전선관이 알루미늄 유연전선관보다 투입서지 1.3V, 개방서지 2.04V 정도 높았고, 서지전압의 최소값 또한 투입서지 0.26V, 개방서지 0.78V 정도 높게 측정되었다. 알루미늄 유연전선관을 사용한 전원회로에서 지락고장의 발생과 차단 모두 아연도금 유연전선관에서보다 개폐서지전압이 낮게 나타남이 확인되었다.

5. 결 론

알루미늄과 아연도금 유연전선관으로 축전지 전원회로의 배관을 구성한 경우 직류고장전류의 개폐시에 발생하는 서지전압의 특성을 분석하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 아연도금 유연전선관의 임피던스, 저항, 리액턴스 모두 알루미늄 유연전선관보다 크게 나타났고, 아연도금과 알루미늄 유연전선관의 임피던스는 주파수가 증가함에 따라 거의 일정한 비율로 증가하였다.
- (2) 알루미늄 유연전선관을 직류 전원회로의 배관에

적용한 경우 지락고장에 의한 서지전압이 아연 도금 유연전선관보다 낮은 것으로 밝혀졌다.

- (3) 직류고장전류의 차단으로 발생하는 서지전압이 낮은 알루미늄 유연전선관이 축전지 전원회로의 배관재료로 적합함이 확인되었다.

References

- [1] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power System, Wiley - Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, pp. 33-37, 112-116, 206-209, 445-448, 2004.
- [2] Korea Electric Association, Electrical installation guide according to IEC, KEA, pp.427-460, 2011.
- [3] K. Okumura, Electric Installation for constructional Engineers, Ohmsha, pp.101-109, 2010.
- [4] B. H. Lee and S. C. Lee, Protection of Information and Communication Facilities against Lightning, The Publishing Department of Inha University, pp.42-47, 2004.
- [5] IEEE Std. 946-1992, "IEEE Recommended Practice for the Design for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations", 7.1, 1992.
- [6] T. Koike, J. Hasegawa, K. Okubo, and S. Yamashiro, Electric Power Transmission and Distribution Engineering, Youkendou Ltd. pp.269-270, 1992.
- [7] P. Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", 2nd Edition, Research studies Press LTD. , pp. 234-264, 2004.
- [8] Bok-Hee Lee, Power System Engineering, The Publishing Department of Inaha University, pp.78-80, 2008.
- [9] R. Morrison and W. H. Lewis, Grounding and Shielding in Facilities, John Wiley & Sons, pp.16-21, 1990.

◆ 저자소개 ◆



이복희 (李福熙)

1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년 당학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



신건진 (辛建鎭)

2013년 2월 인하대학교 공학대학원 정보 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)한양이앤씨 대표이사.

Tel : (031)355-5454

Fax : (031)629-5560

E-mail : hy-enc@hanmail.net



박희열 (朴喜烈)

2013년 2월 인하대학교 공학대학원 정보 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)이앤피 대표이사.

Tel : (032)421-8204

Fax : (032)424-8204

E-mail : sin8204@unitel.co.kr



엄상현 (嚴相賢)

1984년 1월 16일생. 2012년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : s4na2s@gmail.com



김유하 (金庾河)

1980년 4월 27일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : baal80@daum.net