

가공송전선로의 축소모형 실험을 통한 수동루프의 자계 저감효과

김종형* 윤창대* 김태현* 신명철* 심재선**
*성균관대학교 **삼척대학교

The effect of magnetic field mitigation by a passive loop of an scale-down overhead power transmission line model

Kim J. H.* Yoon C. D.* Kim T. H.* Shin M. C.* Sim J. S.**
*Sungkyunkwan Univ. **SamChok Univ.

Abstract - 송전선로에서 발생하는 전자계에 대한 관심이 증가함에 따라 이를 저감하는 방법에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 송전선로에 적용할 수 있는 전자계 저감방법중 하나인 수동루프에 대한 성능을 송전선로의 축소모형 실험을 통해 나타내고 그에 대한 결과를 이론적인 계산 값과 비교하였다. 약 1/20 크기로 축소한 송전선로 모형을 제작한 다음 몇 가지 전압, 전류를 인가하여 선로 주변 전자계를 측정하여 그 결과를 정리하였다.

본론에서는 scale-down 송전선로를 구성하고 선로 주변 자계를 측정하고, 이 측정값과 비교하기 위한 자계의 계산식을 알아보기로 한다.

2.1 Scale-down 송전선로의 구성 및 측정

수동루프 도체에 유도되는 전하와 전류에 의한 전계 및 자계 저감 효과를 확인하고 전자계저감 해석 수식에 의한 값과 비교하기 위해 송전선로를 대략 1/20로 축소한 Scale-down 선로를 다음과 같이 구성하여 실험하였다.

1. 서 론

최근 송전선로 인근 지역 주민들의 전자계에 대한 관심과 요구 수준이 증가함에 따라 해외자료 인용과 같은 단순한 대응으로는 요구 수준을 충족시키기 어렵고, 송변전 설비 운영 및 신규건설 사업의 효율적인 추진을 위해서는 송전선로의 전자계 조사, 전자계 저감기술의 도입 및 연구, 그리고 이에 따른 사회적 비용조사가 절실하다. 특히 국내의 경우 비좁은 국토관계로 전력설비 주변의 생활환경 전자계 분포가 미국이나 유럽보다 매우 높은 200mG 이상까지 추정되나 아직까지는 저감기술에 대한 대비가 없는 실정이다. 따라서 전자계 노출은 적으면 적을수록 좋다는 현명한 회피(Prudent Avoidance) 정책 - 스위스 정부기준인 10mG까지의 전자계 규제 - 이 도입되면 국가 기간산업인 전력산업자체가 큰 어려움에 직면하게 되므로 Cost-Effectiveness를 바탕으로 한 전자계 저감 기술 개발 및 사회적 비용조사는 반드시 필요하다. 가공송전선로에서 발생하는 자계를 저감시키기 위한 기법들 중에서 수동루프(passive loop) 방식이 소요비용과 설치의 용이성 면에서 유리할 뿐 아니라 적절한 저감효과도 제공할 수 있는 것으로 판단되고있다 [1][2]. 이에 본 논문에서는 송전선로의 전자계저감을 위해 적용할 수 있는 수동루프의 방법을 선택하여, 축소된 송전선로를 가설한 후 전자계 값을 실측하고 이론적으로 계산되어지는 값과 비교하였다.

2. 본 론

수동루프는 송전선로 주위에 설치하는 도체 루프이다. 그림 1과 같이 도체 루프를 배치하면 송전선로와의 자기적 결합에 의해 루프에 전류가 유도되는데 이 유도전류에 의한 자속이 원래 송전선로의 자속을 상쇄시켜 지표면 근처의 자계를 저감시키게 된다[3][4].

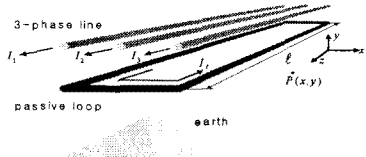


그림 1. 수동루프의 배치

2.1.1 실험 장비 및 재료

실험에 필요한 재료와 장비는 표 1에 모두 나타내었다.

표 1 실험장비 및 재료

전 원	3상 220V	
	슬라이타스(20kVA)	전압 가변용
	3상 복권변압기(220/440)	전압 승압용
측 정	EMDEX II	자계 측정용
	Oscilloscope(HP 54615B 500MHz 및 Current Probe(Agilent 1146A))	수동루프 도체의 유도전류(크기, 위상)측정
	Clamp meter(Hioki 3280-10)	3상 선로 및 수동루프의 전류크기 측정
장 비	LCR meter(Extech 380193)	수동루프 도체의 저항 및 인덕턴스 측정
	600V 비닐절연전선(IV) 14sq	3상 선로의 구성
전 선	600V 비닐외장 케이블(CV) 100sq	수동루프 구성
	부 하	전열 코일
구조물	목재(목주)	

실제 송전선로의 철탑에 해당하는 구조물은 그림 2와 같이 구성하였으며 모두 6개를 제작하여 그 중 4개는 수동루프를 설치하기 위한 면을 고려하여 2단으로 제작하였다. 총 선로의 길이는 20m로 구성하였으며, 수동루프를 설치한 구간은 그 중 10m이다. 선로의 양단에는 각각 스위치를 두어 사고를 방지하고 부하와 전원의 차단을 용이하게 하였으며, 측정 시 주변의 환경에 의해 측정값의 오차가 발생하지 않도록 전체적인 선로를 구성하였다. 전체적인 선로의 구성과 전자계 측정지점에 대한 사항은 그림 3에 잘 나타내었다.

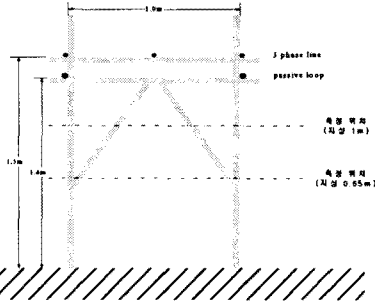


그림 2 Scale-down송전선로 구성을 위한 목주의 평면도

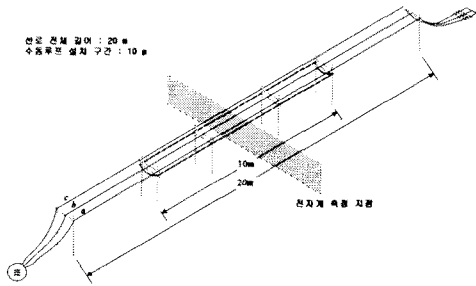


그림 3 전자계 측정을 위한 Scale-down송전선로의 구성

2.1.2 측정내용 및 방법

자계의 값은 그림 3에서 보는 바와 같이 선로의 중간 지점(10m)에서 측정했으며, 선로 단면 영역에서 선로 중심으로부터 좌우 2.5m에 대해 0.25m간격으로 지상 0.65m와 1.0m의 높이에서 각각 측정하였다. 수동루프에 의한 전자계 저감 효과를 확인하기 위해 수동루프 도체를 설치하기 전과 후에 각각 전자계를 측정하고 그 결과를 서로 비교하였다. 선로의 부하는 그 크기를 조정하여 선로에 각각 8.6A와 15.6A가 흐르도록 하여 자계의 값을 측정하였다.

2.2 선로주변 자계의 계산

그림 4와 같이 무한대 직선 도체에 전류 I_1 이 흐를 때 거리 ρ_1 만큼 떨어진 P 점에서의 자속밀도 B_1 은 암페어 법칙으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다[4].

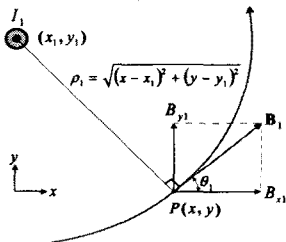


그림 4. 단일 전류에 의한 자속밀도

$$B_1 = B_{\rho_1} a_{\rho_1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi \rho_1} a_{\rho_1} \quad [T] \quad (1)$$

식(1)을 직각좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_x &= B_{\rho_1} a_x \\ &= B_{\rho_1} \cos\theta_1 a_x + B_{\rho_1} \sin\theta_1 a_y \\ &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \frac{y-y_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_x + \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_y \quad [T] \\ &= -2I_1 \frac{y-y_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_x + 2I_1 \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_y \quad [mG] \quad (2) \end{aligned}$$

N 개의 전류가 존재하는 송전선로 주변 P 점의 자속밀도 B 는 식(3)과 같이 각 전류에 의한 성분을 벡터적으로 합성하면 된다.

$$B = \sum_{n=1}^N B_n a_n = B_x a_x + B_y a_y \quad [mG] \quad (3)$$

$$\begin{cases} B_x = \sum_{n=1}^N B_{x_n} = -2 \sum_{n=1}^N I_n \frac{y-y_n}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \\ B_y = \sum_{n=1}^N B_{y_n} = +2 \sum_{n=1}^N I_n \frac{x-x_n}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \end{cases}$$

여기서,

식(3)은 수동루프가 설치된 송전선로의 경우에도 그대로 사용될 수 있다.

2.3 자계측정결과

그림 5과 6은 각 상에 8.6A의 전류가 흐르게 하고 각각 지상 0.65m와 1.0m의 높이에서 선로단면의 자속밀도를 측정하여 그 결과를 그래프로 그린 것이다. 그리고 oscilloscope current-probe를 이용하여 수동루프에 유도되어 흐르는 전류의 크기와 a상 전류에 대한 위상차를 측정했으며 그 값을 그래프의 제목 아래에 표시하였다. 이 경우의 유도전류는 $2.85 \angle 175.17^\circ$ A로 측정되었다.

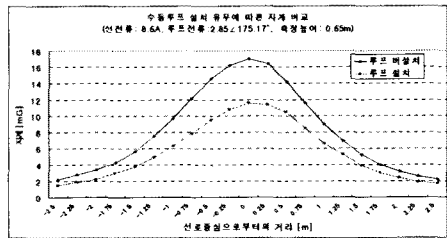


그림 5 측정결과(0.65m height, $I_{Line-to-Neutral} = 8.6A$)

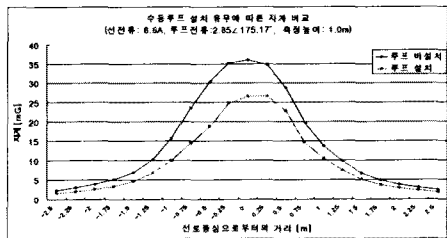


그림 6 측정결과(1.0m height, $I_{Line-to-Neutral} = 8.6A$)

그림 7은 각 상에 15.6A의 전류가 흐르게 하고 도체 루프 설치 전후의 자속밀도를 지상 0.65m와 1.0m높이에서 각각 측정하여 하나의 그래프에 도시한 것이다. 그리고 oscilloscope current-probe를 이용하여 수동루프에 유도되어 흐르는 전류의 크기와 a상 전류에 대한 위상차를 측정해서 함께 표시하였다. 이 때의 유도전류는 $4.95 \angle 175^\circ$ A로 측정되었다.

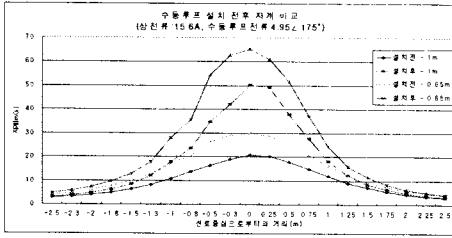


그림 7 측정결과(0.65 & 1.0m height, $I_{Line-to-Neutral} = 156A$)

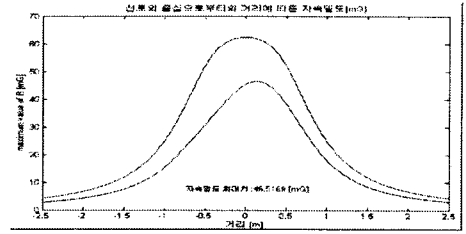


그림 11 측정결과(1.0m height, $I_{Line-to-Neutral} = 156A$)

그림 5에서 그림 7로부터 알 수 있듯이 선로 주변 자속밀도는 선로에 흐르는 전류에 비례하며 수동루프를 설치한 경우에 대략 25%정도 자계가 작아짐을 확인할 수 있다. 이 저감 비율은 선로 전류의 크기에 관계없이 대체로 일정한데 그 이유는 수동루프에 유도되는 전류가 선로 전류에 비례하여 증가하기 때문으로 생각할 수 있다. 그리고 저감된 자계의 분포를 살펴보면 선로를 중심으로 좌우가 비대칭적인 모양(a상보다 c상 주변 저감효과가 낮음)을 보여주고 있다.

2.4 계산결과

자계 측정기기인 EMDEX II는 x, y, z축 방향의 자계 센서를 사용해 3차원 자계를 한꺼번에 측정하며 아래의 (4)식과 같이 직각 좌표 벡터의 길이에 해당하는 합성자계를 계산하여 표시한다.

$$B_{tot} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4)$$

따라서 본 실험에서 측정된 자속밀도는 합성자계 값이므로 측정치와의 일관성있는 비교를 위해 식(4)로 합성된 자속밀도를 사용했다.

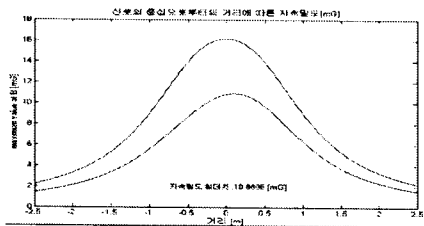


그림 8 측정결과(0.65m height, $I_{Line-to-Neutral} = 86A$)

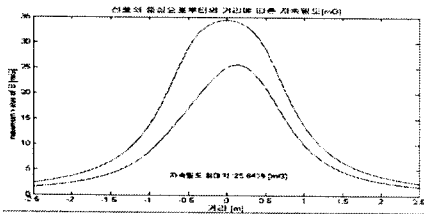


그림 9 측정결과(1.0m height, $I_{Line-to-Neutral} = 86A$)

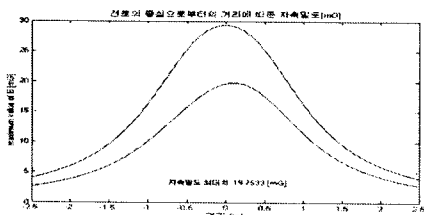


그림 10 측정결과(0.65m height, $I_{Line-to-Neutral} = 156A$)

계산결과에 관한 그림 8~11과 실험 측정결과 그림인 5~7을 비교해 보면 자계 크기와 분포가 거의 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. 다만 수동루프 설치에 따른 저감효과가 측정치에 비해 높게 나타나고 있는데 그것은 실제 유도전류가 계산치보다 작기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 접촉저항이나 이도(dip)등 기타 여러 가지 원인으로 인해 주로 유도전류 계산에 사용된 수동루프 도체의 저항과 인덕턴스가 실제와 달라졌기 때문에 발생한 결과로 이해할 수 있을 것으로 보인다.

3. 결 론

본 논문에서는 수동루프에 의한 전자기 저감효과를 증명하기 위해 축소모형을 제작해 전자기 저감 정도의 실측치와 컴퓨터에 의한 이론적인 계산치를 비교함으로써 실험에 의한 수동루프의 타당성을 검증하였다.

수동루프가 설치된 구간에 대해 약 25% 정도의 전자기 저감효과를 얻을 수 있었으며, 실험을 통한 측정치와 계산치가 동일한 것으로 나타났다. 이러한 저감효과는 전압 등급이나 철탑의 형태에 따라 달라질 수 있으며 수동루프의 설계에 따라 충분한 개선의 여지가 있는 것으로 보인다.

수동루프 방식의 최대 장점은 기존 철탑에 약간의 구조변경을 가해 도체 루프를 설치하면 되기 때문에 실현이 용이하고 비용이 저렴하다는 것이다. 반면에 수동루프가 송전선로 아래쪽에 설치될 경우 대지와의 이격거리가 감소되고 철탑의 하중이 증가하여 구조적인 문제를 유발할 수 있기 때문에 적용에 제한을 받을 수 있다. 따라서 수동루프 도입을 위한 비용을 산출할 때 단순히 도체 루프 설치비용만을 고려할 것이 아니라 전력손실을 비롯해 이러한 다양한 문제점까지 고려해야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 수동루프는 여전히 유리한 방법임에는 틀림없으며 앞으로 수동루프 도입을 위한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.R. Memari and W. Janischewskyj, "Mitigation of Magnetic Field near Power Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp.1577-1586, July 1996.
- [2] K. Yamazaki, T. Kawamoto, H. Fujinami, "Requirements for Power Line Magnetic Field Mitigation Using a Passive Loop Conductor", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp.646-651, April 2000.
- [3] 명성호, 양광호, 이재복, 주문노, "Passive Loop에 의한 송전선로 자계 저감 효과 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1142-1144, 7.19 - 21, 1999
- [4] 김종형, 신명철, 이복구, 박철원, "수동루프에 의한 가공송전선로 자계 저감효과 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 7.21-23, 2003
- [5] "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition", Electric Power Research Institute, Inc., 1982.