

수동루프에 의한 가공송전선로 자계 저감효과 해석

김중형* 신명철* 이복구** 박철원***
*성균관대학교 **명지전문대학 ***원주대학

Analysis of magnetic field mitigation by a passive loop around an overhead power transmission line

Kim J.H.* Shin M.C.* Lee B.K.** Park C.W.***
*Sungkyunkwan Univ. **Myongji College ***Wonju National College

Abstract - A passive loop is considered to be a cheap and easy way to be realized among the magnetic field mitigation methods.

So this paper evaluates and quantizes systematically the effectiveness of a passive loop on mitigating magnetic field(M-field) and examines the feasibility and problems in adoption. To do so, first, we explain the principles of M-field mitigation through a passive loop and derive formulas for 2-D M-field analysis. Next this paper simulates the M-field mitigation patterns for a flat type 1-circuit transmission line installed a passive loop.

1. 서 론

전력수요의 증가에 따라 전력설비가 꾸준히 대응량 고 전압화되고있는 가운데 설비에서 발생하는 전자계에 대한 유해성 논란과 전기환경적 규제강화로 인해 전자계 저감을 위한 효과적이고 다양한 기법들이 요구되고 있다. 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].

본 논문에서는 수동루프를 도입하여 얻을 수 있는 자계저감 효과를 보다 체계적이고 정량적으로 확인해보고 수동루프 도입의 타당성과 그에 따른 문제점을 생각해보고자 한다. 그것을 위해 수동루프에 의한 자계 저감 원리를 살펴보고 2차원 자계 해석 수식을 유도한 다음, 그것을 이용해 수동루프가 설치된 수평 1회선 송전선로 모델에 대한 자계의 저감 양상을 모의하도록 한다.

2. 본 론

수동루프는 송전선로 주위에 설치하는 도체 루프이다. 그림 1과 같이 도체 루프를 배치하면 송전선로와의 자기적 결합에 의해 루프에 전류가 유도되어 송전선로의 자계를 상쇄시키는 자계가 발생하게된다.

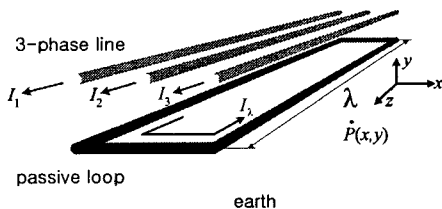


그림 1. 수동루프의 3차원 배치 개요

본문에서는 수동루프의 유도전류를 구해 송전선로주변 자계를 해석하는 과정을 살펴보고 수동루프에 의한 자계 저감을 모의해보도록 한다.

2.1 선로주변 자계

그림 2와 같이 무한대 직선 도체에 전류 I1이 흐를 때 거리 rho 만큼 떨어진 P점에서의 자속밀도 B1은 암페어 법칙으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

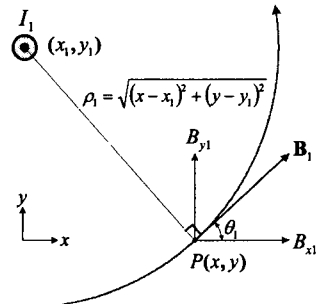


그림 2. 단일 전류에 의한 자속밀도

$$B_1 = B_{y1} a_y = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi \rho} a_y \quad [T] \quad (1)$$

식(1)을 직각좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$B_1 = B_{y1} a_y = B_{y1} \cos \theta_1 a_x + B_{y1} \sin \theta_1 a_y = -\frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \frac{y-y_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_x + \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_y \quad [T]$$

$$= -2I_1 \frac{y-y_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_x + 2I_1 \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} a_y \quad [mG] \quad (2)$$

N 개의 전류가 존재하는 송전선로 주변 P점의 자속밀도 B는 식(3)과 같이 각 전류에 의한 성분을 벡터적으로 합성하면 된다.

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

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

여기서,

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

한편, 3상 선로에서 발생하는 자계의 x, y 성분은 단상 선로의 경우와 달리 일반적으로 위상이 서로 다른 페이저(phaser)이기 때문에 자속밀도 B는 그림 3과 같이 공간상에서 시간에 대해 타원형 궤적을 갖는다. 따라서

P 점에서의 B 는 보편적으로 궤적의 최대 길이 B_{max} 즉 타원 장축 길이의 1/2 값을 가지고 평가된다[1].

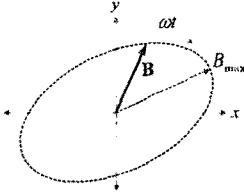


그림 3. 시간에 따른 전계의 타원형 궤적

B_x, B_y 가 식(4)와 같다고 할 때 장축의 길이는 B 가 장축에 놓이게 되는 시점을 알면 바로 구해지는데 그 시점이 식(5)이다[3].

$$\begin{aligned} B_x &= B_x \cos(\omega t + \theta_x) \\ B_y &= B_y \cos(\omega t + \theta_y) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\omega t = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B_x^2 \sin(2\theta_x) + B_y^2 \sin(2\theta_y)}{B_x^2 \cos(2\theta_x) + B_y^2 \cos(2\theta_y)} \right) + \frac{n\pi}{2} \quad (5)$$

여기서 $n=0$ 또는 1인 시점에 B 가 장축 혹은 단축 위에 놓이게 된다.

2.2 수동루프의 유도전류

자계저감이 요구되는 선로의 일부 구간에 대해 그림 1과 같이 수동루프를 설치할 수 있다. 수동루프가 설치된 구간 내 임의의 P 점의 자계를 구하기 위해서는 송전선로는 물론이고 계산을 통해 수동루프에 흐르는 전류 I_r 도 알고있어야 한다. I_r 은 송전선로와 수동루프 사이의 자기적 결합에 의해 유도되는 전류로서 패러데이 법칙으로부터 정의될 수 있다. 즉, 송전선로에서 발생하는 자속의 변화를 감소시키는 방향으로 수동루프에 기전력이 유기되어 전류가 흐르게 된다는 것이다.

수동루프의 유도전류 I_r 을 계산하는 구체적인 과정은 다음과 같다.

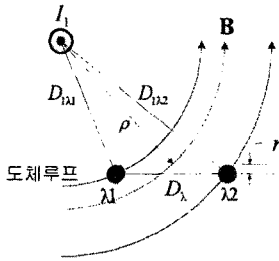


그림 4. 수동루프의 쇄교자속

송전선로 3상의 전류 중에서 그림 4와 같이 우선 전류 I_1 만을 고려해보자. I_1 에 의해 발생하는 자속 중 수동루프가 단위 길이당 쇄교하는 자속을 Φ_1 이라고 하면 Φ_1 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \int_{D_{12}}^{D_{13}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{p} \quad [\text{Wb/m}] \\ &= \int_{D_{12}}^{D_{13}} \frac{\mu_0 I_1}{2\pi p} dp \\ &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \\ &= 2 \times 10^{-7} I_1 \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \end{aligned} \quad (6)$$

같은 방법으로 나머지 두 상의 전류도 고려함으로써 식(7)과 같이 수동루프의 단위 길이당 합성쇄교자속 Φ 를

얻을 수 있다.

$$\Phi = 2 \times 10^{-7} \sum_{n=1}^3 I_n \ln \frac{D_{n2}}{D_{n1}} \quad [\text{Wb/m}] \quad (7)$$

Φ 에 의해 단위 길이당 수동루프에 유기되는 기전력 V_r 은 패러데이 법칙으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V_r = -\frac{d\Phi}{dt} = -j\omega\Phi \quad [\text{V/m}] \quad (8)$$

수동루프는 폐회로이기 때문에 V_r 에 의해 수동루프 도체에 전류 I_r 이 흐르게 된다.

$$I_r = \frac{V_r}{Z_r} = -\frac{j\omega\Phi}{R_r + j\omega L_r} \quad [A] \quad (9)$$

Z_r : 수동루프의 단위 길이당 임피던스 [Ω/m]

R_r : 수동루프의 단위 길이당 저항 [Ω/m]

L_r : 수동루프의 단위 길이당 자기인덕턴스 [H/m]

$$L_r = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D_r}{r \cdot e^{0.25}}$$

위 식으로부터 I_r 은 송전선로와 수동루프의 기하학적 관계를 비롯해 수동루프 도체의 굵기와 저항값 등에 의존할 뿐 송전선로 도체의 굵기라든가 수동루프 설치구간의 길이(수동루프의 길이 ℓ)와는 무관함을 알 수 있다.

2.3 수동루프에 의한 자계저감

그림 5와 같이 수동루프가 설치된 수평 1회선 가공송전선로 모델을 가정하여 수동루프에 의한 자계 저감효과를 계산해보도록 한다.

이 과정에 필요한 모든 파라미터들이 그림 5에 표시되어있는데, 송전선로의 전압은 송전철탑의 규모와 송전전류의 정격을 결정하는 중요한 요인이지만 자체는 전류의 함수이기 때문에 전압 그 자체로는 의미가 없으며 송전선로 도체의 굵기도 주변 자계에 직접적인 영향을 주지는 못하는 변수이므로 그림에서 생략되었다. 한편 문제를 단순화시키기 위해 3상 평형 조건을 가정했으며 가공지선에는 전류가 흐르지 않는 것으로 하였다. 대지에 의한 영향은 대지귀환전류(earth return current)로서 표현될 수 있는데 대지귀환전류가 흐르는 깊이가 송전선로의 높이에 비해 상당히 깊고 3상 전류가 평형인 경우에 그 크기도 작기 때문에 대지의 영향 역시 무시하였다[3].

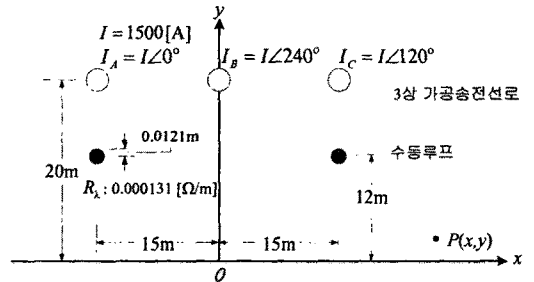


그림 5. 수동루프가 설치된 수평 1회선 3상 가공송전선로

선로주변 자계를 계산하기 위해 우선 식(9)를 이용해 수동루프의 유도전류 I_r 을 구해보면 $220.07 \angle 163.12^\circ$ [A]가 유도되어 그림 1에 표시된 방향으로 흐르게 됨을 알 수 있다. 그에 따라 단위 길이당 $I_r^2 R_r$ 만큼의 유효전력이 수동루프에서 소비되며 수동루프 설치구간의 길이 ℓ 이 증가함에 따라 소비되는 유효전력도 증가하게 된다. ℓ 이 1km인 경우에 43.43 kW가 수동루프에서 소비되며 이것은 결국 선로의 송전손실이 그만큼 증가하게 된다는 것을 의미한다.

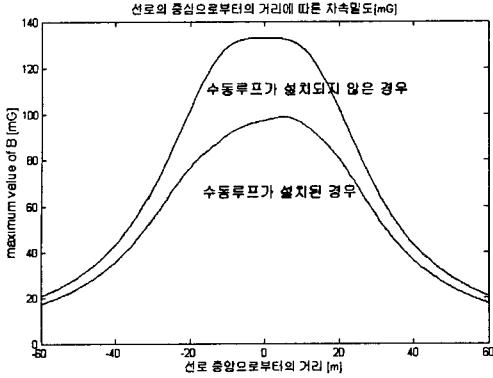
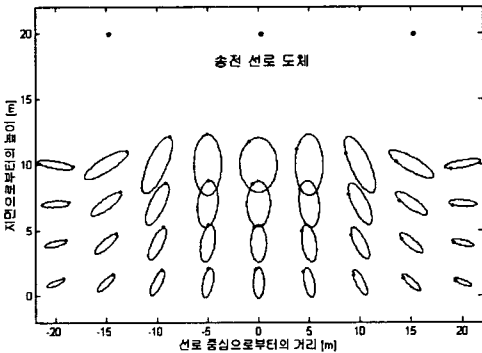
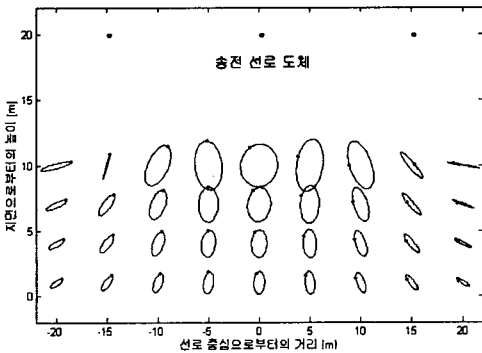


그림 6. 송전선로 중심으로부터 거리에 따른 자계 분포 (지상 1m 높이)

그림 6은 송전선로 단면의 자계분포를 나타낸 것으로, 송전선로 중심으로부터의 거리 x 에 따른 지상 1m 높이의 자속밀도를 계산한 것이다. 그림을 살펴보면 알 수 있듯이 자계는 수동루프가 설치되지 않았을 때 선로 중심부근에서 최대 133.01 [mG]의 값을 가지며 수동루프가 설치됨으로써 98.9 [mG]로 감소하게 된다. 전체적으로는 약 30% 정도의 자계 저감효과가 얻어지게 됨을 알 수 있다. 한편 이 저감비율은 송전선로의 전류에 상관없이 일정한 값이 되는데 그 이유는 송전선로의 전류에 비례하여 I , 이 증감하기 때문이다.



(a) 수동루프가 설치되지 않은 경우



(b) 수동루프가 설치된 경우

그림 7. 송전선로 단면 자계의 시간에 따른 궤적

그림 7은 송전선로 단면(x - y 평면)상에 몇 개의 점 (그림에서는 36개)을 임의로 선택한 다음 각 점에서 자계가 시간 ωt 에 따라 어떠한 궤적을 그리며 크기와 방향

이 바뀌어 가는지를 살펴본 것이다. 각 궤적 위에 표시된 점은 $\omega t=0$ 인 시점을 나타낸 것이고 ωt 가 증가함에 따라 자계는 궤적을 따라 시계방향으로 회전하게 된다. 그림 (a)와 (b)를 비교해보면 수동루프가 설치된 경우에 자계가 x - y 평면 전체적으로 작은 값을 갖게됨을 확인할 수 있으며 주로 궤적의 장축이 줄어들었으므로 자계 저감이 실현됨을 알 수 있다.

3. 결 론

가공송전선로 주변 자계의 특징과 수동루프에 의한 자계저감 원리를 이해하고 수동루프에 의한 자계저감 해석을 위한 2차원 수식을 유도했으며 수평 1회선 가공송전선로 모델을 선정하여 수동루프에 의한 자계저감 효과를 모의하였다. 그 결과 수동루프가 설치된 구간에 대해 평균적으로 30%정도의 저감효과를 얻을 수 있으며, 저감이 이루어지는 과정에서 수동루프 1km당 43.43kW의 유효전력 손실이 발생함을 알 수 있었다. 물론 이러한 저감효과와 전력손실은 송전선로의 전압 등급이나 철타의 형태에 따라 달라질 수 있으며 수동루프의 설계에 따라 충분한 개선의 여지가 있는 것으로 보인다.

수동루프 방식의 최대 장점은 기존 철타에 약간의 구조변경을 가해 도체 루프를 설치하면 되기 때문에 실현이 용이하고 비용이 저렴하다는 것이다. 반면에 수동루프가 송전선로 아래쪽에 설치될 경우 대지와와의 이격거리가 감소되고 철타의 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] "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition", Electric Power Research Institute, Inc., 1982.