

## 수동루프에 의한 송전선로 상불평형 발생에 관한 연구

(A Study on Three-phase Imbalance of a Power Transmission Line  
due to Installation of a Passive Loop Conductor)

김중영\* · 신명철 · 최상열

(Jong - Hyung Kim · Myong - Chul Shin · Sang - Yule Choi)

### 요 약

가공송전선로주변 자계저감 기법 중에서 수동루프 방식은 기존 송전철탐에 적은 비용으로 용이하게 적용되어 만족할 만한 저감효과를 제공할 수 있지만 수동루프에 유도되는 전류에 의해 송전손실이 증가될 뿐 아니라 송전선로의 기하학적 비대칭성이 증가됨으로써 상불평형이 증가하게된다.

따라서 본 논문에서는 수동루프 설치에 따른 송전손실과 송전선로 수전단에서의 상불평형을 모의하고자한다. 345[kV]급 수평 상배치 1회선 가공송전선로를 선정하여 수동루프를 송전선로의 선로정수에 포함시킨 비대칭 3상 분포정수 모델로 표현하였으며 이것에 대한 미분방정식을 정의하고 해를 구함으로써 수전단 3상의 전압과 전류를 계산했다. 그 결과로부터 각 상에 따라 전력손실이 다르게 발생하며 수전단에서 정상분이 감소하는 대신에 역상분이 증가함을 확인하였다. 일반적으로 수동루프에 의한 상불평형이 차지하는 비중이 크지는 않지만 수동루프 설치구간과 유도전류의 크기 등에 비례하여 증가하므로 수동루프 도입에 따른 소요비용을 산출하는 과정에서 그에 따른 영향을 포함시켜야 할 것으로 판단된다.

### Abstract

Among mitigation techniques for electric and magnetic field (EMF) from an overhead transmission line a passive loop is a way that can be cheap and easily installed on the existing towers and have a satisfactory effect as well. However current induced in the passive loop causes transmission power loss and the phase imbalance increases since geometrical asymmetry of the transmission lines becomes larger.

So in order to evaluate the power loss and the phase imbalance due to a passive loop, this paper represents a 345[kV] 1-circuit flat type transmission line as asymmetrical 3-phase distributed parameter line model where the effect of a passive loop is embedded in the line parameters, and then formulates differential equations. By solving these equations voltages and currents of each phase at receiving end become known. We find out that power losses occur differently at each phase and positive sequence component decreases at receiving end while negative sequence component increases. In general phase imbalance due to a passive loop is slight, but it increases in proportional to the induced current and length of section where the passive loop is installed. Thus the phase imbalance should be included in terms of cost for introducing a passive loop.

Key Words : passive loop, magnetic field mitigation, transmission line parameters

\* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정

Tel : 031-290-7161, Fax : 031-290-7168

E-mail : proa@ece.skku.ac.kr

접수일자 : 2003년 3월 17일

1차심사 : 2003년 3월 27일

심사완료 : 2003년 7월 18일

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

### 1. 서 론

송전선로를 비롯한 전력설비에서 발생하는 전자계에 대한 유해성 논란이 계속되고 전기환경규제가 강화됨에 따라 전자계 발생을 저감시키기 위한 효과

적이고 다양한 기법들이 요구되고 있다.

가공송전선로의 경우에 수동루프(passive loop)를 설치하여 자계를 저감시키는 기법이 연구되고 있는데, 수동루프가 주목받는 가장 큰 이유는 바로 비용이다. 이것은 기존 철탁에 단순히 도체 루프를 설치하는 것이 전부이기 때문에 가장 현실적인 방법으로서 인식되고 있다. 그러나 수동루프가 실용화되기 위해서는 수동루프 설치에 따른 대지간 이격거리(clearance) 감소와 철탁 하중 증가와 같은 구조적인 제약에 관한 문제가 해결되어야 하며 적절한 수준의 저감효과를 얻을 수 있어야한다. 수동루프에 의한 저감효과를 향상시키기 위해 루프에 직렬로 커패시터를 투입하거나 다수의 루프를 설치하는 등의 설계 및 배치에 관한 연구가 이루어지고 있다[1~4].

그런데 수동루프 방식이 보다 합리적인 저감기법이 되기 위해서는 도입에 따른 부작용을 미리 파악하여 최소화하려는 노력이 설계 과정에 포함되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 수동루프 도입에 따른 문제점으로서 수동루프가 송전선로의 기하학적 비대칭성을 증가시키며 수동루프에 흐르는 유도전류에 의해 저항손이 발생하여 송전손실을 증가시킬 뿐만 아니라 송전선로의 각 상에 균일하지 않은 기전력을 발생시켜 상불평형을 초래할 수 있음을 지적하고자 한다. 수동루프의 설치는 결과적으로 송전선로의 전압과 전류의 영상, 역상분을 유발하여 경우에 따라 발전기, 전동기, 병렬 리액터 및 계전기 등의 동작성을 떨어뜨릴 수 있으므로 수동루프가 일반적으로 송전선로에 어느 정도의 상불평형을 유발하게 되는지 계산을 통해 파악할 필요가 있다.

그러므로 본 논문에서는 완전연가가 이루어진 1회선 송전선로의 중간지점에 단일 수동루프가 설치된 경우를 가정하여 수동루프의 길이와 커패시터 투입에 따라 수전단 전압과 전류에 얼마만큼의 상불평형이 발생하게 되는지 확인하고자한다. 이를 위해 우선 송전선로와 수동루프의 기하학적 관계로부터 선로정수를 산정하고 분포정수 모델에 대한 미분방정식을 정의하여 해를 구해야하는데, 수동루프는 송전선로의 정전용량 및 유도용량 계수행렬의 비대각성분에 영향을 주어 송전선로를 단상 등가회로 모델로 단순화하여 해석할 수 없게 만들기 때문에 미분

방정식은 3상 선로가 동시에 고려된 복잡한 형태가 된다. 이것은 상사변환(similarity transformation) 행렬을 도입해 3개 모드에 대한 미분방정식으로 변환함으로써 해를 구할 수 있으며 최종 수전단 전압 전류를 구하고 대칭성분을 계산하는 과정을 거쳐 상 불평형률을 평가하게 된다.

## 2. 선로정수 계산

수동루프가 설치되면 송전선로의 선로정수가 바뀌게 된다. 본 장에서는 그림 1과 같이 수동루프가 설치된 3상 송전선로의 정전용량계수와 유도용량계수를 계산하는 과정을 살펴보도록 한다.

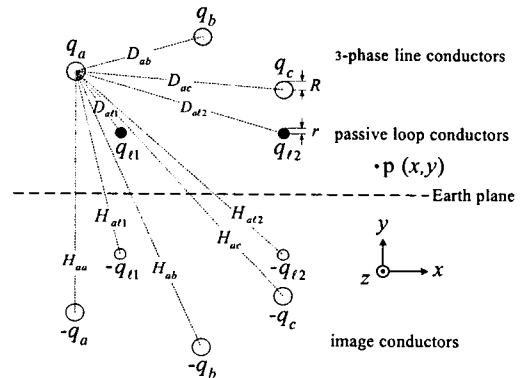


그림 1. 수동루프가 설치된 가공송전선로의 단면  
Fig. 1. Cross section of overhead power transmission line with a passive loop

### 2.1 정전용량계수 행렬

식 (1)에서 보듯이 각 도체의 대지전위  $V$  와 단위 길이당 전하량  $q$  사이의 관계는 전위계수(potential coefficients)행렬에 의해 정의된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{t1} \\ V_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{at1} & P_{at2} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bt1} & P_{bt2} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{ct1} & P_{ct2} \\ P_{t1a} & P_{t1b} & P_{t1c} & P_{t1t1} & P_{t1t2} \\ P_{t2a} & P_{t2b} & P_{t2c} & P_{t2t1} & P_{t2t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_{t1} \\ q_{t2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식의 전위계수 행렬  $\mathbf{P}$  ( $5 \times 5$ )의 각 요소는 다음과 같다.

$$P_{mn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{mn}}{D_{mn}} \quad [\text{m/F}] \quad (2)$$

여기서,

$D_{mn}$ :  $m$  번 도체와  $n$  번 도체간 거리 [m]

$H_{mn}$ :  $m$  번 영상도체와  $n$  번 도체간 거리 [m]

그런데 루프 도체의 경우에 선로 도체와 달리 양단이 서로 연결되어 폐회로를 구성하고 있으므로 등전위이며 선로나 대지에 대해 전기적으로 고립되어 있으므로 전체 전하의 합은 영이어야 한다. 즉, 루프에 대해 식(3)의 두 조건이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} V_{t1} = V_{t2} &\rightarrow V_{t1} - V_{t2} = 0 \\ q_{t1} + q_{t2} = 0 &\rightarrow q_{t2} = -q_{t1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

식(3)을 식(1)에 대입하여 식(4)와 같은 (4×4)크기의 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_P \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{NoLoop}} & \mathbf{P}_{\text{PL}} \\ \mathbf{P}_{\text{LP}} & \mathbf{P}_{\text{LL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_P \\ \mathbf{Q}_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$\mathbf{V}_P = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q}_P = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q}_L = [q_{t1}]$$

$$\mathbf{P}_{\text{NoLoop}} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_{\text{PL}} = \begin{bmatrix} P_{at1} - P_{at2} \\ P_{bt1} - P_{bt2} \\ P_{ct1} - P_{ct2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\text{LP}} = [P_{t1a} - P_{t2a} \quad P_{t1b} - P_{t2b} \quad P_{t1c} - P_{t2c}] = \mathbf{P}_{\text{PL}}^T$$

$$\mathbf{P}_{\text{LL}} = [P_{t1t1} + P_{t2t2} - P_{t1t2} - P_{t2t1}]$$

식(4)의 전위계수 행렬에서 수동루프와 관련된 행과 열을 제거함으로써 아래 식(5)와 같이  $\mathbf{V}_P$  를  $\mathbf{Q}_P$  만의 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_P &= (\mathbf{P}_{\text{NoLoop}} - \mathbf{P}_{\text{PL}} \mathbf{P}_{\text{LL}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{LP}}) \mathbf{Q}_P \\ &= \mathbf{P}_{\text{Loop}} \mathbf{Q}_P \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $\mathbf{P}_{\text{NoLoop}}$  는 수동루프가 설치되기 전의 전위계수 행렬이고  $\mathbf{P}_{\text{Loop}}$  는 수동루프가 설치된 경우에 관한 것으로서 수동루프가 설치됨에 따라 전위계수가  $\mathbf{P}_{\text{PL}} \mathbf{P}_{\text{LL}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{LP}}$  만큼 작아지게됨을 보여주고 있다.

정전용량계수 행렬은 전위계수 행렬의 역행렬로서 정의되므로 수동루프가 설치된 3상 송전선로의 정전용량계수  $\mathbf{C}_{\text{Loop}}$  [F/m] 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{C}_{\text{Loop}} = (\mathbf{P}_{\text{NoLoop}} - \mathbf{P}_{\text{PL}} \mathbf{P}_{\text{LL}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{LP}})^{-1} \quad (6)$$

한편 식(4)로부터 루프 도체의 단위 길이당 전하량 [C/m]을 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$q_{t1} = -q_{t2} = -\mathbf{P}_{\text{LL}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{LP}} \mathbf{Q}_P \quad (7)$$

## 2.2 유도용량계수 행렬

각 도체의 단위 길이당 쇠교자속[Wb/m]은 다음과 같이 (5×5)크기의 유도용량계수 행렬  $\mathbf{L}$  과 전류 벡터의 곱으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_{t1} \\ \Phi_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{at1} & L_{at2} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bt1} & L_{bt2} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{ct1} & L_{ct2} \\ L_{t1a} & L_{t1b} & L_{t1c} & L_{t1t1} & L_{t1t2} \\ L_{t2a} & L_{t2b} & L_{t2c} & L_{t2t1} & L_{t2t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{t1} \\ I_{t2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 행렬  $\mathbf{L}$  의 각 요소는 다음과 같다.(대지귀환전류(earth return current)의 영향은 고려하지 않는 것으로 한다.)

$$L_{mn} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{mn}} \quad [\text{H/m}], \quad m = n \text{ 일 때 } D_{mn} = e^{-1/4} D_{mn}$$

식(8)의  $I_{t1}, I_{t2}$  은 수동루프에 흐르는 전류로서 송전선로의 시변 자속에 의해 유기되는 기전력과 루프회로의 임피던스에 의해 결정된다. 이러한 관계는 Faraday 법칙으로부터 설명될 수 있는데 송전선로에서 발생하는 자속 중에서 수동루프 도체에 의한

수동루프에 의한 송전선로 상불평형 발생에 관한 연구

쇄교자속을 각각  $\Phi_{t1}^{abc}, \Phi_{t2}^{abc}$  라고 하면 각 루프도체의 기전력과 유도전류 사이의 관계가 다음 식(9)와 같이 표현될 수 있다.

$$-\frac{d\Phi_{t1}^{abc}}{dt} = -j\omega(L_{t1a}I_a + L_{t1b}I_b + L_{t1c}I_c) \text{ [V/m]} \\ = (R_{t1} + j\omega L_{t1t1})I_{t1} + j\omega L_{t1t2}I_{t2} \quad (9-a)$$

$$-\frac{d\Phi_{t2}^{abc}}{dt} = -j\omega(L_{t2a}I_a + L_{t2b}I_b + L_{t2c}I_c) \text{ [V/m]} \\ = j\omega L_{t2t1}I_{t1} + (R_{t2} + j\omega L_{t2t2})I_{t2} \quad (9-b)$$

여기서 (-) 부호는 각 도체 전류의 기준방향을 모두 z 축 방향으로 가정했을 때에 해당하며,  $R_{t1}$ 과  $R_{t2}$ 은 루프도체의 단위길이당 저항 [ $\Omega/m$ ]을 가리킨다.

한편 수동루프 전류는 회로를 순환하므로 아울러 다음 조건을 만족해야한다.

$$I_{t2} = -I_{t1} \quad (10)$$

그러므로 식(9)과 식(10)을 식(8)에 대입하여 식(8)을 다음과 같이 (4×4)크기의 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_P \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{NoLoop} & \mathbf{L}_{PL} \\ \mathbf{L}_{LP} & \mathbf{L}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_P \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$\Phi_P = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}_P = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}_L = [I_{t1}] \\ \mathbf{L}_{NoLoop} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{PL} = \begin{bmatrix} L_{at1} - L_{at2} \\ L_{bt1} - L_{bt2} \\ L_{ct1} - L_{ct2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_{LP} = [L_{t1a} - L_{t2a} \quad L_{t1b} - L_{t2b} \quad L_{t1c} - L_{t2c}] = \mathbf{L}_{PL}^T \\ \mathbf{L}_{LL} = \left[ \frac{(R_{t1} + R_{t2})}{j\omega} + (L_{t1t1} + L_{t2t2} - L_{t1t2} - L_{t2t1}) \right]$$

식(11)의 유도용량계수 행렬에서 수동루프와 관련된 행과 열을 제거함으로써 아래 식과 같이  $\Phi_P$ 를  $\mathbf{I}_P$ 만의 함수로 표현할 수 있다.

$$\Phi_P = (\mathbf{L}_{NoLoop} - \mathbf{L}_{PL}\mathbf{L}_{LL}^{-1}\mathbf{L}_{LP})\mathbf{I}_P \\ = \mathbf{L}_{Loop}\mathbf{I}_P \quad \text{[Wb/m]} \quad (12)$$

위 식에서  $\mathbf{L}_{Loop}$ 는 수동루프가 설치된 경우의 유도용량계수 행렬로서 수동루프가 설치되지 않은 경우보다  $\mathbf{L}_{PL}\mathbf{L}_{LL}^{-1}\mathbf{L}_{LP}$ 만큼 값이 달라지게 된다.

한편 식(11)로부터 수동루프 회로에 흐르는 유도전류를 다음과 같이 구할 수 있는데,

$$I_{t1} = -I_{t2} = -\mathbf{L}_{LL}^{-1}\mathbf{L}_{LP}\mathbf{I}_P \quad \text{[A]} \quad (13)$$

$\mathbf{L}_{LL}$ 은 수동루프의 임피던스를  $j\omega$ 로 나눈 것으로 루프에 유도되는 전류를 결정하는 직접적인 요소임과 동시에 식(12)에서 보듯이  $\mathbf{L}_{Loop}$ 를 결정하는 요인이다. 이것은 수동루프 도체의 저항을 줄인다거나 루프에 직렬로 콘덴서를 투입해 유도용량을 보상함으로써 루프에 흐르는 전류의 크기를 증가시키거나 위상을 변화시켜 수동루프에 의한 자계저감효과를 높일 수 있지만 그에 상응하여 선로의 유도용량이 변동되어 수전단에서의 상불평형을 일반적으로 증가시키게 된다는 것을 의미한다. 한편 식(13)으로부터 알 수 있듯이 수동루프의 유도전류는 송전선로의 전류에 비례하여 변동되며 수동루프의 설치 길이와는 상관없이 일정한 값을 갖는다. 또한 수동루프에서 소비되는 전력 즉, 송전손실은 루프 회로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하여 증가된다.

### 3. 3상 송전선로의 전압, 전류 해석

송전선로 전압과 전류의 관계는 일반적으로 3상 선로를 단상 등가회로로 단순화시켜 표현함으로써 쉽게 해석할 수 있지만, 선로정수가 비대칭인 경우에는 3상을 한꺼번에 고려해야하므로 해석이 쉽지 않다. 이때 사용할 수 있는 방법이 상사변환(simil-

arity transformation)을 통한 모드해석(modal analysis)이다[5].

### 3.1 3상 송전선로의 미분방정식

주파수 영역에서 분포정수 모델의 선로 전압과 전류의 관계는 식(14)와 같이 각 상의 전압과 전류간 1차 상미분 방정식의 집합으로 표현된다[5].

$$\frac{d}{dz} \mathbf{V}(z) = -\mathbf{Z} \mathbf{I}(z) \quad (14.a)$$

$$\frac{d}{dz} \mathbf{I}(z) = -\mathbf{Y} \mathbf{V}(z) \quad (14.b)$$

여기서,

$$\mathbf{V}(z) = \begin{bmatrix} V_a(z) \\ V_b(z) \\ V_c(z) \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}(z) = \begin{bmatrix} I_a(z) \\ I_b(z) \\ I_c(z) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L} \quad [\Omega/m]$$

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{C} \quad [S/m]$$

$\mathbf{Z}$  : series impedance matrix

$\mathbf{Y}$  : shunt admittance matrix

$\mathbf{R}$  : conductor resistance matrix

식(14)는 다음과 같이 전압과 전류가 서로 분리된 전압간 2차 상미분 방정식의 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}(z) = \mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{V}(z) \quad (15)$$

위 식은 단상 등가회로에 대한 미분방정식과 달리 선로의 전압과 전류들이 다수개이며 상호 결합된 형태의 복잡한 미분방정식이기 때문에 해를 직접 구하기 어렵다. 따라서  $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$  행렬을 대각화하여 3개의 등가 단상회로 형태로 변형하는 것이 필요한데, 이를 위해  $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$  행렬과  $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$  행렬의 상사변환행렬  $\mathbf{T}_V$ ,  $\mathbf{T}_I$  을 도입해 상사행렬(similar matrix)을 구하고 상전압(상전류)을 모드전압(모드전류)으로 분해하여 식(15)를 모드별 3개의 상미분방정식으로 변환한다. 이것들에 대한 해를 구해 모드전압과 모드전류간의 관계식을 얻은 후 상사변환행렬을 거꾸로 적용해 실

제 상전압, 상전류 사이의 관계식으로 되돌린다. 이 과정을 거쳐 얻은 식(16)은 송전단으로부터 선로를 따라 임의의 거리  $\ell$  만큼 떨어진 지점에서의 상전압과 상전류를 계산하는데 사용된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(z = \ell) \\ \mathbf{I}(z = \ell) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\ell) & \mathbf{B}(\ell) \\ \mathbf{C}(\ell) & \mathbf{D}(\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$\mathbf{A}(\ell) = \mathbf{D}(\ell) = \mathbf{T}_V \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 \ell) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 \ell) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_3 \ell) \end{bmatrix} \mathbf{T}_V^{-1}$$

$$\mathbf{B}(\ell) = \mathbf{T}_V \begin{bmatrix} -\frac{z_1 \sinh(\gamma_1 \ell)}{\gamma_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{z_2 \sinh(\gamma_2 \ell)}{\gamma_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{z_3 \sinh(\gamma_3 \ell)}{\gamma_3} \end{bmatrix} \mathbf{T}_V^{-1}$$

$$\mathbf{C}(\ell) = \mathbf{T}_I \begin{bmatrix} -\frac{\gamma_1 \sinh(\gamma_1 \ell)}{z_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma_2 \sinh(\gamma_2 \ell)}{z_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\gamma_3 \sinh(\gamma_3 \ell)}{z_3} \end{bmatrix} \mathbf{T}_I^{-1}$$

그리고 여기서,

$$\begin{bmatrix} z_1 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 \\ 0 & 0 & z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \quad \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & y_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{z_1 y_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{z_2 y_2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{z_3 y_3} \end{bmatrix}$$

### 3.2 불연속 선로정수의 근사화

송전선로 도체의 기하학적 비대칭성으로 인해 발생하는 선로정수의 불평형을 해소하기 위해 연가(transposition)를 실시하는데, 연가가 이루어진 위치를 기준으로 구분되는 각 구간의 선로정수는 제각각의 값을 갖게 된다. 아울러 수동루프가 설치된 구간 역시 그렇지 않은 구간과는 달라진 선로정수를 갖는다.

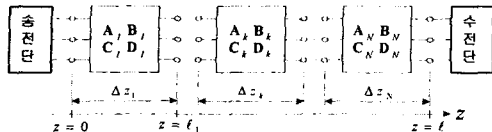


그림 2. 개별 선로정수 구간의 직렬 ABCD 행렬  
Fig. 2. Series ABCD parameters of line with individual sections

따라서 수동루프가 송전선로의 선로정수에 끼치는 영향을 분석하기 위해서는 수동루프 설치구간을 포함한 전체 선로의 ABCD 선로정수 행렬을 알아야 하는데, 이것은 그림 2와 같이 연가 지점과 수동루프 설치구간을 기준으로 구간을 구분하고 각 구간의 선로정수 행렬을 구해 차례로 곱함으로써 얻어진다. 즉, 다음과 같이 나타낼 수 있다[5][6].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(l) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1(Dz_1) & \mathbf{B}_1(Dz_1) \\ \mathbf{C}_1(Dz_1) & \mathbf{D}_1(Dz_1) \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k(Dz_k) & \mathbf{B}_k(Dz_k) \\ \mathbf{C}_k(Dz_k) & \mathbf{D}_k(Dz_k) \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} \mathbf{A}_N(Dz_N) & \mathbf{B}_N(Dz_N) \\ \mathbf{C}_N(Dz_N) & \mathbf{D}_N(Dz_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

#### 4. 사례연구

##### 4.1 송전선로 및 수동루프 모델

본 논문에서는 다음 그림 3과 같은 기하학적 구조를 갖는 3상 송전선로를 가정하여 수동루프가 어느 정도의 전자계저감 효과와 상불평형을 가져오게 되는지 모의해보았다.

송전단의 선간전압은 345[kV]이고 상전류는 1500 [A]이며 선로도체와 루프도체의 저항은 모두 0.131 [ $\Omega$ /km]인 것으로 설정했다. 또한 수전단의 부하는 3상 평형인 것으로 가정했다.

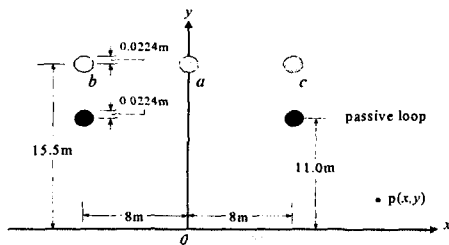


그림 3. 345kV급 3상 수평배치 1회선 선로 모델  
Fig. 3. 345kV 1-circuit flat type line model

한편, 그림 4에서 보는 바와 같이 선로의 전체 길이는 60[km]로서 20[km]마다 연가가 이루어져있고, 수동루프는 일단 선로 중간 지점을 기준으로 2[km] 구간에 걸쳐 설치되어있는 경우를 가정했다.

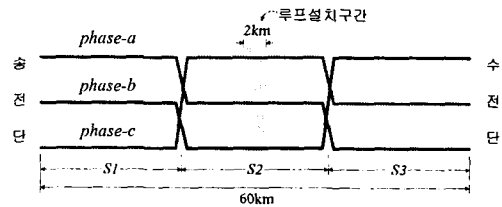


그림 4. 연가 지점 및 수동루프 설치 구간  
Fig. 4. transposition point and passive loop location

##### 4.2 수동루프 설치에 따른 전자계 저감

수동루프에 의한 전자계 저감 효과를 살펴보기 위해 선로중간지점에서의 선로도체와 루프도체의 단위 길이당 전하와 전류를 식(7)과 식(13)을 이용해 계산한 다음 선로 단면 지상 1[m] 높이에서의 전계 및 자계를 계산해 각각 그림 5와 그림 6에 결과를 표시하였다.

전계의 경우에 그림 5에서 보는 바와 같이 수동루프에 의해 최대 32% 정도의 저감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 6에 표시된 그래프 중에서 ①은 수동루프가 설치되지 않은 경우의 자계세기이고 ②는 설치된 경우인데 최대 30% 정도의 저감효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한편 ③은 수동루프 회로의 유도성 리액턴스를 절반으로 보상한 경우로서 ②에 비해 최대 19% 정도의 저감효과를 추가적으로 얻을 수 있다.

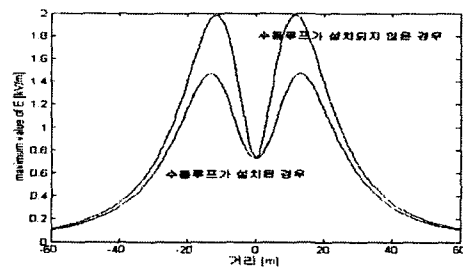


그림 5. 선로중심으로부터 거리에 따른 전계세기 (kV/m) (지상 1m 높이)  
Fig. 5. Lateral profile of the electric field (kV/m) at a height of 1(m)

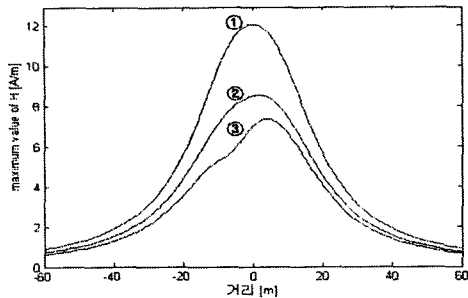


그림 6. 선로중심으로부터 거리에 따른 자계세기 [A/m] (지상 1m 높이)  
Fig. 6. Lateral profile of the magnetic field [A/m] at a height of 1(m)

4.3 수동루프 설치에 따른 상불평형

수동루프 설치로 인해 발생하는 상불평형과 전력 손실을 모의하기 위해 다음 경우를 가정하였다.

①	수동루프가 설치되지 않은 경우
②-1	수동루프가 선로중간지점 2km에 걸쳐 설치
②-2	수동루프가 선로중간지점 2km에 설치 및 루프회로의 유도성 리액턴스를 50%로 보상
③-1	수동루프가 S2구간의 전구간(20km)에 설치
③-2	수동루프가 S2구간의 전구간에 설치 및 루프회로의 유도성 리액턴스를 50%로 보상

식(16)~(17)을 이용해 수전단 전압과 전류를 계산했으며 그것에 대한 대칭성분 및 상불평형률을 구해 아래 표 1과 표 2에 정리하였다.

표 1. 수전단 전압의 상불평형률 [%]  
Table 1. Phase imbalance rate of the voltages at receiving end [%]

	$V_0$ [V]	$V_1$ [V]	$V_2$ [V]	$V_0/V_1$ [%]	$V_2/V_1$ [%]
①	8.3643	191690	31.258	0.00436	0.01630
②-1	8.3761	191680	57.862	0.00437	0.03018
②-2	8.3752	191660	78.619	0.00437	0.04102
③-1	8.4826	191570	305.100	0.00442	0.15926
③-2	8.4731	191370	532.280	0.00442	0.27814

표 2. 수전단 전류의 상불평형률 [%]  
Table 2. Phase imbalance rate of the currents at receiving end [%]

	$I_0$ [A]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_0/I_1$ [%]	$I_2/I_1$ [%]
①	0.0797	1496.0	0.2445	0.00532	0.01634
②-1	0.0796	1496.0	0.2645	0.00532	0.01768
②-2	0.0796	1496.0	0.2625	0.00532	0.01755
③-1	0.0790	1496.1	0.4456	0.00528	0.02978
③-2	0.0785	1496.1	0.4273	0.00525	0.02856

전압과 전류가 약간 다른 양상을 보여주고 있는데 대체적으로 수동루프의 설치 길이와 루프회로의 리액턴스 보상 정도에 비례하여 상불평형이 증가함을 알 수 있다. 수동루프는 전류보다 전압에 더 영향을 주며 역상분의 비중을 증가시키게 된다.

한편 수동루프에 의한 전체 전력손실은 루프 회로의 유도전류를 가지고 간단히 계산될 수 있지만 상별 전력손실은 송수전단간 전력차로써 평가될 수 있다. ①~③의 경우에 대해 송전선로 각 상의 전력손실을 계산하고, 수동루프가 설치되지 않은 경우를 기준으로 전력손실이 얼마나 변동되는지 비교하여 아래 표 3에 정리하였다.

표 3. 수동루프에 의한 송전선로 각 상의 전력 손실  
Table 3. Power losses at each phase of the transmission line with a passive loop

구 분	루프가 2[km] 설치된 경우		루프가 20[km] 설치된 경우		
	kW	kvar	kW	kvar	
루프회로의 리액턴스 보상 前	a상	0	0	0	
	b상	46	-55	463	-548
	c상	-16	-76	-160	-757
	합계	30	-131	303	-1305
루프회로의 리액턴스 보상 後	a상	0	0	0	
	b상	160	-74	1064	-734
	c상	4	-137	-35	-1371
	합계	102	-211	1029	-2106

전력손실 역시 상불평형과 마찬가지로의 양상을 보여주고 있다. 표 3을 살펴보면 유효전력 손실의 대부분이 b상에서 발생하고있는데 이것은 송전선로와 수동루프 사이의 기하학적 배치관계상 b상이 수동

## 수동루프에 의한 송전선로 상불평형 발생에 관한 연구

루프의 유도전류 형성에 가장 크게 기여하고있기 때문이다. 그럼으로써 표 3에서 보는 바와 같이 각 상에서 발생하는 전력손실이 상이한 값을 갖게된다.

한편, 앞서 2.2절에서 언급했듯이 수동루프의 유도전류는 송전선로의 전류에 비례하기 때문에 선로의 전류가 증가하면 루프의 유도전류도 증가되며 그로 인해 상불평형과 전력손실이 증가하게된다.

## 5. 결 론

수동루프를 설치하여 가공송전선로의 전자계를 저감시키는 과정에서 전자기적 상호작용에 의해 발생하는 송전선로의 상불평형과 전력손실 등의 문제를 분석하기 위해, 본 논문에서는 우선 수동루프의 길이와 루프 회로에 유도되는 전류 등에 따른 전자기적 상호 결합관계를 송전선로의 정전용량 및 유도용량계수에 포함시켜 행렬 형태로 표현했으며 그것을 바탕으로 선로정수의 비대칭성을 고려한 3상 선로 분포정수 모델에 대한 미분방정식을 구성하고 상사변환을 통해 해를 구함으로써 상불평형률과 각 상의 전력손실을 정량적으로 분석했다.

모의 과정에 고려한 송전선로와 수동루프의 기하학적 배치 관계 등에 따라 그 결과 값이 광범위하게 달라질 수 있지만, 본 논문에서 고려한 모델의 경우에 a상은 수동루프에 의해 영향을 받지 않으며 b상에서의 유효전력손실은 2[km]당 46[kW] 정도 증가하는 반면에 c상은 16[kW] 정도 감소하는 것으로 나타났다. 한편 저감효과를 높이기 위해 리액턴스를 보상하면 유도전류가 증가하기 때문에 b상은 160[kW], c상에서는 4[kW]로 손실이 증가함을 알 수 있었다. 이와 같이 각 상의 손실이 다르게 발생하는 이유를 상불평형 관점에서 수전단 전압과 전류의 정상분이 감소하고 역상분이 차지하는 비중이 증가하여 그 비율이 커지는 것으로 설명할 수 있는데 수동루프 설치 구간이 20[km]이고 리액턴스를 보상한 경우에 그 비율이 최고 0.278%에 이르게 됨을 확인할 수 있었다.

모의 결과로부터 알 수 있듯이 수동루프를 적절히 운용함으로써 지상 1[m] 높이에서 50% 정도의 전자계 저감효과를 기대할 수 있지만, 저감효과와 설치

길이 등에 따라 상불평형과 유효전력손실이 무시할 수 없을 정도로 증가하게된다. 따라서 수동루프를 설계하거나 설치 구간의 길이를 결정하는 것을 비롯해 수동루프 도입에 따른 소요비용을 산출하는 과정에서 단순히 수동루프 자체에 대한 설치비용만을 따질 것이 아니라 전반적으로 전력손실과 영상분과 역상분 증가에 따른 영향까지도 비용으로 환산하여 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## References

- (1) AR. Memari and W. Janischewski, "Mitigation of Magnetic Field near Power Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp.1577-1586, July 1996.
- (2) R.A. Walling, J.J. Paserba, C.W. Burns, "Series-Capacitor Compensated Shield Scheme for Enhanced Mitigation of Transmission Line Magnetic Fields", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 461-469, January 1993.
- (3) P. Cruz, C. Izquierdo, M. Burgos, L.F. Ferrer, F. Soto, C. Llanos, J.D. Pacheco, "Magnetic Field Mitigation in Power Lines with Passive and Active Loops", CIGRE, 2002 Session Paper, Ref. No. 36-107.
- (4) 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.
- (5) Clayton R. Paul, "Analysis of Multiconductor Transmission Lines", John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- (6) W. D. Stevenson Jr, "Elements of Power System Analysis", 4th Ed, McGraw-Hill Book Company, 1988.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김종영 (金鍾亨)

1973년 4월 29일생. 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업(학사). 1999년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정.

### 申明철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1973년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.

### 최상열 (崔相烈)

1970년 8월 24일생. 1996년 성균관대학교 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(박사). 2002년~현재 안양대학교 디지털미디어학부 전임강사.