

유전 알고리즘을 이용한 송전선로 자계 저감용 도체루프의 최적 위치 선정

論 文
54A-5-5

Optimum Locations of Passive Conductor Loops for Magnetic Field Mitigation of Transmission Line using GA

金 鍾 亨[†] · 申 明 澈^{*}
(Jong-Hyung Kim · Myong-Chul Shin)

Abstract - The performance of passive conductor loop (hereinafter 'loop') method which is used to mitigate the magnetic field around overhead power transmission line is dependent on its configuration and installed location, which are affected by installation conditions of the loops such as objective areas and levels of magnetic field mitigation. Thus, because the design problem of loops is difficult and cumbersome by variety of their configuration and complexity of magnetic coupling mechanism, it is need to be formulated as a computer-based optimum problem to determine the most effective and reasonable loop model satisfying the installation conditions. In this paper, the optimum locations of the multi-wired multiple loops including series reactance compensations are searched by using the genetic algorithm (GA) to mitigate effectively the magnetic fields of relatively near points or far points from transmission line at 1m height, and the magnetic fields mitigation characteristics of each loop are analyzed in the view of magnitude, direction and phase of cancellation fields by polarized vector concept to identify their adequacy and rationality for the installation objectives.

Key Words : Magnetic Field Mitigation, Passive Conductor Loop, Genetic Algorithm

1. 서 론

송전선로에서 발생하는 극저주파 전자계의 인체 위해성 논란이 계속되고 있는 가운데 전자계 노출을 줄이기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있다. 이들 자계 저감기법 중에서 가공 송전선로 주변에 수동 도체루프(passive conductor loop)를 설치하는 방식이 주목받고 있는데 그 이유는 도입 비용과 설치 용이성 면에서 가장 현실성이 높은 것으로 판단되기 때문이다. 도체루프 도입의 기본 목적은 자계를 저감시키기 위한 것이므로 송전선로 주변의 자계 수준을 가급적 낮게 만드는 것이 중요하며, 그 방안으로서 도체루프에 커패시터를 직렬로 투입하거나 도체루프를 동시에 다수 설치하여 광범위한 송전선로 주변영역에 대해 저감성능을 개선하려는 등의 연구가 이루어지고 있다[1]~[6].

그런데 실제 적용에 있어서 자계저감이 요구되는 영역이 선로주변의 일부 공간으로 국한될 수 있으며 설치에 관한 여러 가지 제약 조건들이 부과될 수 있으므로 도체루프의 형태와 위치는 다양한 설치 여건을 만족하면서 높은 수준의 저감을 실현할 수 있도록 폭넓고 세밀한 검토를 바탕으로 결정되어야 한다. 이 과정에서 우선 송전선로와 여러 도체루프들 사이의 자기적 결합관계를 해석하여 유도전류를 계산하는 수식

을 확립하는 것이 기본적으로 요구되는데, 이를 포함하는 전체적인 도체루프 설계에 관한 문제는 그 적용 형태의 다양성과 복잡한 결합관계로 인해 상당히 까다롭기 때문에 기존의 몇 가지 설계기준을 바탕으로 설계자의 경험과 시행착오에 의존하는 방식[4]~[6]으로는 소요 시간과 노력 그리고 자계 저감성능 면에서 만족할만한 결과를 기대하기 어렵다. 그러므로 그 과정을 컴퓨터를 이용한 최적화 문제로 정식화할 필요가 있다. 그런데 다양한 도체루프 형태와 설치조건을 고려한 최적설계 문제의 목적함수는 복잡한 다변수 비선형 방정식으로 표현되기 때문에 결정론적 최적화 기법보다는 확률론적 접근법을 이용하는 것이 타당하다.

따라서 본 논문에서는 다양한 도체루프 방식을 대상으로 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용해 가공송전선로에서 발생하는 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 최적의 형태와 설치위치 등을 찾아내고, 분극벡터(polarized vector)의 개념을 사용해 각 도체루프 모델의 특징을 살펴봄으로써 목적에 가장 부합하는 효과적이고 합리적인 도체루프 모델을 제시하고자 한다.

2. 도체루프가 설치된 선로주변 자계 해석

도체루프의 형태나 설치 개수 등에 따른 각각의 특징을 다양하게 비교해봄으로써 주어진 여건과 설치 목적에 적합한 도체루프 모델을 찾아낼 수 있다. 이 과정에서 우선적으로 도체루프에 유도되는 전류를 계산하는 것이 요구되는데, 도체루프의 구성이 다양화되고 복잡해짐에 따라 기존 논문[5][6]에서 소개된 방법보다 체계적인 유도전류 계산 절차가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 가공송전선로와 마찬가지로 다중선 다

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 前任技術員 · 工博

E-mail : proa@keri.re.kr

^{*} 終身會員 : 成均館大學教 情報通信工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 12月 29日

最終完了 : 2005年 4月 11日

중 도체루프를 직선 도체들의 집합으로 모델링하여 각 도체루프에 유도되는 전류를 계산하도록 한다.

2.1. 다중선 다중 도체루프의 유도전류

[3]에서 소개했던 2선 단일 도체루프에 대한 계산방법을 확장하여 다중선 다중 도체루프의 유도전류 계산식을 이끌어낼 수 있다. 본 절에서는 편의상 1회선 가공송전선로 주변에 3선 도체루프와 2선 도체루프가 동시에 설치된 경우를 예로 들어 그 과정을 설명하도록 한다.

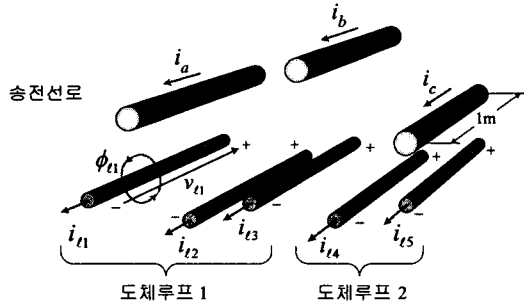


그림 1 3선 도체루프와 2선 도체루프가 동시에 설치된 송전선로의 3차원 구조

Fig. 1 3D aspect of the transmission line with 3-wired and 2-wired loops together

도체루프가 그림 1과 같은 경우에 각 도체의 단위 길이당 쇠교자속[Wb/m]은 식 (1)과 같이 인덕턴스 행렬과 전류벡터의 곱의 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{12} \\ \Phi_{13} \\ \Phi_{14} \\ \Phi_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11a} & L_{11b} & L_{11c} \\ L_{12a} & L_{12b} & L_{12c} \\ L_{13a} & L_{13b} & L_{13c} \\ L_{14a} & L_{14b} & L_{14c} \\ L_{15a} & L_{15b} & L_{15c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11}^1 & L_{12}^1 \\ L_{13}^1 & L_{14}^1 \\ L_{15}^1 & L_{16}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

간단히, $\Phi = L_{LP} I_P + L_{LL} I_L$

여기서, $L_{mn} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D_{mn}}$ [H/m], $D_{mn} = e^{-1/4} r_m$

D_{mn} : m 번 도체와 n 번 도체 사이 거리 [m]

r_m : m 번 도체의 반경 [m]

식 (1)에서 L_S^1 과 L_S^2 는 각각 도체루프 1과 도체루프 2의 유도성 리액턴스를 결정하는 자기(self) 인덕턴스 행렬이며, 도체루프에 직렬로 삽입되는 커패시터는 그 리액턴스 보상을 만큼 L_S^1 과 L_S^2 를 감소시키는 역할을 하게 된다.

한편, 각 루프도체의 전압극성을 그림 1과 같이 설정하였을 때 각 도체의 양단 전압을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{도체루프 1: } \begin{cases} V_{11} = j\omega\Phi_{11} + R_{11} \cdot I_{11} \\ V_{12} = j\omega\Phi_{12} + R_{12} \cdot I_{12} \\ V_{13} = j\omega\Phi_{13} + R_{13} \cdot I_{13} \end{cases} \quad (2.a)$$

$$\text{도체루프 2: } \begin{cases} V_{14} = j\omega\Phi_{14} + R_{14} \cdot I_{14} \\ V_{15} = j\omega\Phi_{15} + R_{15} \cdot I_{15} \end{cases} \quad (2.b)$$

여기서, R_m : m 번 루프도체의 단위 길이당 저항[Ω/m]

그런데 각 도체루프에 대해 다음과 같은 조건이 성립한다. 즉, 도체들이 말단에서 서로 단락되어 루프를 형성하므로 각 루프도체들의 양단전압이 동일하며, 외부에 대해 고립되어 있으므로 전류의 합은 영이어야 한다는 것이다. 따라서 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{도체루프 1: } \begin{cases} V_{11} = V_{12} \rightarrow V_{11} - V_{12} = 0 \\ V_{12} = V_{13} \rightarrow V_{12} - V_{13} = 0 \\ I_{11} + I_{12} + I_{13} = 0 \end{cases} \quad (3.a)$$

$$\text{도체루프 2: } \begin{cases} V_{14} = V_{15} \rightarrow V_{14} - V_{15} = 0 \\ I_{14} + I_{15} = 0 \end{cases} \quad (3.b)$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 도체루프의 양단 전압이 제거된 다음과 같은 형태의 조건식을 얻을 수 있다.

$$\text{도체루프 1: } \begin{cases} j\omega(\Phi_{11} - \Phi_{12}) = -(R_{11} \cdot I_{11} - R_{12} \cdot I_{12}) \\ j\omega(\Phi_{12} - \Phi_{13}) = -(R_{12} \cdot I_{12} - R_{13} \cdot I_{13}) \\ 0 = j\omega(I_{11} + I_{12} + I_{13}) \end{cases} \quad (4.a)$$

$$\text{도체루프 2: } \begin{cases} j\omega(\Phi_{14} - \Phi_{15}) = -(R_{14} \cdot I_{14} - R_{15} \cdot I_{15}) \\ 0 = j\omega(I_{14} + I_{15}) \end{cases} \quad (4.b)$$

식 (1)의 양변에 $j\omega$ 를 곱한 다음, 식 (4)를 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 쇠교자속 벡터가 제거된 형태의 행렬식으로 식 (1)을 표현하는 것이 가능하다.

$$0 = j\omega M \cdot I_P + Z \cdot I_L \quad (5)$$

따라서 도체루프의 유도전류를 식 (6)과 같이 송전선로 전류로부터 계산할 수 있게 된다.

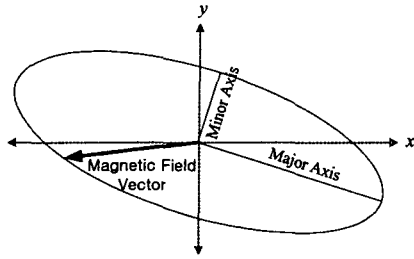
$$I_L = Z^{-1} \cdot (-j\omega M) \cdot I_P \quad (6)$$

M 은 주로 송전선로와 도체루프와의 기하학적 구조에 의한 자기적 결합관계를 포함하고 있는 반면에, Z 는 도체루프들 사이의 결합관계와 각 도체루프의 저항 및 리액턴스를 포함하고 있다. 그러므로 루프도체의 저항을 줄이거나 커패시터를 직렬로 투입하면 Z 가 작아지며 그에 상응하여 유도전류의 크기가 증가된다. 식 (6)을 이용해 계산한 유도전류를 바탕으로 도체루프가 설치된 가공송전선로 주변의 자계를 간단히 계산할 수 있다.

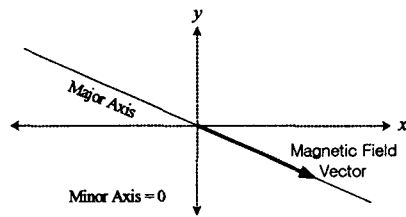
2.2. 도체루프를 이용한 자계저감 원리 및 한계

도체루프가 설치된 선로주변 임의의 점에 나타나는 자계를

분극벡터(polarized vector)의 관점에서 살펴보고 효과적인 저감이 이루어지기 위한 조건 및 실현 방법 등을 생각해 보도록 한다.



(a) 타원형 분극(Elliptical polarization)



(b) 선형 분극(Linear polarization)

그림 2 분극 벡터

Fig. 2 Polarized vector

전계도 마찬가지로 3상 송배전선로 주변에 형성되는 자계는 x, y 성분간의 위상차로 인해 일반적으로 그 크기와 방향이 그림 2(a)와 같은 궤적을 따라 회전하는 타원형 분극벡터인 반면, 2선 도체루프와 같은 단상 선로에 의해 만들어지는 자계는 그림 2(b)와 같이 직선형 궤적을 따라 변화하는 선형 분극벡터이다. 그러므로 송전선로 주변에 2선 도체루프를 설치하면 그림 3과 같이 타원형 분극자계벡터 $B_{Elliptic}$ 과 선형 분극자계벡터 B_{Linear} 가 합쳐진 합성자계 $B_{Resultant}$ 가 송전선로 주변에 나타나게 된다[5].

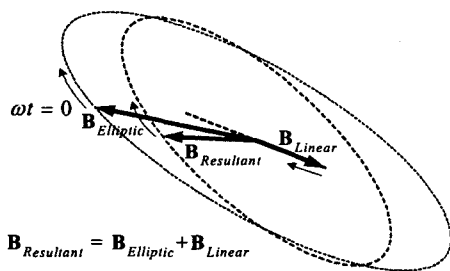


그림 3 합성 벡터의 예

Fig. 3 Example of resultant polarized vector

그림 3은 2선 도체루프를 설치하여 송전선로 주변 임의의 점에서의 자계를 저감시키는 일반적인 자계저감 메커니즘을 보여주고 있는 것으로서, $B_{Resultant}$ 의 크기는 기본적으로 $B_{Elliptic}$ 에 더해지는 B_{Linear} 의 크기에 따라 달라지지만 경우에 따라 $B_{Elliptic}$ 과 B_{Linear} 상호간의 분극방향과 위상이 더 중요한 요인이 될 수도 있다. 따라서 $B_{Elliptic}$ 을 효과적으로 상쇄시키기 위해서는 가급적 B_{Linear} 가 $B_{Elliptic}$ 에 대해 동일한 분극방향과 반

대 위상을 갖도록 하는 것이 바람직하다. 여기서 동일한 분극 방향이란 B_{Linear} 의 분극방향이 $B_{Elliptic}$ 의 장축과 같은 방향을 갖는다는 의미이고 반대 위상은 $B_{Elliptic}$ 이 타원형 궤적의 장축을 지나는 시점에 B_{Linear} 도 선형 궤적상의 반대 방향 최대점을 지나야한다는 의미이다. 이러한 조건에서 B_{Linear} 의 크기를 증가시키면 $B_{Resultant}$ 는 $B_{Elliptic}$ 의 단축을 장축으로 갖는 타원형 분극벡터가 되며 B_{Linear} 의 크기를 더욱 증가시켜 $B_{Elliptic}$ 의 장축과 같게 하면 $B_{Elliptic}$ 의 단축과 동일한 선형 분극벡터가 된다. 바로 이것이 2선 도체루프를 이용해 얻을 수 있는 자계저감의 한계치가 된다. 다시 말해, 이 상태에서 B_{Linear} 를 어떤 식으로 변화시키더라도 $B_{Resultant}$ 가 더 이상 작아질 수 없다는 의미이다. 한편 이를 극복하기 위한 방안은 3선 이상의 다중선 도체루프를 설치하거나 또는 동시에 2개 이상의 다중 도체루프를 설치하여 타원형 분극 자계를 발생시키는 것이다. 그렇게 함으로써 송전선로에서 발생하는 $B_{Elliptic}$ 을 완벽하게 상쇄시키는 것이 가능해진다.

3. 유전 알고리즘을 이용한 도체루프 최적 위치 선정

송전선로 주변의 특정 지점들, 즉 저감영역에서 자계저감이 효과적으로 이루어지기 위해서는 그 영역에 대해 상쇄자계를 만들어내는 전류의 기하학적 위치가 적절해야 할 뿐 아니라 그 크기와 위상도 적절하여 2.2절에서 기술한 조건이 최대한 만족될 수 있어야 하는데, 결과적으로 이것은 송전선로에 대해 도체루프가 적절한 위치를 가질 때에 가능한 것이다.

그와 같은 도체루프의 설치 위치를 결정하기 위해 최적화 기법을 도입함에 있어서 목적함수와 제약조건들이 직렬 리액턴스를 보상한 다중선 다중 도체루프는 물론이고 단순한 2선 단일 도체루프 설치를 고려하는 경우에 있어서도 복잡한 다변수 비선형 방정식으로 표현되기 때문에 기존의 결정론적 접근 방법을 적용하기 어려우므로, 본 논문에서는 확률론적 접근 방법 중의 하나로 폭넓게 활용되고 있는 유전 알고리즘을 사용하여 다양한 도체루프의 최적 설치 위치를 탐색하도록 한다.

3.1. 목적함수 및 제약조건

도체루프의 최적 위치 선정 문제는 기본적으로 송전선로 주변영역의 자계를 최소로 만드는 설치 좌표와 직렬 리액턴스 보상률을 탐색하는 과정으로 요약될 수 있으며, 그 문제를 정식화 과정에서 각 도체루프들의 좌표와 직렬 리액턴스 보상률이 변수가 된다. 그림 4에서 보는 바와 같이 송전선로 주변영역이 공간상의 N 개 지점으로 대표될 수 있으므로 자계저감 대상영역에 따라 N 개 전체 또는 일부 점들의 자계를 목적함수로 설정할 수 있다. 구체적으로, 선로 인근의 일부 영역에 대한 자계저감이 목적이라면 목적함수는 식 (7.a)와 같이 그 영역을 대표하는 i 점과 j 점 사이의 자계를 합산한 형태가 되며, 또한 선로 외곽영역의 자계에 관심이 있다면 목적함수는 식 (7.b)에서 보는 바와 같이 해당 영역을 대표하는 각 점들의 자계 합을 최소화하는 문제로 표현된다.

목적함수 :
$$\text{Minimize } \sum B_n \tag{7.a}$$

$$\text{Minimize } \left(\sum_{n=1}^I B_n + \sum_{n=j}^N B_n \right) \quad (7.b)$$

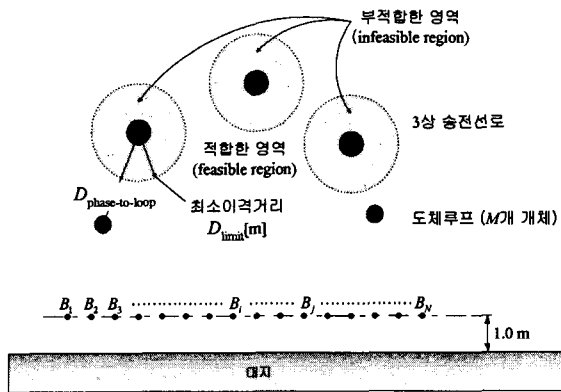


그림 4 도체루프 최적 위치 선정의 개요
Fig. 4 Overview of optimum location problem of loop

그런데 도체루프는 안전상의 이유로 대지 간 이격거리를 충분히 확보할 수 있도록 높은 위치에 설치되어야 하며, 코로나 발생을 비롯한 절연상의 이유로 그림 4에서 보는 바와 같이 송전선로 각 상과 충분한 이격거리를 갖도록 설치되어야 한다. 대지 간 이격거리는 도체루프의 위치 좌표 변수의 범위를 지정함으로써 간단히 해결되며 송전선로 각 상과의 이격거리 확보는 식 (8)과 같은 제약조건을 적용함으로써 이루어질 수 있다.

$$\text{제약조건 : } D_{\text{phase-to-loop}} \geq D_{\text{limit}} \text{ for all loop conductors} \quad (8)$$

3.2. 적합도 평가 및 재생산

적합도(fitness)의 평가는 개체군의 각 개체 즉, M개 도체루프의 위치 좌표와 직렬 리액턴스 보상률을 각각 식 (7)의 목적함수에 대입하여 송전선로 주변 자계를 평가하고 식 (8)의 제약조건 위배 여부와 정도에 따른 벌점(penalty)을 계산하여 식 (9)와 같이 각 개체의 적합도를 평가하도록 한다.

$$\text{fitness} = \frac{1}{\text{objective function} \times \text{penalty function}} \quad (9)$$

이와 같이 평가된 적합도를 바탕으로 자계저감에 효과적인 개체들을 선택한 후 교배 및 돌연변이 과정을 거쳐 새로운 개체군, 즉 세대를 형성하는 진화 과정을 반복함으로써 해에 근접하게 된다.

4. 사례 연구

유전 알고리즘을 이용해 송전선로의 자계저감을 극대화하기 위한 몇 가지 도체루프에 대한 최적 설치 위치를 결정했으며 그것을 바탕으로 각 도체루프의 자계 저감성을 평가하여 비교하였다. 아울러 도체루프의 리액턴스를 보상한 경우의 최적 설치 위치와 그에 따른 저감성 향상을 모의하여 비교하였다.

4.1. 송전선로 및 도체루프 모델

그림 5와 같은 기하학적 구조를 갖는 수직 2회선 송전선로를 대상으로 자계저감을 위한 도체루프의 최적 위치를 모의하였다.

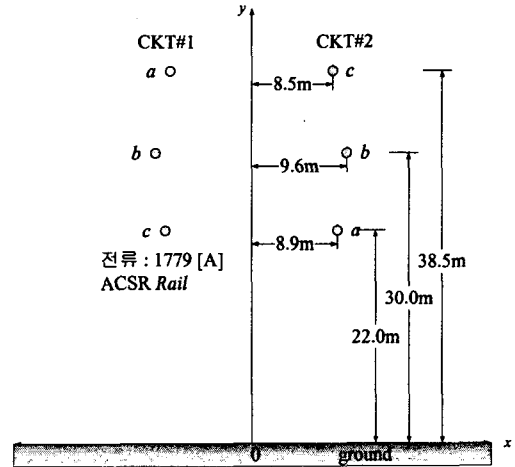


그림 5 도체 역상배열 수직 2회선 송전선로 모델
Fig. 5 Double circuit transmission line model

도체루프의 형태와 개수 등을 조합하여 송전선로 주위에 설치 가능한 다양한 경우를 생각해 볼 수 있으나 실용적인 측면에서 기본이 되는 특징적인 4가지 도체루프 모델을 검토 대상으로 선정하였다. 구체적으로, 표 1에서 보는 바와 같이 도체수가 2선 혹은 3선인 도체루프 1개를 선로를 중심으로 좌우 대칭으로 설치하는 형태와 2선 도체루프 2개를 선로를 중심으로 좌우 대칭 또는 비대칭으로 설치하는 형태로 구분하여 최적의 자계저감을 실현하는 설치 위치를 모의하였다. 편의상 각 도체루프의 형태를 A형, B형, C형, D형으로 표시하도록 한다. 한편 도체루프의 도체도 송전선로와 마찬가지로 ACSR Rail을 사용한 것으로 가정하였다.

표 1 검토 대상 도체루프 모델

Table 1 Passive conductor loop models to be studied

도체루프 형태	도체루프 종류 및 설치 개수	도체 배치
A형	2선 도체루프 1개	좌우 대칭
B형	3선 도체루프 1개	좌우 대칭
C형	2선 도체루프 2개	좌우 대칭
D형	2선 도체루프 2개	좌우 비대칭

일반적으로 도체루프의 설치 위치는 자계 저감영역을 어디로 설정하느냐에 따라 달라지므로, 본 논문에서는 지상 1m 높이의 영역에 대해 표 2에서 보는 바와 같이 송전선로 인근 영역과 송전선로 외곽영역 즉, 그림 5의 x 축 방향으로 (-15m ≤ x ≤ 15m)와 (-30m ≤ x ≤ -20m 그리고 20m ≤ x ≤ 30m)의 2개 범위로 구분하였다. 여기에 도체루프의 직렬 리액턴스를 보상하는 경우와 보상하지 않는 2개 조건을 추가적으로 조합하여 사례1~사례4의 4가지 사례를 검토하였다. 각 사례에서 표 1의 4가지 도체루프 모델(A형~D형)을 고려함으로써 세부적으로는 16가지 사례에 대한 연구를 수행하였으며, 16개 사례는

표 2에 보는 바와 같이 사례 번호에 도체루프 모델의 알파벳을 “-”로 연결시킨 표기를 사용하여 식별하도록 했다.

표 2 검토 사례
Table 2 Studied cases

검토 사례	자계 저감 범위[m]	리액턴스 보상 여부	표기
사례 1	-15 ≤ x ≤ 15	×	1-A,B,C,D
사례 2	-30 ≤ x ≤ -20, 20 ≤ x ≤ 30	×	2-A,B,C,D
사례 3	-15 ≤ x ≤ 15	○	3-A,B,C,D
사례 4	-30 ≤ x ≤ -20, 20 ≤ x ≤ 30	○	4-A,B,C,D

한편, 2가지 자계 저감영역에 따라 사례1과 3은 목적함수로 식 (7.a)를 선택했으며 사례2와 4는 식 (7.b)를 선택하였다. 각 사례에서 도체루프는 실용상 대지와는 10m 이상의 이격거리를 유지하면서 송전선로를 중심으로 좌우 15m 범위 이내에 한하여 설치될 수 있는 것으로 그 범위를 제한하였으며, 송전선로 각 상과 4m 이상의 이격거리를 갖도록 제약조건을 주었다.

그리고 유전 알고리즘을 사용하여 최적의 해를 찾는 과정에서 표 3과 같은 파라미터를 사용하였다.

표 3 최적화에 사용된 유전 알고리즘 관련 파라미터
Table 3 Genetic algorithm parameters used in this study

개체수	교배 확률	돌연변이 확률	최대 세대수
500개	80%	1%	300세대

4.2. 최적 위치 선정 결과

각 사례별 도체루프 모델의 최적 위치 선정 결과를 그때의 유도전류와 함께 표 4에 정리하였다. 특히 도체루프의 직렬 리액턴스 보상을 고려한 사례 3과 사례 4에 대해서는 최적 보상률 즉, 몇 퍼센트로 리액턴스를 줄여야 하는지도 함께 표시하였다.

그림 6은 도체루프의 배치 형태를 한눈에 파악할 수 있도록 사례 1을 예로 들어 표 대신에 그림으로 나타낸 것이다.

선로 인근영역의 자계저감을 목적으로 한 사례 1과 사례 3의 결과를 살펴보면 도체루프가 전반적으로 송전선로 가까이 배치되어있음을 알 수 있는데 그로인해 큰 전류가 유도되어 강한 상쇄자계를 형성할 수 있을 뿐 아니라 저감영역과 인접되어 효과적으로 자계를 저감시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 반면, 사례 2와 사례 4는 송전선로 외곽에 대한 자계저감이 목적이므로 상대적으로 저감영역과 가까운 송전선로 바깥쪽에 도체루프가 배치되는 것이 효과적임을 알 수 있다. 한편 대체적으로 도체루프가 송전선로와의 이격거리 제약을 만족하는 경계 및 설치 가능 범위의 경계에 걸쳐있음을 볼 수 있는데, 이것은 이격거리 제약을 완화하거나 설치 가능 범위를 확대할 수 있다면 자계 저감률을 더욱 향상시킬 수 있음을 의미하는 것이다.

표 4 사례별 최적위치 선정 결과
Table 4 Results of optimum location for each case

사례	각 도체의 좌표 (x, y)[m]	각 도체의 전류 (크기 ∠ 위상각°)[A]	리액턴스 보상[%]
1-A	-10.333, 18.254	261.366 ∠ -23.736°	-
	10.333, 18.254	261.366 ∠ 156.264°	
1-B	-10.476, 18.254	263.840 ∠ -34.482°	-
	0.000, 32.857	98.279 ∠ 66.426°	
1-C	10.476, 18.254	263.547 ∠ 166.998°	-
	-12.143, 19.524	209.567 ∠ -24.959°	
	12.143, 19.524	209.567 ∠ 155.041°	
1-D	-9.286, 17.619	192.260 ∠ -25.002°	-
	9.286, 17.619	192.260 ∠ 154.998°	
	-11.667, 18.889	155.330 ∠ -29.974°	
	9.762, 10.000	155.330 ∠ 150.026°	
2-A	-10.238, 10.000	155.845 ∠ -19.851°	-
	12.143, 19.524	155.845 ∠ 160.149°	
2-B	-11.667, 19.048	258.385 ∠ -23.836°	-
	11.667, 19.048	258.385 ∠ 156.165°	
2-C	-11.429, 18.889	265.519 ∠ -34.663°	-
	0.000, 32.222	99.912 ∠ 66.479°	
	11.429, 18.889	265.010 ∠ 167.047°	
2-D	-11.667, 18.888	245.050 ∠ -23.914°	-
	11.667, 18.889	245.050 ∠ 156.086°	
	-15.000, 10.635	57.755 ∠ -27.759°	
3-A	15.000, 10.635	57.755 ∠ 152.241°	-
	-10.714, 18.254	151.625 ∠ -33.721°	
	15.000, 10.000	151.625 ∠ 146.279°	
	-15.000, 10.000	150.761 ∠ -17.833°	
3-B	12.143, 19.524	150.761 ∠ 162.167°	-
	-10.894, 18.524	604.174 ∠ -15.507°	
3-C	10.894, 18.524	604.174 ∠ 164.493°	42.131
	-10.073, 18.172	626.956 ∠ -23.147°	
	0.000, 35.024	178.534 ∠ 75.105°	
3-D	10.073, 18.172	626.751 ∠ 173.227°	40.958
	-9.721, 16.882	459.728 ∠ 0.177°	
	9.721, 16.882	459.728 ∠ -179.823°	
	-9.927, 14.379	228.354 ∠ -66.842°	
4-A	9.927, 14.379	228.354 ∠ 113.158°	35.484
	-10.191, 18.094	476.002 ∠ -10.547°	
	9.252, 14.184	476.002 ∠ 169.453°	
4-B	-9.106, 13.285	228.159 ∠ -77.093°	36.852
	14.736, 26.735	228.159 ∠ 102.907°	
4-C	-10.347, 18.250	612.440 ∠ -15.182°	46.628
	10.347, 18.250	612.440 ∠ 164.818°	
4-D	-15.000, 10.274	237.007 ∠ -19.433°	41.447
	0.000, 37.097	43.132 ∠ 75.727°	
4-E	15.000, 10.274	237.052 ∠ 171.007°	36.950
	-11.086, 15.005	420.798 ∠ -4.757°	
	11.086, 15.005	420.798 ∠ 175.243°	
4-F	-14.754, 11.369	121.312 ∠ -72.597°	32.845
	14.754, 11.369	121.312 ∠ 107.404°	
4-G	-11.041, 18.055	401.066 ∠ -13.667°	37.928
	12.185, 11.642	401.066 ∠ 166.333°	
	-9.370, 11.369	299.644 ∠ -74.093°	
	5.440, 27.752	299.644 ∠ 105.907°	

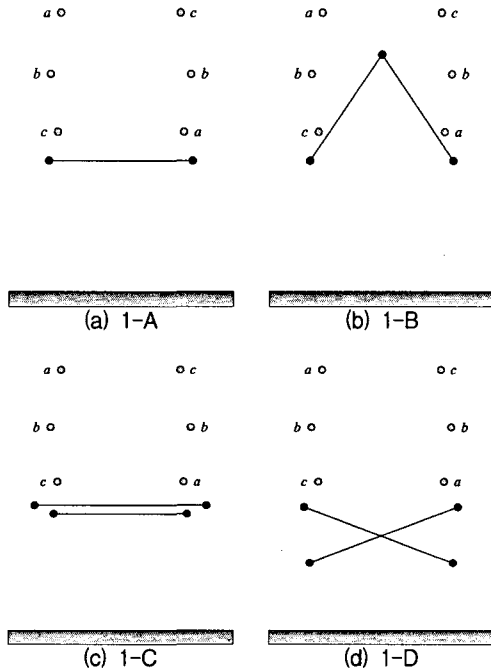


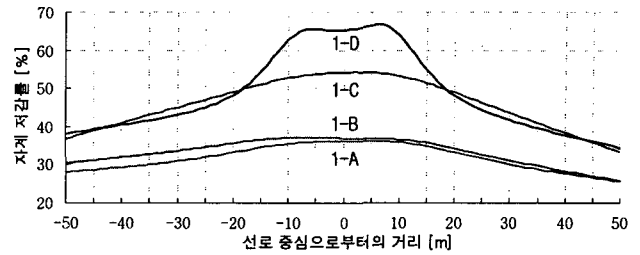
그림 6 사례 1의 도체루프 형태별(A~D) 최적 배치
Fig. 6 Optimum configuration for each loop type of case 1

4.3. 사례별 자계 저감률 비교

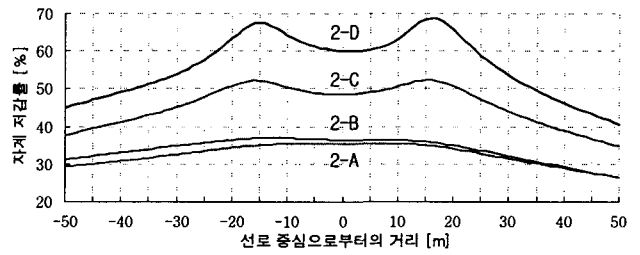
최적 위치 선정 결과를 바탕으로 각 사례별 송전선로 단면 지상 1m 높이에서의 자계 저감률을 다음과 같이 계산하여 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

$$\text{자계 저감률}[\%] = \frac{\text{도체루프 설치에 따른 자계 저감분}}{\text{도체루프 설치전 자계}} \times 100$$

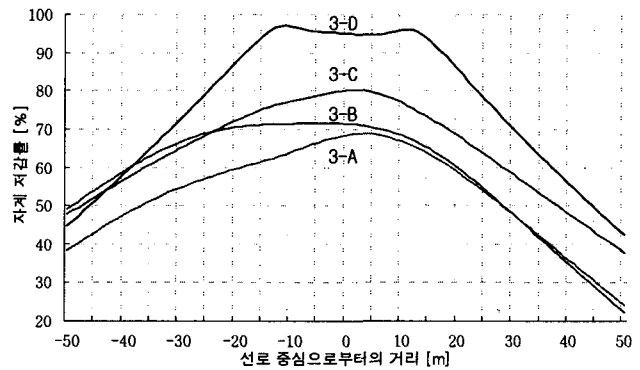
그림 7을 살펴보면 어느 영역을 목적으로 하였느냐에 따라 사례별 그 결과가 상당 부분 달라지는 것을 알 수 있는데, 단일 도체루프인 A형과 B형 특히 2선 단일 도체루프인 A형의 경우에는 별다른 차이가 없는 반면, 다중 도체루프 특히 D형 도체루프의 경우에는 뚜렷한 차이를 보여주고 있다. 한편, 자계 저감영역에서의 저감성능을 비교해 보면 각 사례별로 차이가 있긴 하지만 일반적으로 다중 도체루프 방식이 단일 도체루프 방식에 비해 대략 2배에 달하는 높은 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 그리고 도체루프의 리액턴스를 보상함으로써 상대적으로 저감성능이 높지 않았던 A형과 B형의 성능도 2배 이상 향상되며 D형의 경우에는 선로 인근영역의 자계를 최고 97% 이상 저감시키는 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과들은 단일 도체루프를 사용하는 것보다는 다수의 도체루프를 대각선 형태로 엇갈리게 설치하는 방식이 협소한 특정 영역에 대해 효과적으로 자계저감을 실현할 수 있는 최선의 도구임을 의미하는 것이다. 한편, 단일 도체루프 방식은 저감 성능이 낮다는 점 이외에도 유도전류가 크기 때문에 전력손실이 상대적으로 크다는 단점[2]~[4]이 있으므로 설치에 따른 대지간 이격거리 감소 또는 첩탑의 하중 증가와 같은 부분이 문제가 되는 경우에 한하여 리액턴스를 보상한 단일 도체루프 방식을 채택하는 것이 절충안이 될 수 있다.



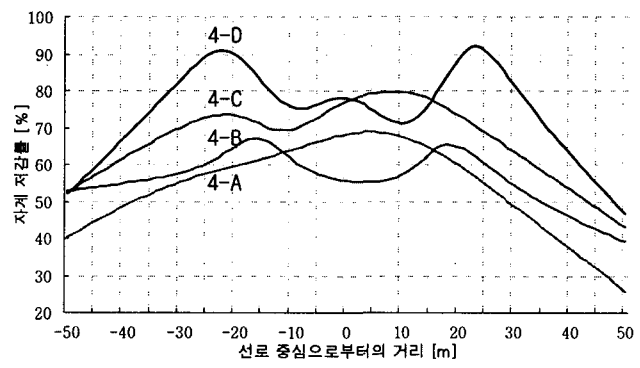
(a) 사례 1 : 선로인근영역 저감



(b) 사례 2 : 선로외곽영역 저감



(c) 사례 3 : 선로인근영역 저감, 리액턴스 보상



(d) 사례 4 : 선로외곽영역 저감, 리액턴스 보상

그림 7 각 사례별 자계 저감률 비교

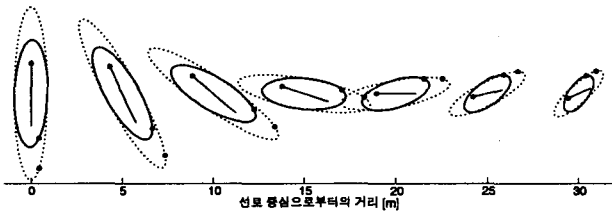
Fig. 7 Comparison of the magnetic field mitigation rate for each case

4.4. 결과 검증 및 분석

본 절에서는 그림 3과 비슷한 형식으로 송전선로에서 발생하는 자계와 도체루프에 의해 발생하는 상쇄자계의 분극벡터를 표시하고 2.2절의 내용을 바탕으로 각각의 크기와 방향을 살펴봄으로써, 4.2절의 위치선정 결과에 대한 타당성을 검증하고 도체루프 방식과 위치에 따라 4.3절에서 확인한 바와 같이

저감성능이 크게 달라지는 이유를 분석해보았다. 편의상 검토 사례는 송전선로 중심 부근의 자기저감을 목적으로 한 사례 1과 사례3으로 한정하였다.

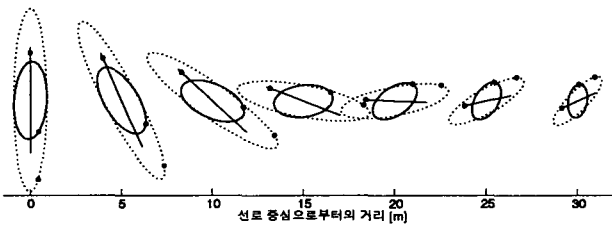
그림 8은 송전선로 중심에서 우측 5m 간격으로 1m 높이의 점들을 선택해 각 점의 자기벡터 궤적을 그린 것이다. 점선은 선로에 의해 발생하는 분극자기벡터이고 가는 실선은 도체루프에 의해 발생하는 상쇄자기의 분극벡터이며 굵은 실선이 저감된 합성분극벡터를 나타낸 것이다. 궤적에 표시되어 있는 작은 원은 $\omega t=0$ 인 시점을 나타내는 것으로 자기벡터는 시간이 경과함에 따라 궤적을 따라 시계방향으로 회전한다.



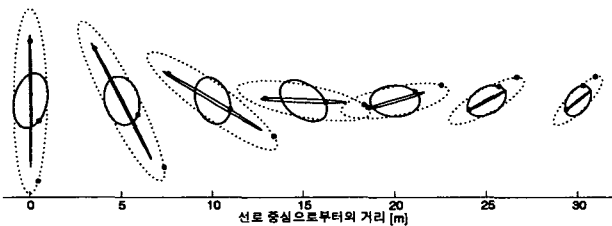
(a) 사례 1-A



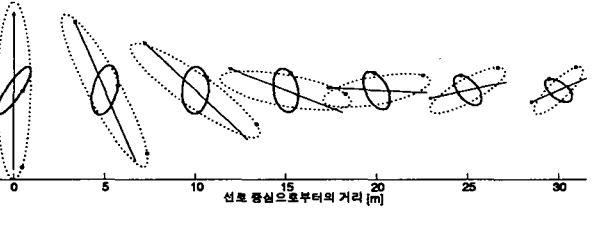
(b) 사례 1-B



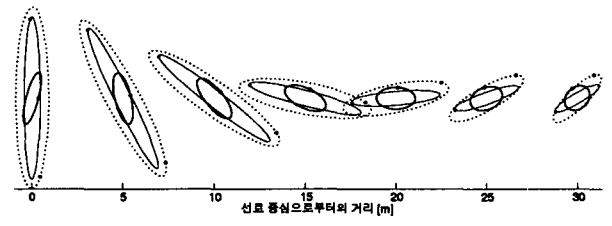
(c) 사례 1-C



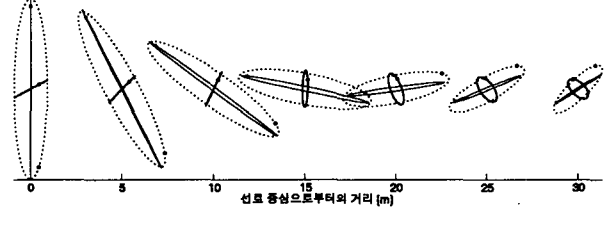
(d) 사례 1-D



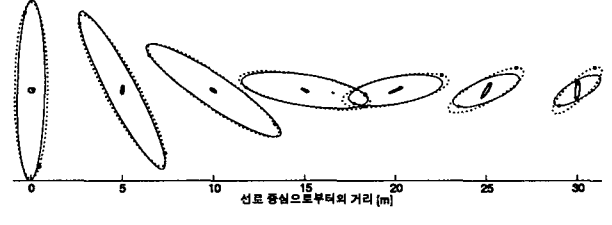
(e) 사례 3-A



(f) 사례 3-B



(g) 사례 3-C



(h) 사례 3-D

그림 8 사례별 선로주변 분극자기벡터 궤적 (지상 1m)
Fig. 8 Lateral profile of magnetic field vector loci at 1m height for each case

우선 그림 8의 (b)와 (a)를 비교해보면 (b)의 경우에 도체루프에 의해 발생하는 상쇄자기의 타원형 분극벡터이기 때문에 (a)보다 저감성능이 약간 더 우수함을 알 수 있다. (c)와 (a)를 비교해보면 두 개의 도체루프를 사용함으로써 상쇄자기의 전체적으로 커졌기 때문에 저감효과가 향상되었음을 알 수 있다. (d)와 (c)를 비교해보면 (d)의 경우 도체루프가 타원형 분극벡터를 발생시키고 있을 뿐 아니라 송전선로에 의해 발생하는 자계의 분극방향에 비해 좀더 일치되어있고 무엇보다도 선로 부근 상쇄자기의 크기가 (c)에 비해 크기 때문에 높은 저감효과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 즉, 도체루프에 유도되는 전류가 (b)에 비해 작음에도 불구하고 도체루프가 저감영역에 대해 기하학적으로 적절히 배치됨으로써 효과적으로 저감성능을 발휘하고 있다고 할 수 있다.

도체루프의 리액턴스를 보정한 그림 8의 (e)~(h)의 경우, 상쇄자기 분극벡터의 특징은 (a)~(d)에 비해 전체적으로 위상이 빨라져서 불리해지지만 크기가 송전선로의 자기 수준으로 크게 증가함으로써 저감성능을 향상시킨다는 것이다. (h)를 예를 들어 살펴보면 송전선로 자기에 대해 상쇄자기의 정반대의 위상을 갖는 것도 아니고 동일한 분극방향을 갖는 것도 아니지만 거의 동일한 크기의 타원형 분극벡터이기 때문에 선로 인근영역에 대해 97% 이상의 높은 저감성능을 나타낼 수 있다.

한편, 송전선로 외곽으로 갈수록 자기 저감률이 떨어지는 것을 그림 7로부터 알 수 있는데, 그 이유는 그림 8에서 알 수 있듯이 상쇄자기의 크기와 위상의 문제라기보다는 송전선로 자기와 상쇄자기의 분극방향이 외곽으로 갈수록 더욱더 어

크나게 되어 적절히 저감이 이루어지지 못하기 때문이다.

5. 결 론

본 논문에서는 수직 2회선 가공송전선로에서 발생하는 지상 1m 높이의 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 다중선 다중 도체루프 모델을 검토하였다. 구체적으로, 다양한 도체루프의 자계 저감성능을 모의하기 위해 다중선 다중 도체루프에 유도되는 전류를 체계적으로 계산할 수 있는 수식을 유도했으며, 자계 저감 범위와 직렬 리액턴스 보상 여부에 따라 4가지 사례로 구분하고 각 사례별 4가지 도체루프 모델의 최적 설치 위치를 유전 알고리즘을 이용해 찾아내었다. 그것을 바탕으로 각 사례별 모델의 저감률을 계산해 비교하였으며, 분극벡터의 크기, 방향, 위상의 관점에서 사례별 도체루프 모델의 저감성능을 분석하였다. 그 결과, 본 논문에서 검토한 4개 도체루프 모델 중에서 2선 도체루프 2개를 대각 방향으로 설치하는 형태가 다음과 같은 이유로 가장 효과적인 것으로 판단되었다.

- ① 자계 저감영역에 대해 가장 높은 저감성능을 발휘한다. 도체루프의 직렬 리액턴스를 최적으로 보상한 경우에는 자계 저감영역, 특히 송전선로 인근영역의 자계를 최고 97% 이상 저감시키는 만족할 만한 성능을 보여준다.
- ② 자계 저감대상을 어디로 설정하느냐에 따라 송전선로 단면의 저감 양상이 크게 달라진다. 이것은 도체루프에 의해 발생하는 상쇄자계를 특정 위치로 집중시킬 수 있는 능력에 관한 것으로서 상대적으로 작은 유도전류를 가지고도 효과적으로 자계를 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다.
- ③ 상쇄자계 분극의 크기, 방향, 위상이 가장 이상적이기 때문에 가장 효율적으로 자계를 저감하는 형태이다.

본 결과는 어디까지나 병행 2회선 도체 역상배열 가공송전선로 주변 1m 높이의 자계를 대상으로 한 것으로서, 도체루프에 사용된 도체의 종류나 최적 위치 선정에 사용된 목적함수 또는 제약조건 등에 따라 달라질 수도 있다.

한편, 자계해석 과정에서 송전선로와 도체루프를 무한 직선 도체로 가정하고 가공지선과 대지의 영향을 고려하지 않는 등 문제를 단순화하였으나 보다 정교하고 실용적인 결과를 얻기 위해서 이러한 부수적인 사항들을 반영한 실제적인 다도체 방식의 송전선로 모델을 선택할 필요가 있다. 또한, 검토된 사례는 송전선로 주변에 설치될 수 있는 도체루프들 중의 일부에 지나지 않기 때문에 향후 연구를 통해 설치 목적이나 여건 또는 송전선로 운전조건 등에 따라 다양한 도체루프의 여러 가지 적용사례를 충분히 검토하여 각각에 적합한 모델들을 찾아내고 얻어진 결과들을 세밀히 분석 종합하여 도체루프 모델들을 일반화시킬 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] M.L. Hiles, R.G. Olsen, K.C. Holte, D.R. Jensen, K.L. Griffing, "Power Frequency Magnetic Field Management using a Combination of Active and Passive Shielding Technology", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp.171-179, January 1998.

[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] 김종형, 신명철, 최상열, "수동루프에 의한 송전선로 상 불평형 발생에 관한 연구", 조명·설비학회 논문지 2003. Vol. 17. No. 6.

[4] Pedro Cruz, Carlos Izquierdo, Manuel Burgos, "Optimum Passive Shields for Mitigation of Power Lines Magnetic Field", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp.1357-1362, October 2003.

[5] 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.

[6] 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.

저 자 소 개



김 종 형 (金 鍾 亨)

1973년 4월 29일생. 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전기시험연구소 선임기술원
Tel : 031-420-6055
Fax : 031-420-6059
E-mail : proa@keri.re.kr



신 명 철 (申 明 澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1973년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수. 1978년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.
Tel : 031-290-7103
E-mail : mcshin@speed.skku.ac.kr