

유전알고리즘을 이용한 송전선로의 자계 저감 루프설계에 관한 연구

\*이광하, \*김대희, \*\*김중형, \*신명철  
\*성균관대학교, \*\*전기연구원

A Study of Loop Design for Magnetic Fields Mitigation of Transmission Line using a Genetic Algorithms

\*K.H. Lee, \*\*D.H. Kim, \*J.H. Kim, \*M.C. Shin  
\*Sungkyunkwan univ, \*\*KERI

**Abstract** - 전력수요의 지속적인 증가로 인해 초고압 (EHV) 송전선로를 포함한 전력설비가 계속 건설됨에 따라 송전선로에서 발생하는 전자계에 관한 논란이 심화될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해소하기 위해 효과적으로 전자계를 저감시킬 수 있는 저감 기법중 송전선로 주변에 수동 도체루프를 사용하여 자계를 저감시키는 방법을 검토하고 유전 알고리즘을 이용해 가공송전선로에서 발생하는 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 최적의 도체루프 모델을 찾고자 하였다.

2. 본 론

2.1 유전 알고리즘을 이용한 도체루프 최적 위치 선정  
자계 저감을 위한 도체루프의 형태와 위치 선정을 위해서는 우선 송전선로와 여러 도체루프들 사이의 자기적 결합관계를 해석하여 유도전류를 계산하는 수식을 확립하는 것이 기본적으로 요구되고 이것은 복잡한 다변수 비선형 방정식으로 표현되기 때문에 본 절에서는 결정론적 최적화 기법이 아닌 확률론적 접근법인 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 도체루프의 최적의 형태와 위치를 찾고자 한다.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가와 양질의 전력에 대한 욕구가 높아짐에 따라서 전력계통은 보다 대형화되고 단위 전력설비는 점차 대용량화됨으로 인해 전기설비에서 발생하는 전자계에 대한 사회적 또는 법적인 규제도 강화되고 있다. 송전선로 인근지역 주민들의 전자계에 대한 관심과 요구수준이 증가하여 전자계 노출의 인체영향과의 관련성이 제기되어 지속적으로 연구되어 지고 있다. 전자계 노출을 줄이기 위한 다양한 기법 중에서 가장 효과적이면서 단순한 방법은 송배전선로의 지상고를 높여 대상과의 이격거리를 확보하는 것이다. 그 이외의 전자계 저감 기법으로서 도체구조 및 상배열을 변경하거나 3상으로 운용되고 있는 현재의 시스템을 6상 이상으로 다상화하는 방법 또는 지하에 매설하는 지중화 등의 방법들을 검토할 수 있다[1]~[2]. 그러나 송배전선로는 전국도에 걸쳐 분포하는 대규모 시스템이며 이미 오랜 기간에 걸쳐 대다수에 의해 사용되어온 기간 시설이기 때문에 앞서 언급한 저감 기법들을 기존의 송배전선로에 적용하기에는 현실적으로 제약이 크다. 따라서 이러한 문제의 대안으로서 가공송전선로 주변에 수동 도체루프(passive conductor loop)를 설치하는 방식이 주목받고 있는데 그 이유는 도입 비용과 설치 용이성 면에서 가장 현실성이 높은 것으로 판단되기 때문이다. 그런데 실제 적용에 있어서 자계저감이 요구되는 영역이 선로주변의 일부 공간으로 국한될 수 있으며 설치에 관한 여러 가지 제약 조건들이 부과될 수 있으므로 도체루프의 설계는 다양한 설치 여건을 만족하면서 높은 수준의 저감을 실현할 수 있도록 폭넓고 세밀한 검토를 바탕으로 결정되어야 한다. 그러므로 그 과정을 컴퓨터를 이용한 최적화 문제로 정식화할 필요가 있는데 기존의 몇 가지 설계 기준을 바탕으로 설계자의 경험과 시행착오에 의존하는 방식[3]~[4]으로는 만족할 만한 성과를 기대하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 다양한 도체루프 방식을 대상으로 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용해 가공송전선로에서 발생하는 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 최적의 형태와 설치위치 등을 찾아내고, 사례연구에서 보듯 실측 데이터를 기반으로 하여 실제 송전선 주변의 주거지를 대상으로 하여 적합한 루프의 형태 등을 살펴 보겠다. 그와 더불어 최적 위치 선정 결과를 바탕으로 송전선로의 자계 저감률을 비교할 것이다.

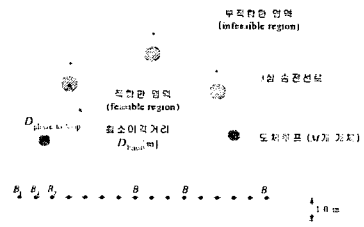
2.1.1 목적함수 및 제약조건

도체루프의 최적 위치 선정 문제는 송전선로 주변 영역의 자계를 최소로 만드는 설치 좌표와 직렬 리액턴스 보상을 탐색하는 과정으로 요약될 수 있으며, 그 문제를 정식화 과정에서 각 도체루프들의 좌표와 직렬 리액턴스 보상이 변수가 된다. <그림 2.1>에서와 같이 송전선로 주변 영역이 공간상의 N개 지점으로 대표될 수 있으므로 자계저감 대상 영역에 따라 N개 전체 또는 일부 점들의 자계를 목적함수로 설정할 수 있다. 구체적으로, 선로 인근의 일부 영역에 대한 자계저감이 목적이라면 목적함수는 식(2.1)와 같이 그 영역을 대표하는 i 점과 j 점 사이의 자계를 합산한 형태가 되며, 또한 선로 외곽 영역의 자계에 관심이 있다면 목적함수는 식(2.1)에서 보는 바와 같이 해당 영역을 대표하는 각 점들의 자계 합을 최소화하는 문제로 표현된다.

목적함수 :

$$\text{Minimize } \sum_{n=1}^N B_n \tag{2.1}$$

$$\text{Minimize } \left( \sum_i B_i + \sum_j B_j \right) \tag{2.2}$$



<그림 2.1> 도체루프 최적 위치선정 개요

도체루프는 안전상의 이유로 대지 간 이격거리를 충분히 확보할 수 있도록 높은 위치에 설치되어야 하며, 코로나 발생을 비롯한 절연상의 이유로 <그림 2.1>에서 보는 바와 같이 송전선로 각 상과 충분한 이격거리를 갖도록 설치되어야 한다. 대지 간 이격거리는 도체루프의 위치 좌표 변수의 범위를 지정함으로써 해결되며 선로 각

상과의 이격거리 확보는 식(2.3)과 같은 제약조건을 적용하여 이루어질 수 있다.

제약조건 :

$$D_{\text{phase-to-loop}} \geq D_{\text{limit}} \text{ for all loop conductors} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 적합도 평가 및 재생산

적합도(fitness)의 평가는 개체군의 각 개체 즉,  $M$ 개 도체루프의 위치 좌표와 직렬 리액턴스 보상률을 각각 식(2.1)의 목적함수에 대입하여 송전선로 주변 자계를 평가하고 식(2.2)의 제약조건에 위배 여부와 정도에 따른 벌점(penalty)을 계산하여 식(2.3)과 같이 각 개체의 적합도를 평가하도록 한다.

$$\text{fitness} = \frac{1}{\text{objective function} \times \text{penalty function}} \quad (2.4)$$

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[8].

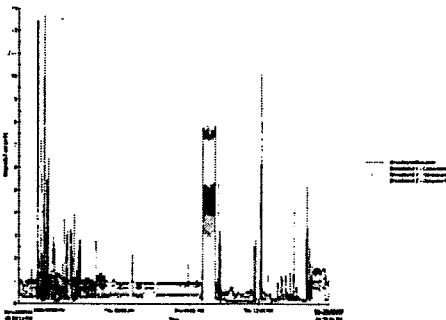
### 2.2 자계 저감 성능 평가 실험

본 논문의 사례는 “송전선로 주변의 전자파 인체영향에 대한 역학적 연구조사연구”라는 프로젝트의 수행과정에서 송전선로 주변 거주지를 대상으로 한 전자계 측정치를 이용하였다. 이 측정치로 송전선로의 자계저감을 극대화하기 위해 유전알고리즘을 이용하여 몇가지 도체루프에 대한 최적 설치 위치를 결정하고 일정한 위치에서의 도체루프의 자계저감 성능을 평가하여 비교하였다.

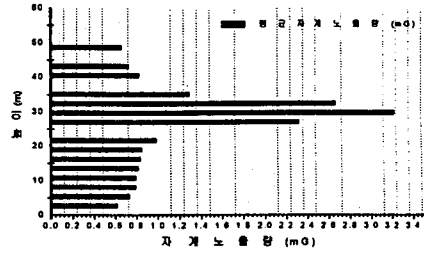
#### 2.2.1 자계 저감 성능 평가 조건

송전선로 주변의 자계저감에 적합한 도체루프 모델을 적용함에 있어서 실측데이터를 활용해 보고자 한다. 이 데이터는 앞서 밝힌 프로젝트 수행 과정에서 측정된 송전탑에서부터 특정한 곳에 위치한(송전탑으로부터 30m) 고층 아파트에서 층별로 얻어진 데이터이다.

<그림 2.2>는 아파트에 거주하는 초등학생들의 24시간 동안의 자계노출량을 측정한 값이다. 이 데이터를 기반으로 거주해 있을 시간 즉, 수면시간(밤12시 ~ 오전6시)에 측정된 값의 평균을 사용하여 <표 2.1>과 같이 높이별 자계 평균값을 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 분포의 특징을 살펴볼 수 있다. 아파트 한층을 2.7m로 하였을 때의 높이와의 상관관계를 나타내는데 10층 높이(25~30m)의 근방에서 자계 평균값이 높아지는 것을 볼 수 있다. 도출된 결과를 가지고 이 높이에 따른 자계 저감률을 살펴보고 적합한 도체루프의 형태를 비교 검토해 보고자 한다.



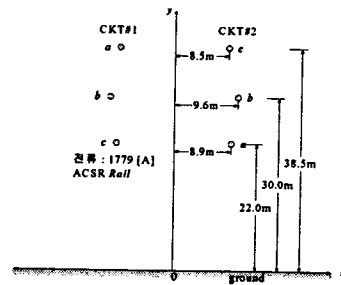
<그림 2.2> 24시간 자계 노출량(측정기기:EMDEX II)



<표 2.1> 건물높이별 자계 노출량

#### 2.2.2 송전선로 및 도체루프 모델의 모의실험

<그림 2.3>과 같은 기하학적 구조를 갖는 수직 2회선 송전선로를 대상으로 자계저감을 위한 도체루프의 최적 위치를 모의하였다.

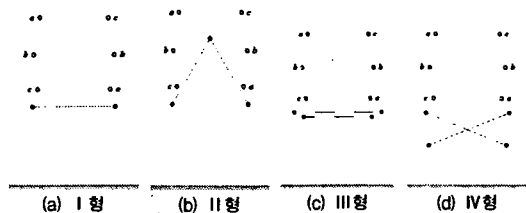


<그림 2.3> 도체 역상배열 수직 2회선 송전선로 모델

도체루프의 형태와 개수 등을 조합하여 송전선로 주위에 설치 가능한 다양한 경우를 생각해 볼 수 있으나 기본이 되는 특징적인 4가지 도체루프 모델을 검토 대상으로 선정하였다. <표 2.2>에서 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. <그림 2.4>는 도체루프 형태를 그림으로 나타내었다. 한편 도체루프의 도체도 송전선로와 마찬가지로 ACSR 을 사용한 것으로 가정하였다.

| 도체루프 형태 | 도체루프 종류 및 설치 개수 | 도체 배치  |
|---------|-----------------|--------|
| I형      | 2선 도체루프 1개      | 좌우 대칭  |
| II형     | 3선 도체루프 1개      | 좌우 대칭  |
| III형    | 2선 도체루프 2개      | 좌우 대칭  |
| IV형     | 2선 도체루프 2개      | 좌우 비대칭 |

<표 2.2> 검토 대상 도체루프 모델



<그림 2.4> 도체루프 형태별(I~IV) 최적 배치

일반적으로 도체루프의 설치 위치는 자계 저감 영역을 어디로 설정하느냐에 따라 달라지므로, 본 논문에서는 <그림 2.3>의 x축 방향으로 30m 거리의 영역에 지상 0~60m 높이의 영역에 대해 도체루프의 직렬 리액턴스를

최적으로 보상하는 경우와 보상하지 않는 2개 조건을 추가적으로 조합하여 사례A-사례B의 2가지 사례를 검토하였다. 각 사례에서 <표 2.2>의 4가지 도체루프 모델(I형~IV형)을 고려함으로써 세부적으로는 8가지 사례에 대한 연구를 수행하였다. <표 2.3>는 사례별로 세부적으로 나타내었다.

| 검토 사례 | 자계 저감 범위[m]              | 리액턴스 보상 여부 | 표기               |
|-------|--------------------------|------------|------------------|
| 사례 A  | $x=30, 0 \leq y \leq 60$ | ×          | A-I, II, III, IV |
| 사례 B  | $x=30, 0 \leq y \leq 60$ | ○          | B-I, II, III, IV |

<표 2.3> 검토 사례

한편, 2가지 자계 저감 영역에 따라 사례A과 B은 목적 함수로서 식(2.2)를 선택하였다.

각 사례에서 도체루프는 실용상 대지와의 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 2.4>과 같은 파라미터를 사용하였다.

| 개체수  | 교배 확률 | 돌연변이 확률 | 최대 세대수 |
|------|-------|---------|--------|
| 200개 | 80%   | 1%      | 100세대  |

<표 2.4> 최적화에 사용된 유전 알고리즘 관련 파라미터

### 2.2.3 최적 위치 선정 결과

각 사례별 도체루프 모델의 최적 위치 선정 결과를 그때의 유도전류와 함께 <표 2.5>에 정리하였다.

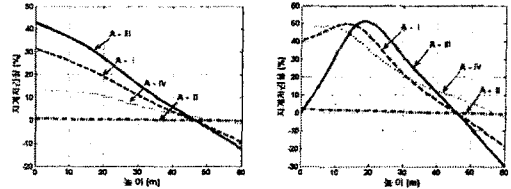
| 사례    | 최 도체의 좌표 (x, y) [m] | 각 도체의 전류 (크기, 위상각) [A] | 리액턴스 보상(%) |
|-------|---------------------|------------------------|------------|
| A-I   | -12.2219, 19.7654   | 257.6892 ∠ -23.8775°   | -          |
|       | 12.2219, 19.7654    | 257.6892 ∠ 156.1225°   |            |
| A-II  | 0, 10.0000          | 51.2617 ∠ 153.3516°    | -          |
|       | 0, 10.0000          | 51.7289 ∠ -15.2969°    |            |
| A-III | -15.0000, 19.1007   | 263.547 ∠ 166.998°     | -          |
|       | 15.0000, 19.1007    | 113.3598 ∠ -26.9471°   |            |
|       | -11.3734, 18.7488   | 113.3598 ∠ 153.0529°   |            |
|       | 11.3734, 18.7488    | 228.1134 ∠ -24.2132°   |            |
| A-IV  | 14.8221, 20.0000    | 228.1134 ∠ 155.7868°   | -          |
|       | 1.0000, 19.9804     | 69.0941 ∠ 153.9022°    |            |
|       | 1.0000, 19.9804     | 69.0941 ∠ -26.0978°    |            |
| B-I   | 15.0000, 17.2923    | 64.1024 ∠ 148.7958°    | 26.5885    |
|       | 1.0000, 13.3333     | 64.1024 ∠ -31.2042°    |            |
| B-II  | -15.0000, 15.0049   | 464.3635 ∠ -8.549°     | 31.8671    |
|       | 15.0000, 15.0049    | 464.3635 ∠ 171.451°    |            |
| B-III | 0, 10.0000          | 144.5411 ∠ 170.5829°   | 17.1065    |
|       | -1.0000, 20.0000    | 30.364 ∠ -100.5696°    |            |
|       | -1.0000, 20.0000    | 148.2925 ∠ 2.3957°     |            |
|       | -10.4565, 16.0997   | 502.1768 ∠ 16.0519°    |            |
| B-IV  | 10.4565, 16.0997    | 502.1768 ∠ -163.9481°  | 10.7527    |
|       | -15.0000, 11.7302   | 506.8145 ∠ -44.3992°   |            |
|       | 15.0000, 11.7302    | 506.8145 ∠ 135.6008°   |            |
| B-V   | 1.0000, 17.3118     | 307.451 ∠ 38.7017°     | 7.03812    |
|       | 11.4008, 18.8563    | 307.451 ∠ -141.2983°   |            |
|       | 1.0137, 19.0518     | 472.1316 ∠ -23.6612°   |            |
|       | 14.9589, 12.8837    | 472.1316 ∠ 156.3388°   |            |

<표 2.5> 사례별 최적위치 선정 결과

### 2.2.4 사례별 자계 저감을 비교

최적 위치 선정 결과를 바탕으로 각 사례별 자계 저감률을 다음과 같이 계산하여 그 결과를 <그림 2.4>에 나타내었다.

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



<그림 2.4> 각 사례별 자계 저감을 비교

<그림 2.4>을 살펴보면 선로 인근 영역의 자계저감을 목적으로 한 것이 아니라 선로 외곽의 어느 특정지역(30m)의 높이에 따른 자계저감을 목적으로 한 것으로 리액턴스를 보상하였을 경우 좀 더 만족스러운 저감률을 얻는것을 보인다. 또한 도체루프의 설치 가능범위를 확대할 수 있다면 자계 저감률을 더욱 향상시킬 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 수직 2회선 가공송전선로에서 발생하는 자계를 효과적으로 저감시키기 위한 다중선 다중 도체루프 모델을 검토하였다. 구체적으로, 다양한 도체루프의 자계저감 성능을 모의하기 위해 다중선 다중 도체루프에 유도되는 전류를 체계적으로 계산할 수 있는 수식을 유도했으며, 직렬 리액턴스 보상 여부에 따라 2가지 사례로 구분하고 각 사례별 4가지 도체루프 모델의 최적 설치 위치를 유전 알고리즘을 이용해 찾아내었다. 그것을 바탕으로 각 사례별 모델의 저감률을 계산해 비교하고, 이 과정을 실제 송전선 주변의 건물에서 실측한 데이터를 기반으로 비교 검토해 보았다. 만족할만한 저감률을 나타내지는 않았으나 검토한 4개 도체루프 모델 중에서 2선 도체루프 2개를 대칭 방향으로 설치하는 형태가 가장 효과적인 것으로 판단되었다. 검토된 사례는 송전선로 주변에 설치될 수 있는 도체루프들 중의 일부에 지나지 않을 때에 향후 설치 목적이나 여건 또는 송전선로 운전조건 등에 따라 다양한 도체루프의 여러 가지 적용 사례를 충분히 검토 하여 각각에 적합한 모델들을 찾아내고 얻어진 결과들을 세밀히 분석 종합하여 도체루프 모델들을 일반화시킬 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] W.T. Kaune, L.E. Zaffanella, "Analysis of Magnetic Fields produced far from Electric Power Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp.2082-2091, Oct. 1992.
- [2] J.E. Heneage, J.R. Ashley, "An EMF mitigation technology for power transmission lines", Southcon/94. Conference Record, pp. 468 - 473, Mar. 1994.
- [3] 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.
- [4] 김충형, 신명철, 최상일, "수동루프에 의한 송전선로 상부결형 발생에 관한 연구", 조명-설비학회 논문지 2003. Vol. 17, No. 6.
- [5] "송전선로 전자기 영향 연구", 한국전력연구원보고서, 1999
- [6] 진강규, "유전알고리즘과 그 응용", 교우사, 2000
- [7] 김충형, "송전선로의 전자기 저감을 위한 다중 도체루프의 최적 위치에 관한 연구", 성균관대학교 박사학위 논문, 2003.10
- [8] 김충형, 신명철, "송전선로에서 발생하는 자계 제약을 고려한 발전력의 최적 재분배" 전기학회논문지 50권 11호, 2001
- [9] 윤창대, 김충형, 신명철, 김정부, "자기장 기준조건을 고려한 송전선로의 전자기 저감 계산", 대한전기학회 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집 2003. P-55. pp254-256