

# 지자기 교란으로 인한 전력망 유도전기장 예상값 검증

## Verification on the Calculated Geoelectric Field on Power Grid during Geomagnetic Disturbances

박 성 원 · 유 충 현

Sung Won Park · Chung-hyun Yoo

### 요 약

태양흑점폭발로 인해 방출되는 코로나 물질은 지자기 교란을 일으킨다. 대규모 지자기 교란으로 인한 유도전류는 변압기 손상을 일으킬 수 있다. 이러한 유도전류를 산출하기 위해 먼저 유도전기장을 산출해야 한다. 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 산출방법은 정확도가 높으나, 1일 24시간 동안의 관측 데이터가 필요하다. 반면, 적분 공식을 적용한 유도전기장 산출방법은 실시간 데이터로 산출이 가능하나, 정확도 확인이 요구된다. 이 논문에서 적분 구간을 조정하여 푸리에 변환 방법의 결과값과 오차를 줄이고자 하였다. 그 결과, 적분 공식을 적용한 유도전기장 예상값은 푸리에 변환 방법의 예상값과 상관성이 높았으며, 적분 공식으로 산출한 유도전류 예상값은 유도전류 관측값과 시간 동기 및 방향이 일치하고, 그 크기가 오차 범위 1 A 이하에서 92 % 이상 일치함을 확인하였다.

### Abstract

Coronal mass ejection (CME) released due to solar flare explosion cause geomagnetic disturbance. The induced current by massive geomagnetic disturbance can cause damage to the transformer. The calculated geoelectric field is a major parameter of the geomagnetically induced current (GIC). The method applying a Fourier transform has a high accuracy but it needs all data measured for 24 hours. And the other method applying an integral equation can calculate in real time but it requires to check an accuracy. To reduce the gap between the calculated results of two methods, it adjusts the integration section. As a result, the correlation between two calculated geoelectric fields is high, and the event time and direction of the calculated current is the same as that of the measured current, and its accuracy rate is above 92 percent.

Key words: Coronal Mass Ejection, Geoelectric Field, Power Grid, Geomagnetically Induced Current

### I. 서 론

태양흑점폭발 등과 함께 방출되는 코로나 물질이 지구에 도달하면 지자기 교란을 일으킨다. 지자기 교란은 전파 두절, 태양입자 유입 등과 함께 우주전파재난을 일으키는 요인으로서, 이중 지자기 교란으로 발생한 유도 전

류는 국가 전력망의 장애를 일으킬 수 있다. 이에 국립전파연구원 우주전파센터에서는 우주전파재난에 대비한 여러 연구를 수행하고 있다. 이 논문에서는 지자기와 전력망 유도전류 분석 연구<sup>[1]</sup>의 일환으로 전력망 유도전류의 필수 파라미터인 유도전기장 예상값을 검증하고자 한다. 지자기 교란으로 인한 전력망 유도전기장은 1 Hz 이하

미래창조과학부 국립전파연구원 우주전파센터(Korean Space Weather Center, National Radio Research Agency)

· Manuscript received September 27, 2014 ; Revised November 4, 2014 ; Accepted November 5, 2014. (ID No. 20140927-07S)

· Corresponding Author: Sung Won Park (e-mail: sungwon@msip.go.kr)

의 주파수를 가지고 있어, 실제 자유공간상에서의 측정은 불가하므로 적분 공식을 적용한 유도전기장의 예상값과 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 예상값의 상관도를 비교한다. 그리고 적분 공식을 적용한 유도전기장으로 산출한 유도전류 예상값과 전력망에 흐르는 유도전류 관측값의 차이를 비교하여 실제 활용 가능 여부를 판단한다.

### 1-1 지자기 교란과 전력망 유도전류

지자기 교란은 지상에 설치된 장거리 송전선에 직류 성분에 준하는 전류를 유도시킨다. 이는 익히 알려진 맥스웰 방정식을 통해 자기장은 무한 직선의 전류로 변환할 수 있으며, 이를 지자기 유도전류(GIC: Geomagnetically Induced Current)로 그림 1과 같이 정의하고 있다<sup>[2]</sup>.

이러한 유도전류는 장거리 송전선의 종단인 변압기를 통해 접지로 흐르며, 유도전류의 크기와 지속시간에 따라 변압기 과열을 발생시켜 변압기 소손이나 정전 피해를 일으킬 수 있다.

과거 이러한 피해는 지자기 위도가 높은 국가인 캐나다, 영국, 미국 등에 주로 발생하였다. 하지만 지난 태양 활동 주기의 2003년에는 우리나라와 같이 지자기 위도가 중위도 국가인 남아프리카공화국에서 지자기 유도전류로 인한 변압기 15기가 소손되는 피해가 발생하였다<sup>[3]</sup>.

### 1-2 전력망 유도전류 관측소 운영

우주전파센터는 2012년 이후 한전 765 kV 초고압 변전

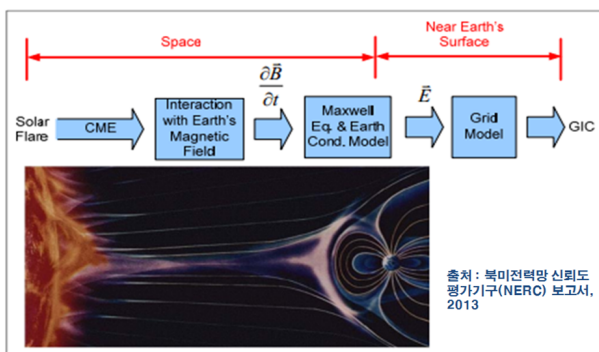


그림 1. 지자기 유도전류 발생 과정  
Fig. 1. The flow of GIC due to CME.

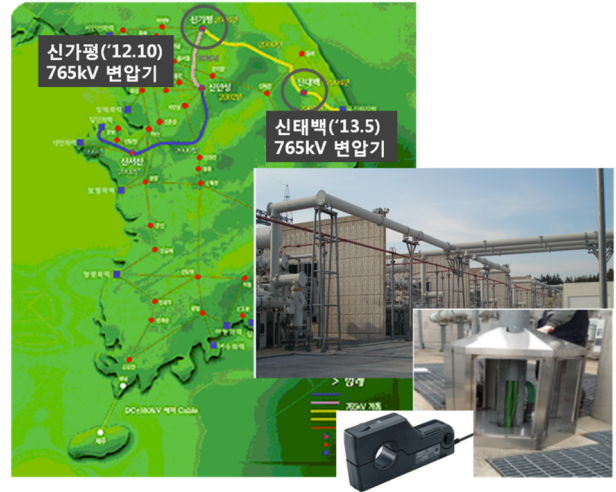


그림 2. 지자기 유도전류 관측소 위치  
Fig. 2. Locations of the GIC monitoring stations.

소 2곳에 전력망 유도전류 관측소를 설치하여 유도전류의 변화를 실시간 모니터링하고 있다. 이 전력망은 원전에서 전력을 생산하여 신태백 변전소를 통해 신가평 변전소로 보내고, 수도권으로 공급하는 체계이다.

## II. 전력망 유도전기장 산출 및 검증방법

### 2-1 전력망 유도전류와 유도전기장의 산출

전력망에 흐르는 지자기 유도전류는 식 (1)과 식 (2)를 통해 산출한다<sup>[4]</sup>. 먼저 식 (1)에서 지구 표면을 기준으로 수평 성분에 해당하는 유도전기장  $E_{x,y}(\omega)$ 는 지구 표면 임피던스  $Z(\omega)$ 와 지구 자기장  $B_{y,x}(\omega)$ 의 곱으로 산출한다.

$$E_{x,y}(\omega) = \pm \frac{Z(\omega)}{\mu_0} B_{y,x}(\omega) \quad (1)$$

여기서,  $Z(\omega)$ 는 주파수 함수의 표면 임피던스이고,  $\omega$ 는 각주파수,  $\mu_0$ 는 자유공간의 유전율이다.

그 다음, 전력망 네트워크 파라미터인 유도전류 상관계수  $a, b$ 와 유도전기장의 함수를 이용하여 지자기 유도전류를 식 (2)와 같이 산출한다.

$$GIC(t) = a * E_x(t) + b * E_y(t) \quad (2)$$

만일 유도전류를 관측할 수 있다면 식 (1)에서 산출한 유도전기장과의 상관관계 분석을 통해 유도전류 상관계수를 산출할 수 있다.

2.2 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장의 산출

남아공<sup>[3][4]</sup>, 스웨덴<sup>[5]</sup>은 식 (1)과 같이 푸리에 변환 방법을 적용하여 유도전기장을 산출하였다. 여기서 지구 자기장은 식 (3)과 같이 표현하며, 1일 24시간 동안 시간 함수의 지자기 관측 데이터를 푸리에 변환하여 주파수 함수의 자기장 성분으로 변환한다.

$$B(\omega) = \frac{1}{i\omega} \frac{d\bar{B}}{dt}(\omega) \tag{3}$$

캐나다<sup>[6]</sup>는 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장을 보다 정확하게 모델링하였다. 푸리에 변환으로 인한 오차를 줄이기 위해 1일 지자기 관측데이터에서 지자기 방향성을 볼 수 있도록 평균치를 제거하고, 시작 지점과 끝 지점이 0이 되도록 데이터 평준화 작업을 수행한 후, 시작 지점과 끝 지점이 부드럽게 이어지도록 가공한다.

2.3 적분 공식을 적용한 유도전기장의 산출

공간상으로 전파하는 전자기장은 푸리에 변환에서 적분 공식으로 변환하여 해석할 수 있고, 적분 공식은 이러한 개방 영역에서 전자기장을 표현하는 데 유용한 것으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

중국과 스페인은 푸리에 변환 방법이 아닌 평면파를 해석한 적분 공식을 적용하여 유도전기장을 산출하였다. 중국은 20분 간격의 지자기 데이터를 적분 구간에 적용하여 식 (4)와 같이 산출하였다<sup>[8]</sup>.

$$E_y(t) = - \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}} \sum_{n=N-M-1}^N \int_{T_{n-1}}^{T_n} \frac{g(u)}{\sqrt{T_N-u}} du \tag{4}$$

여기서,  $g(u) = (B_n - B_{n-1}) / (T_n - T_{n-1})$ 로 단위 시간당 자기장 크기의 차이인 미분값을 나타내고,  $T_N$ 은  $N$  번째 시간,  $\sigma$ 는 지면 도전율,  $M$ 은 시간간격이다.

스페인<sup>[9]</sup>은 30분 간격의 지자기 데이터를 적분 구간에 적용하여 식 (5)와 같이 산출하였다<sup>[9]</sup>.

$$E_{x,y}(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \frac{dB_{y,x}(u)}{dt} du \tag{5}$$

식 (4)와 식 (5)는 주파수 함수의 표면 임피던스 대신 자유공간의 유전율과 지면 도전율을 사용하고, 시간 함수의 지자기 관측값을 미분하여 충분히 길다고 판단되는 시간 간격으로 적분한 것이다.

반면, 이 논문에서는 시간 간격을 미리 설정하지 않고, 적분 공식을 적용한 유도전기장 예상값과 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 예상값의 차이가 가장 작게 나타나는 시간 간격을 적분 구간으로 선택한 것이다.

2.4 전력망 유도전기장의 산출방법의 장단점 비교

푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 산출방법은 정확한 유도전기장 산출이 가능하다는 것이 장점이다. 다만 1일 동안의 모든 지자기 데이터가 있어야 산출이 가능하므로 유도전기장을 실시간으로 산출하기 어렵다. 그리고 유도전류 상관계수는 지자기 교란이 발생한 날에 따라 상관계수가 다르게 계산되므로, 유도전류 예상값의 정확도가 매번 달라질 수 있다.

반면, 적분 공식을 적용한 유도전기장 산출방법은 실시간 지자기 관측 데이터로 유도전기장을 즉시 산출할 수 있어 신속성이 요구되는 우주전파재난 대응에 매우 유용하게 활용될 수 있다. 그리고 지자기 교란이 발생한 모든 시점에 적용할 수 있어, 한반도 공통의 유도전류 상관계수 산출이 가능하다. 하지만 정확도 제고를 위해 유도전기장 예상값 검증은 필수라 하겠다.

III. 전력망 유도전기장 산출 및 검증결과

이번 장에서는 푸리에 변환을 적용한 유도전기장 예상값과 적분 공식을 적용한 유도전기장 예상값을 상관도로 비교함으로써 유도전기장 예상값을 검증하고자 한다.

3.1 캐나다의 지자기 관측데이터

3.1.1 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 산출 결과

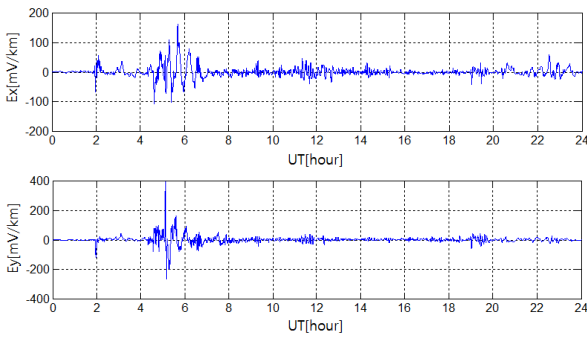


그림 3. 오타와의 지자기를 푸리에 변환으로 산출한 유도전기장 예상값

Fig. 3. The calculated geoelectric fields using a Fourier transform from the geomagnetic field at Ottawa.

2013년 지자기 교란이 가장 크게 발생한 10월 2일 캐나다 오타와에서 관측된 지자기 데이터와 오타와의 지면 임피던스를 사용하여 유도전기장  $E_{x,y}$  를 산출하였다. 그림 3은 UT시 기준으로 0시~24시 동안 변화되는 유도전기장을 나타낸 것이다. 유도전기장의 단위는 mV/km이다.

### 3-1-2 적분 공식을 적용한 유도전기장 산출결과

동일한 지자기 관측 데이터와 지면 임피던스를 적분 공식에 적용하여 유도전기장을 산출한 결과는 그림 4와 같다.

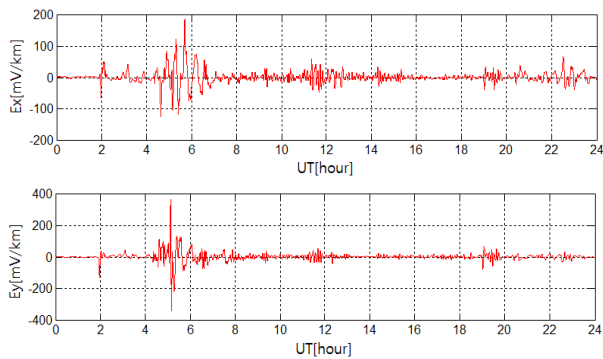


그림 4. 오타와의 지자기를 적분 공식으로 산출한 유도전기장 예상값

Fig. 4. The calculated geoelectric fields using a integral equation from the geomagnetic field at Ottawa.

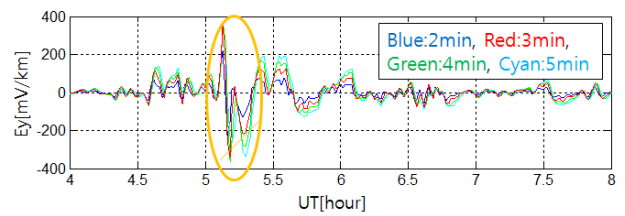


그림 5. 적분 구간에 따른 Y성분의 유도전기장 예상값  
Fig. 5. The Y components of the calculated geoelectric fields depending on integral period.

Y축 성분의 유도전기장에서 적분 구간인 시간 간격을 증가시키면 유도전기장 크기가 전체적으로 증가하는 데, 특정 시간 구간에서 유도전기장의 변화가 비선형적으로 증가하였다. 그림 5에서 보듯이, 적분 구간을 2분 내지 5분으로 증가할수록 UT시 05:20 유도전기장의 변화폭이 UT시 05:10 유도전기장의 변화폭보다 더 크게 증가한다. 즉, 적분 구간을 수 내지 수십 분 간격으로 충분히 증가시키면 푸리에 변환 방법의 결과와 전혀 다른 형태로 나타나게 된다.

적분 구간에 따른 유도전기장 비교를 통해 푸리에 변환 방법의 예상값과 가장 차이가 작은 적분 구간은 3분 간격임을 확인하였다.

### 3-1-3 유도전기장 예상값 비교 검증결과

X축 성분의 유도전기장 예상값들을 비교한 결과, 유도전기장  $E_x$  예상값은 시간 동기 및 (+, -) 방향이 일치하였다.

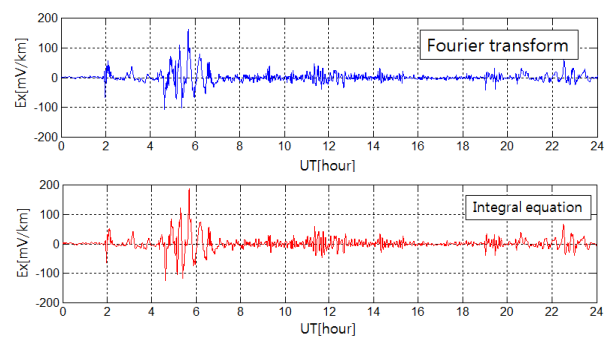


그림 6. X축 성분의 유도전기장 예상값 비교

Fig. 6. Comparison with the X components of the calculated geoelectric fields.

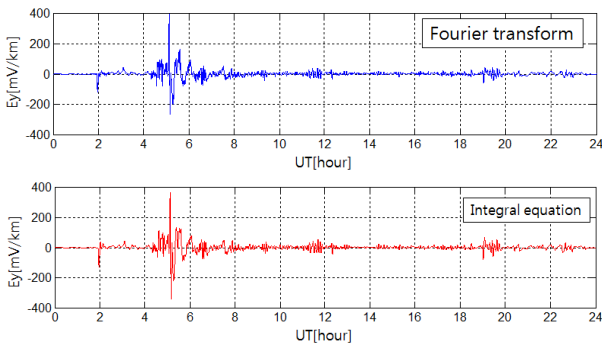


그림 7. Y축 성분의 유도전기장 예상값 비교  
Fig. 7. Comparison with the Y components of the calculated geoelectric fields.

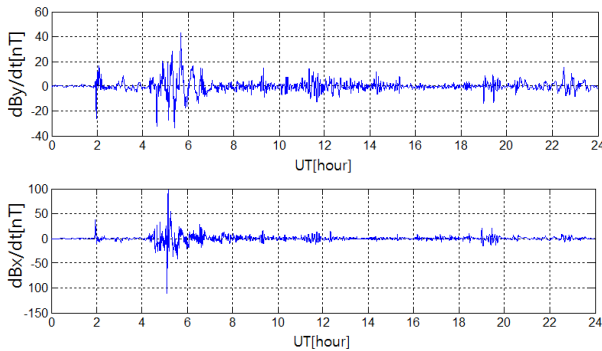


그림 8. 지자기의 X 성분과 Y 성분의 미분값  
Fig. 8. Differential of the X and Y components of the geomagnetic field.

그림 7에서 Y축 성분의 유도전기장 예상값들 역시 시간 동기 및 (+, -) 방향이 일치하였다. 식 (4)와 식 (5)에 따르면 지자기 미분값은 유도전기장

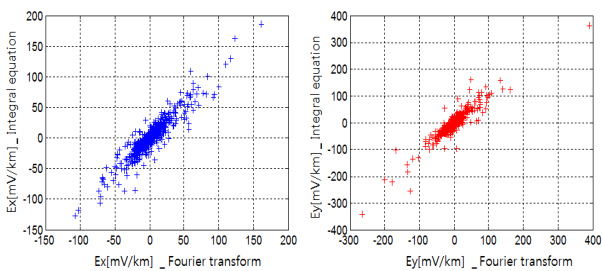


그림 9. 오타와 지자기로 계산된 유도전기장 예상값의 상관도  
Fig. 9. Correlation with the geoelectric fields calculated from the geomagnetic field at Ottawa.

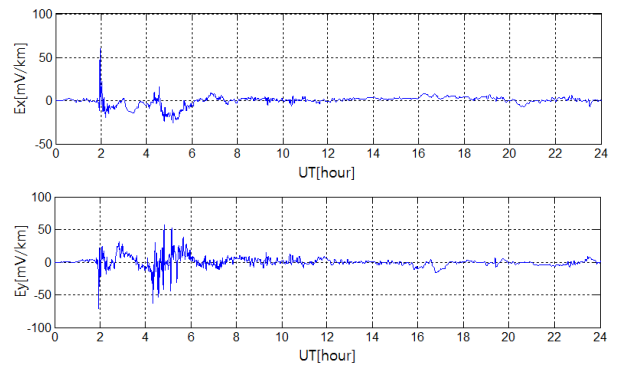


그림 10. 강릉 지자기를 푸리에 변환으로 산출한 유도전기장 예상값  
Fig. 10. The calculated geoelectric fields using a Fourier transform from the geomagnetic field measurements at Gangneung.

과 직접적인 연관성이 있다. 하지만 그림 8에서 Y축 성분의 지자기 미분값은 X축 성분의 유도전기장과 달리 (-) 방향에서 다수의 임펄스 성분을 포함하고 있었다.

X축 성분과 Y축 성분의 유도전기장 예상값은 두 방법간의 상관도는 그림 9에서 보듯이, 기울기가 1인 형태로 수렴하고 있어 유도전기장 예상값의 상관성이 높음을 알 수 있다.

### 3-2 우리나라의 지자기 관측데이터

#### 3-2-1 푸리에 변환 방법을 적용한 유도전기장 산출 결과

2013년 지자기 교란이 가장 크게 발생한 10월 2일 우리나라 강릉에서 관측한 지자기 데이터와 신가평의 지면 임피던스를 푸리에 변환 방법에 적용하여 유도전기장을 산출한 결과는 그림 10과 같다.

#### 3-2-2 적분 공식을 적용한 유도전기장 산출결과

그림 11은 동일한 지자기 관측 데이터와 지면 임피던스를 적분 공식에 적용하여 유도전기장을 산출하였다.

푸리에 변환 방법의 예상값과 가장 작은 차이가 시간 간격은 캐나다의 경우와 마찬가지로 3분 간격으로 나타났다, 이를 적분 구간으로 선택하였다.

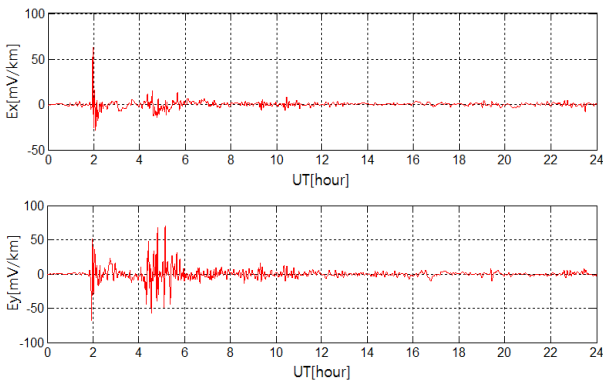


그림 11. 강릉 지자기를 적분 공식으로 산출한 유도전기장 예상값  
 Fig. 11. The calculated geoelectric fields using a integral equation from the geomagnetic field measurements at Gangneung.

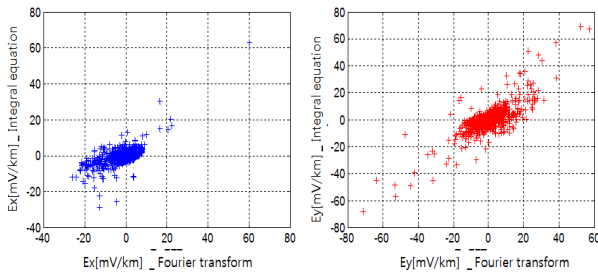


그림 12. 강릉 지자기로 계산된 유도전기장 예상값의 상관도  
 Fig. 12. Correlation with the geoelectric fields calculated from the geomagnetic field at Gangneung.

### 3-2-3 유도전기장 예상값 비교 검증결과

X축 성분과 Y축 성분의 유도전기장 예상값은 두 방법 간 상관도는 그림 12를 보듯이 기울기가 1인 형태에 수렴하고 있으며, 유도전기장 예상값의 상관성이 높음을 알 수 있다.

## IV. 시계열 예상값의 실시간 산출

적분 공식으로 유도전류 예상값을 산출한 다음 2013년 10월 2일 신가평 변전소에서 관측된 유도전류 관측값과 차이를 비교하였다.

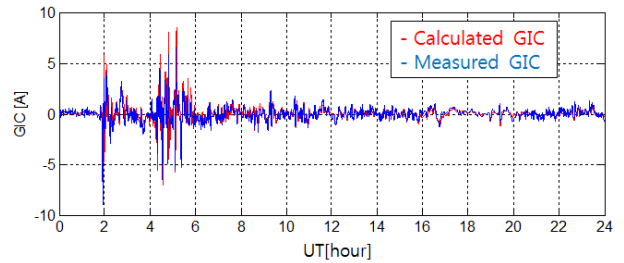


그림 13. 신가평 변전소의 유도전류 관측값과 예상값  
 Fig. 13. The measured and calculated GIC at Singapyeong substation.

그림 13에서 유도전류 예상값은 유도전류 관측값의 시간 동기 및 (+, -) 방향이 일치하고, 오차 범위 1 A 이하에서 92 %의 크기 정확도를 가짐을 확인하였다.

지자기 유도전류로 인한 전력망 피해에 대비하기 위해 유도전류 발생 시점을 즉시 파악하는 것이 가장 중요하다. 유도전류 예상값의 시간 동기가 관측값과 일치하고, 적분 공식으로 실시간 산출이 가능하므로 유도전류 발생 시점을 즉시 파악할 수 있다.

다음으로는 유도전류 크기의 정확도가 중요하다. 하지만 전력망 자체에서 유도전류가 종종 발생하고, 자연적 지자기 변화가 상존하므로 이러한 복합적인 현상을 100 % 정확하게 산출할 수 없다. 이 연구의 결과인 오차 범위 1 A 이하에서 92 % 크기의 정확도는 유도전류 발생 규모와 크기의 증가 여부를 충분히 인지할 수 있다. 따라서 유도전류 발생 이후 예상되는 변압기 온도 상승 등 우주전 파재난 대비 업무에 충분히 활용할 수 있다.

## V. 결론

태양흑점폭발로 인해 지자기가 급격하게 변하고, 우리나라에도 전력망 유도전류가 발생하고 있다. 지자기 교란으로 인해 전력망에 발생하는 유도전류를 보다 정확하고 신속하게 파악하는 것이 전력망 피해를 대비하는 핵심 요소라 하겠다.

이 논문에서 실시간 산출이 가능한 적분 공식의 유도전기장 예상값이 푸리에 변환 방법의 예상값과 상관성이 높고, 유도전류 예상값의 시간 동기가 관측값과 일치하고, 크기 정확도가 92 %임을 확인할 수 있었다.



유도전류 관측값에는 전력망 자체에서 발생한 불특정 크기의 전류를 일부 포함할 수 있어, 지자기 교란이 큰 1 일 동안의 지자기 데이터를 사용하는 푸리에 변환 방법은 유도전류 상관계수를 부정확하게 계산할 수 있다. 그러므로 지자기 교란이 발생한 모든 날의 데이터를 이용하여 한반도 공통의 유도전류 상관계수를 산출하는 것이 바람직하며, 이는 적분 공식을 적용한 유도전기장 산출방법으로 구현이 가능하다.

또한, 지자기 교란이 최대인 시점에 유도전류가 크게 발생하므로, 지자기 관측 데이터로 산출한 유도전류 예상 값을 실시간 유도전류 관측값과 비교함으로써, 지자기로 인한 유도전류 성분인지, 아니면 임펄스 잡음이나 전력망 자체 전류가 포함되어 있는지 확인이 가능해진다.

이 논문을 통해 지자기 교란으로 인해 발생하는 국가 전력망의 장애를 예방하여 통신장애, 금융장애 등 사회적 재난에 대비할 수 있기를 기대한다.

### References

[1] 박성원, 박성환, 김영윤, 유충현, "지자기와 국내전력망 유도전류 상관관계 분석 연구", 국립전파연구원 연구보고서, 2013년 12월.  
 [2] NERC, "Effects from geomagnetic disturbances on the bulk power system", *2012 Special Reliability Assessment Interim Report*, p. 6, 2012.  
 [3] Chigomezyo M. Ngwira, Antti Pulkkinen, Lee-Anne McKinnell, and Pierre J. Cilliers, "Improved modeling of

GIC in the South African power network", *Space Weather*, vol. 6, S11004, 2008.  
 [4] Chigomezyo M. Ngwira, Lee-Anne McKinnell, Pierre J. Cilliers, Ari Viljanen, and Risto Pirjola, "Limitations of the modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network", *Space Weather*, vol. 7, S10002, 2009.  
 [5] M. Wik, A. Viljanen, R. Pirjola, A. Pulkkinen, P. Wintoft, and H. Lundstedt, "Calculation of GIC in the 400 kV power grid in Southern Sweden", *Space Weather*, vol. 8, S07005, 2008.  
 [6] D. H. Boteler, R. Pirjola, "Modelling geomagnetically induced currents produced by realistic and uniform electric fields", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13. Issue 4, 1998.  
 [7] Hyo Joon Eom, "Integral transforms in electromagnetic formulation", *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 14, no. 3, pp. 273-277, Sep. 2014.  
 [8] Chun-Ming Liu, Lian-Guang Liu, Risto Pirjola, and Ze-Zhong Wang, "Calculation of geomagnetically induced currents in mid- to low-latitude power grids based on the plane wave method: A preliminary case study", *Space Weather*, vol. 7, S04005, 2009.  
 [9] J. Miquel Torta, Lluís Serrano, J. Ramon Regue, Albert M. Sanchez, and Elionor Roldan, "Geomagnetically induced currents in a power grid of northeastern Spain", *Space Weather*, vol. 10, S06002, 2012.

### 박 성 원



1997년 2월: 서울산업대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 경희대학교 정보통신망관리학과 (공학석사)  
 2003년 5월~2013년 11월: 국립전파연구원 공업연구사  
 2013년 11월~현재: 국립전파연구원 공업

연구관

[주 관심분야] 지자기, 유도전류, 전리층, HEMP 등

### 유 충 현



1999년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)  
 2001년 4월~현재: 국립전파연구원 주무관  
 [주 관심분야] 지자기, 전리층, 유도전류 등