

Geomagnetic Storms and Their Effects on Power Systems

지자기 폭풍과 전력계통

Soobae Kim

김수배

Professor, Department of Electric Engineering, Kyungpook National University, Korea

I. 서론

지자기 폭풍(Geomagnetic Storm)은 우주 기상의 영향으로 지구 자기장에 발생하는 일시적인 변화이다. 자기장의 변화는 패러데이 법칙에 따라 전력 계통에 대규모의 지자기 유도전류(Geomagnetic Induced Current, GIC)를 발생시키며, 높은 신뢰도가 요구되는 전력계통의 안정적인 운영에 큰 위협이 될 수 있다 [1]-[3]. 북미에서는 다수의 전력시스템 피해가 발생하였으며, 1989년 3월 지자기 폭풍으로 인한 캐나다 Hydro-Quebec 시스템 대정전은 지자기 폭풍에 의한 대표적인 피해 사례이다 [4]. 지자기 폭풍에 대한 우려는 대부분 고위도 지역에 위치한 전력망에 집중되었으나, 남아프리카공화국 전력망에서 발생한 변압기 소손 사고와 같이 저위도 지역에서도 영향이 관찰되고 있다 [5]. 더욱이 국내와 인접한 일본과 중국에서 보고된 지자기 폭풍으로 인한 전력설비들의 이상 현상들을 볼 때 국내 전력 계통이 지자기 폭풍으로부터 안전한 지역인 것으로 단정하기 어렵다 [6]-[8].

본 기고는 국내 전력 계통에 발생한 지자기 폭풍이 전력 설비에 미치는 영향과 안정적인 전력 공급의 유지 여부를 검토하기 위한 기술적 분석을 제공한다. 본 기고에서는 지자기 폭풍과 전력 계통과 관련한 국외 자료와 저자가 수행한 국내 전력계통의 영향성 평가 내용을 종합적으로 정리한다. 먼저 지자기 폭풍의 발생 과정과 전력 계통에 일어날 수 있는 문제점들에 대해 알아본다. 또한 지자기 폭풍으로 인한 국외 전력계통의 사고 사례들을 살펴본다. 그리고 북미신뢰도위원회(North American Electricity Reliability Council, NERC)에서 규정한 지자기 폭풍에 대비한 전력사의

위험도 평가 방안에 대해 정리한다. 지자기 폭풍의 국내 전력계통 영향성 분석을 위해 지난 20년간 측정된 지자기 데이터를 활용하여 유도된 전기장의 세기를 평가하며, 이를 바탕으로 국내 전력계통의 영향 검토 및 위험도 여부를 판단한다.

II. 지자기 폭풍의 발생과 전력계통 영향 [9]

태양폭풍이나 지자기 교란(Geomagnetic Disturbance, GMD)은 안정적 전력공급을 위해 높은 신뢰도가 요구되는 전력시스템에 영향을 주며, 장애를 일으킬 수 있다. 지자기 교란이 전력시스템에 영향을 미치는 과정은 Fig. 1에 나타나 있으며 다음과 같다. 태양 플레어는 태양 표면의 흑점이 폭발해 에너지를 분출하는 현상이다. 태양 플레어는 코로나 질량 방출(Coronal Mass Ejection, CME)을 동반하며 태양 물질을 지구로 방출하여 영향을 미치므로 태양폭풍이라고 한다. 태양폭풍이 발생한 후 일반적으로 1~4일 후에 태양풍의 충격파가 지구 자기장을 강타하여 지자기 폭풍을 유발한다. 지구의 자기권과 충돌해 지자기 폭풍을 일으키며 지구 자기장이 교란된다. 평균적으로 11년 태양주기 동안 200일 정도 강한 지자기 폭풍이 발생되며, 약 4일 정도는 최대 상태이다. 시간에 따라 변화되는 자기장은 패러데이 법칙에 따라 전기장을 발생시키며 전력시스템 내 도체 선로에 대규모 지자기 유도전류를 일으킨다. 1 Hz 이하의 Quasi-DC 특성을 보이는 지자기 유도전류는 변압기의 반주기 포화를 발생시키며, 이로 인해 전력시스템에 고조파 유입, 변압기 무효전력

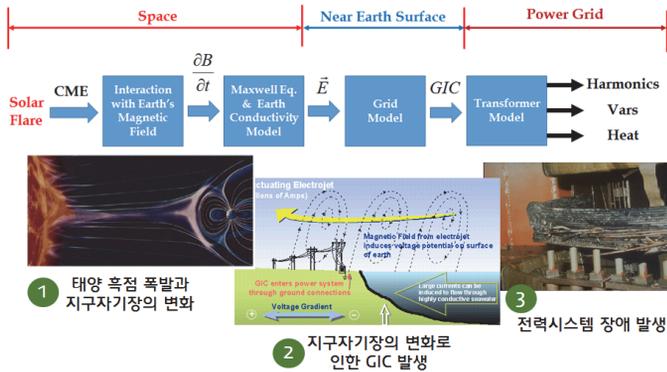


Fig. 1. 태양흑점 폭발이 전력시스템 영향을 미치는 과정[9].

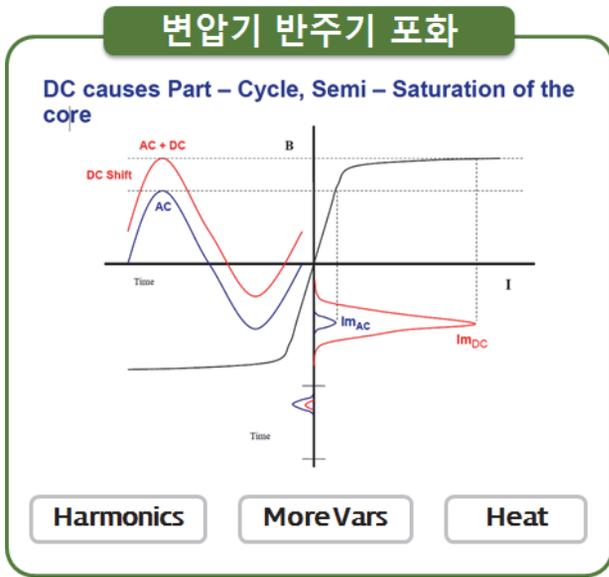


Fig. 2. 변압기 반주기 포화 현상 [9].

소비의 증가 및 변압기 과열현상을 일으켜 전력시스템 운영에 문제점을 발생시킬 수 있다.

전력용 변압기에 Quasi-DC의 지자기 유도전류가 추가되므로 변압기의 기존 AC 자속에 DC 자속이 더해지게 되며 Fig. 2에서 보인 것과 같이 변압기 자화 특성이 변화한다. 즉, 60 Hz AC 자속의 반주기 동안 포화(반주기 포화, half-cycle saturation)가 발생한다. 변압기 반주기 포화는 정현파 왜곡을 발생시켜 전력계통에 고조파를 유입시키고, 변압기 여자전류 최댓값이 증가되므로 과도한 무효전력 손실의 원인이 된다. 또한 증가된 와전류로 인한 권선과 구조체의 발열을 야기하여 결국 변압기 절연에 대한 스트레스원이 되며 수명 단축이나 영구 고장의 원인이 된다. 이러한 변압기 반주기 포화현상으로 발생하는 문제점들은 변압기 권선의 형식과 구조 등에 영향을 받는다.

지자기 폭풍이 전력시스템에 미치는 영향은 지자기 유도전류의 발생으로 인한 변압기 반주기 포화현상으로부터 발생된다. 반주기 포화 현상으로 인한 문제점은 Fig. 3과 같이 전력계통 설비 영향과 시스템 전체적으로 미치는 영향으

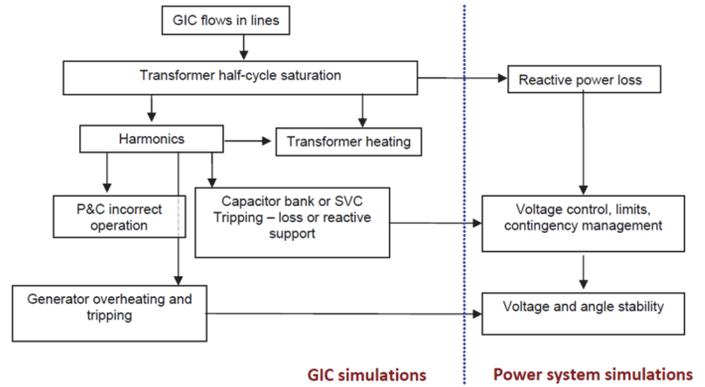


Fig. 3. 전력시스템에 GIC의 영향 [9].

로 구분될 수 있다. 먼저 유입된 고조파는 전력계통의 보호 및 제어 설비의 오동작을 일으켜 Capacitor bank 혹은 SVC(Static Var Compensator, 정지형 무효전력 보상장치)와 같은 무효전력 보상설비들이 손실될 수 있다. 또한 발전기 회전자와 변압기 과열 현상이 발생되어 트립될 수 있다. 다음으로 전력시스템 전체로는 변압기의 무효전력 소비가 증가하여 시스템 전체에서 무효전력의 부족 현상이 발생되므로 전압관리 및 전압안정도 문제를 일으킬 수 있다.

III. 국외 전력계통 지자기 폭풍 사고 사례

A. 캐나다 Hydro-Quebec 시스템 붕괴 [4][6][9]

1989년 3월 13일 2:44(EST, 북미 동부표준시간)에 발생한 강력한(지자기 강도 지표: K9) 지자기 폭풍으로 인해 캐나다 Hydro-Quebec 시스템에 대정전이 발생하였으며, 6백만명 이상이 9시간 동안 정전 피해를 경험했다. Hydro-Quebec 735 kV 송전망은 북부 퀘벡주에 있는 발전단지에서 남쪽의 몬트리올 등의 부하지역으로 1,000 km 이상의 장거리 송전선로를 통해 전력을 공급한다. 이렇게 광대한 장거리 선로에서 전압제어는 중요한 부분이며, 안정적인 전압제어를 위해 SVC와 분포리액터와 같은 보상설비의 활용이 필요하다. 하지만 발생한 강력한 지자기 폭풍으로 인해 7대의 SVC가 59초 동안 차단되어 무효전력 공급에 실패하면서 25초 후 시스템 전압이 붕괴되었다. Hydro-Quebec 시스템은 북미 동부 계통에 속하지 않은 독립적인 비동기식 시스템으로 운영되기 때문에 폭풍의 영향이 Hydro-Quebec에서 미국 동부지역으로 확산되지 않았다.

강력한 지자기 폭풍으로 발생한 대정전의 과정은 다음과 같다. 지자기 폭풍으로 유도된 지자기 유도전류는 변압기 반주기 포화현상을 일으켜 계통에 고조파들이 유입되었다. 발생한 고조파로 인해 보호계전기가 오동작하여 7대의 SVC가 탈락된 것이다. 무효전력 공급 장치의 손실로 큰 폭의 전압강하가 발생되었으며, 송전선로 보호용 거리계전기들이 연속적으로 트립되어 퀘벡 북쪽의 수력발전단지들이 계통에

서 분리되었다. 송전선로의 손실로 인해 더욱 큰 전압강하가 발생되었으며 9.5 GW 발전량이 차단되어 계통 주파수가 하락하였다. 전압과 주파수 불안정으로 인해 결국 Hydro-Quebec 시스템은 붕괴되었다. 발생한 정전은 고조파 유입으로 인한 7대의 SVC가 손실됨으로 발생한 전압 불안정에서 시작된 것이다.

B. 2003년 Halloween 폭풍 [9]

최근에 발생한 가장 큰 폭풍은 태양주기 23이며, 1996년 5월에 시작되어 2000년 4월에 최고점에 도달했다. 17건의 태양폭풍이 2003년 10월 19일과 2003년 11월 5일 사이에 발생하였으며, 이는 2003년 Halloween 태양 폭풍으로 불린다. 태양폭풍으로 인한 영향은 전력시스템을 비롯한 다양한 영역에서 관측되었다. 전자기기의 오동작, 우주선 운영의 장애 등이 많이 보고되었으며, 우주 공간 탐사 임무와 인공위성에도 영향을 미쳤다. 통신시스템 장애와 고위도 지역에서 방사선 노출에 대한 우려로 항공기 노선과 스케줄도 많이 변경되었다.

북미 전력계통에서는 변압기가 대규모 지자기 유도전류로 인해 과열현상이 발생하였으며 유입된 고조파로 인해 다수의 무효전력 공급장치들이 차단되었다. 북유럽에서는 더욱 큰 피해들이 보고되었으며, 2003년 10월 30일에 스웨덴의 남쪽 전력망의 3상 대형 전력용 변압기에 330 A 수준의 지자기 유도전류가 유도되었다. 고조파 유입은 계전기의 오동작을 일으켜 130 kV 선로를 차단하였으며, 20~50분 간의 정전이 발생되었다.

C. 남아프리카공화국 Eskom 변압기 소손 [5][9]

남아프리카 공화국 Eskom 전력망은 2003년 10월 29일~31일의 기간 동안의 지자기 폭풍으로 14대의 대형 400 kV 변압기의 손실이 발생하였다. Fig. 4는 소손된 변압기를 보여주고 있다. 이후 2003년 11월 17일 지자기 폭풍으로 변압기의 유중 가스 레벨이 급격히 상승하였으며, Lethabo 발전소의 변압기가 보호 계전기를 트립시켰다. 또한 11월 20일과 23일에 발생한 폭풍 때에도 보호 계전기 트립이 발생하였으며, 2004년 1월 19일에는 변압기 1대가 운전중지되었다. 이외에도 2004년 6월과 11월에도 변압기와 관련한 보호계전기들에 문제점들이 보고되었다.

D. 일본과 중국 [6]-[8]

일본에서는 2001년 11월 6일 발생한 지자기폭풍으로 일본 남부의 전력망(지자기 위도 26°)의 대부분의 선로에서 지자기 유도전류가 확인되었다. 지자기교란의 강도가 고위도 지역에 비해 약하지만, 상대적으로 큰 지자기 유도전류가 발생할 수 있음을 보여주는 사례이다.

중국의 경우 장거리 송전선로의 건설이 증가함에 따라

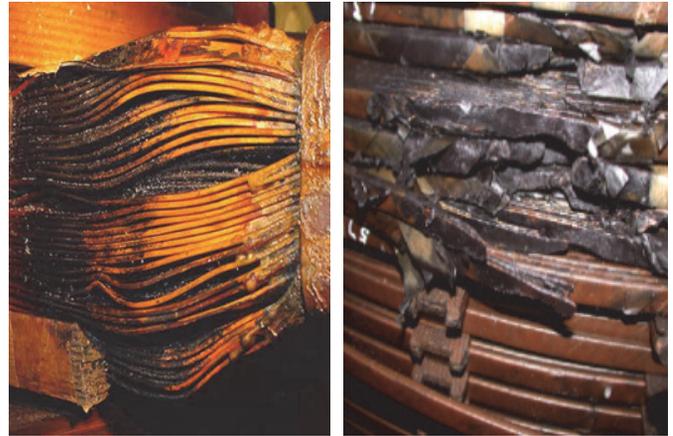


Fig. 4. 전력시스템에 지자기 유도전류의 영향 [9].

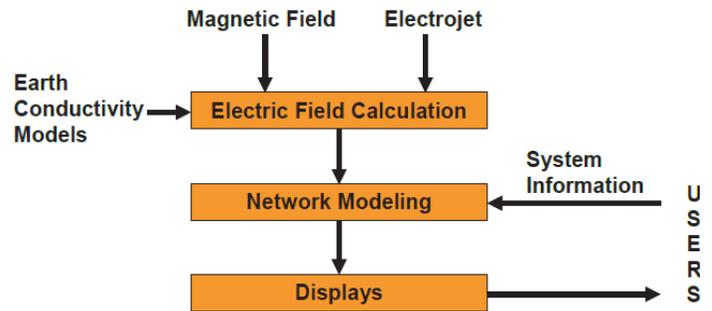


Fig. 5. 지자기 유도전류 해석 과정 [9].

지자기 폭풍으로 인한 다수의 이벤트들이 발생하였다. 2001년 3월부터 2002년 10월에 걸쳐 광둥지역 Yanhuai 송전망의 Shanghe 변전소 내(지자기 위도 23.7°) 변압기에서 비정상적인 노이즈와 심각한 진동이 발생되었다. 이후 2004년부터 광둥전력에서 변압기 중성점 전류를 측정하여 지자기 폭풍으로 인한 전력망의 영향도를 파악하고자 노력하고 있다.

IV. 지자기 유도전류의 계산

지자기 유도전류의 계산은 Fig. 5에 보인 것과 같이 두 단계의 과정이 필요하다. 먼저 지자기장(Geomagnetic field)과 대지저항 모델(Earth conductivity model)을 이용하여 지전기장(Geoelectric field)을 계산을 한다. 이후 DC 등가회로로 표현된 전력계통의 회로해석으로 지자기 유도전류를 계산할 수 있다. 지자기 유도전류 해석 결과는 전력시스템 조류해석(Power flow analysis)과 변압기의 열 해석 등의 입력 데이터로 활용될 수 있다. 본 장에서는 지자기 유도전류 계산을 위한 전반적인 과정에 대해서 간략히 정리하고 있으며, 구체적인 세부사항은 참고문헌 [9][10]에서 확인할 수 있다.

A. 지전기장의 계산

지자기 유도전류와 관련된 주파수 범위(0.001~1 Hz)와

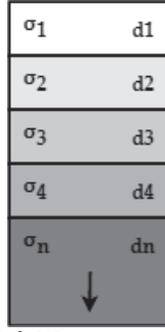


Fig. 6. 1-D 계층의 전도도 모델 [9].

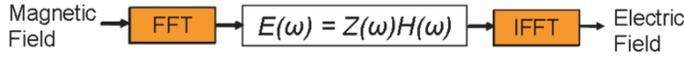


Fig. 7. 지전기장 계산의 방법 [9].

지구내부의 대지전도도를 고려할 때, 지자기장의 변화는 지구 표면 아래로 수 천 km 수준까지 통과할 수 있다. 그러므로 지전기장의 계산을 위해서는 지표에서부터 맨틀 수준까지의 대지 전도도의 정보가 반드시 고려되어야 한다. 더불어 지전기장의 계산에서 지구 대지저항의 주파수에 따른 영향이 고려되어야 한다. 주파수와와의 상관관계를 고려하는 방법은 지자기장의 변화를 주파수 별로 분해하고 해당 주파수에서 대지저항 값과 곱하여 해석되며 이를 시간에 따른 전기장의 변화로 해석한다. 지자기장, 대지저항과 이로 인해 발생하는 지전기장의 상관관계는 Eq. (1)~(3)과 같다.

$$E_x(\omega) = Z(\omega)H_y(\omega) \quad (1)$$

$$E_y(\omega) = -Z(\omega)H_x(\omega) \quad (2)$$

$$B(\omega) = \mu_0 H(\omega) \quad (3)$$

여기서

- $E_x(\omega)$: Northward geoelectric field (V/m)
- $E_y(\omega)$: Eastward geoelectric field (V/m)
- $H_x(\omega)$: Northward geomagnetic field intensity (A/m)
- $H_y(\omega)$: Eastward geomagnetic field intensity (A/m)
- $Z(\omega)$: Earth surface impedance (Ω)
- $B(\omega)$: Geomagnetic field density (Tesla)
- μ_0 : Magnetic permeability of free space(H/m)

대지 저항(Surface impedance, $Z(\omega)$)은 전력시스템 아래에 존재하는 대지전도도 구조와 관련된다. 깊이에 따른 전도도의 변화는 Fig. 6과 같이 1-D 계층모델로 표현될 수 있다. 1-D 계층 모델은 깊이에 따른 수직적인 전도도의 변화만을 고려한다. 측면 방향으로 전도도 변화는 고려하지 않지만, 일반적으로 적합한 결과를 제공하는 모델로 고려된다. 1-D 계층모델 도전을 정보를 활용하여 대지저항 값을 Eq.

(4)~(7)을 활용하여 가장 깊은 계층부터 지구 표면까지 반복 계산함으로써 얻을 수 있다.

$$Z_n = j\omega\mu_0 \frac{1 - r_n e^{-2k_n d_n}}{k_n(1 + r_n e^{-2k_n d_n})} \quad (4)$$

$$r_n = \frac{1 - k_n \frac{Z_{n+1}}{j\omega\mu_0}}{1 + k_n \frac{Z_{n+1}}{j\omega\mu_0}} \quad (5)$$

$$Z_n = \frac{j\omega\mu_0}{k_n} \quad (6)$$

$$k_n = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_n} \quad (7)$$

여기서

- ω : Angular frequency (rad/sec)
- σ_n : Conductivity of layer n ($1/\Omega\text{m}$)
- d_n : Thickness of layer n (m)
- k_n : Propagation constant
- r_n : Reflection coefficient

지전기장의 계산을 위해서는 일반적으로 Fig. 7과 같은 주파수 도메인에서의 기법이 활용된다. 지자기장의 시계열 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)을 통해 지자기장의 주파수 스펙트럼을 얻는다. 각 주파수별 지자기장의 값을 해당 주파수 지표 임피던스 값과 곱하여 해당 주파수의 지전기장 값을 구한다. 이를 통해 모든 주파수 대역에서 지전기장의 값을 구한 후 IFFT(Inverse Fourier Transform)를 이용하여 모든 주파수 대역의 지전기장 값을 시계열 전기장 값으로 변환한다.

B. 지자기 유도전류의 계산

지자기 유도전류의 Quasi-DC 특성으로 인해 지자기 유도전류 계산을 위해서는 전력시스템의 DC 등가모델이 필요하며, 이를 위해서는 여러 정보가 필요하다. 조류해석에 사용되는 AC 계통 모델, 계통 내 설비들의 저항 데이터들이 일차적으로 요구되며, 추가로 변전소의 지리정보인 위도 및 경도, 변전소 접지 저항, 변압기와 Shunt 기기의 권선 저항 등이다. 발전기는 송전망과 일반적으로 델타로 연계되므로 직류적으로 절연되어 해석에서 제외된다.

자속밀도가 변함에 따라 유도전계가 발생하게 되고 각 전송 선로에 지자기 유도전류가 나타난다. 유도전류의 크기는 송전선로의 길이 및 전기장의 방향에 따른 송전선로의 경로에 따라 변화하게 된다. 지자기 유도전류는 송전 선로에 유도된 Eq. (8)과 같은 DC 전압 원을 모델링하여 계산되며, 여기서 \vec{E} 는 전기장을 나타내고, \vec{dl} 은 송전선로의 방향을 나타낸다.

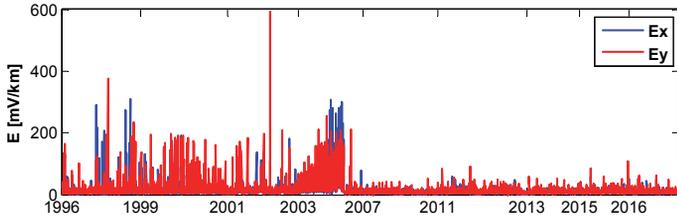


Fig. 8. 이천 관측소 일일 전기장 최댓값(1996년~2016년) [12].

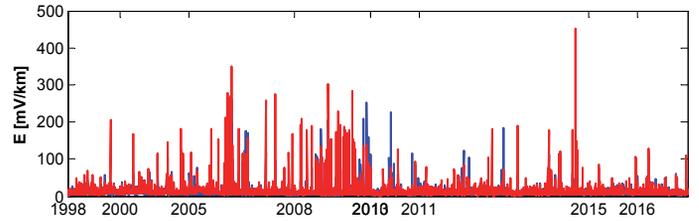


Fig. 10. 제주 관측소 일일 전기장 최댓값(1998년~2016년) [12]

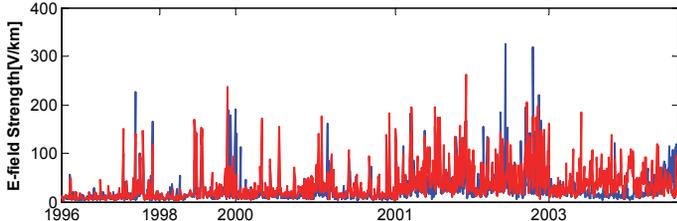


Fig. 9. 용인 관측소 일일 전기장 최댓값(1996년~2007년) [12].

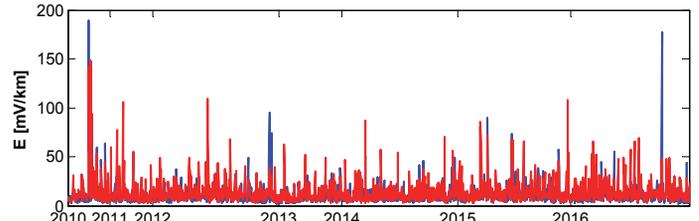


Fig. 11. 강릉 관측소 일일 전기장 최댓값(2010년~2016년) [12].

$$V_{dc}(AB) = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

전기장이 전력시스템 내에서 균일하다고 가정하였을 때, Eq. (8)은 Eq. (9)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$V_{dc}(AB) = L_{AB}(E_x \sin \theta + E_y \cos \theta) \quad (9)$$

여기서

- L_{AB} : 노드 A와 B 사이의 거리
- E_x : Northward geoelectric field
- E_y : Eastward geoelectric field
- θ : Angle between the line connecting the nodes and the y -axis

다음으로 지자기 유도전류는 Eq. (10)과 같이 표현된 DC 네트워크 방정식의 풀이를 통해 계산된다.

$$\vec{I} = \vec{G}\vec{V} \quad (10)$$

C. 변압기 무효전력 손실의 계산 [11][12]

지자기 유도전류가 계산된 후 변압기 반주기 포화현상으로 발생하는 추가적인 무효전력 손실량이 계산된다. 무효전력 손실량은 변압기 단자전압과 지자기 유도전류 전류량 및 변압기 구조에 따른 변수(K_r)에 의해 결정되며, Eq. (11)과 같다 [13].

$$Q_{GIC} = K_r V_{pu} I_{GIC} \quad (11)$$

변압기에서 발생하는 추가적인 무효전력 손실은 계통 조류해석에 포함되어 계통의 정적 상태변화를 확인할 수 있

다. 더욱이 추가적인 무효전력 손실로 인한 과도안정도 측면에서의 영향성 평가 또한 가능하다 [14].

V. 지자기 폭풍에 의한 국내 유도 전기장 분석 [12]

국립전파연구원 우주전파센터는 지구자기장의 관측을 통하여 통신위성에 미치는 우주전파환경을 연구하기 위하여 1996년 8월부터 이천 및 용인에 연속 관측시스템을 운영하고 있다. 2007년에는 제주도 지역에 관측설비를 추가로 설치하였으며, 이후 2010년 7월에는 용인 시스템을 강릉으로 이전하여 운용 중에 있다. 이를 통해 한반도 지역에서의 위도별 지구자기장 변화를 실시간으로 모니터링 하고 지자기 실측 데이터를 온라인으로 제공하고 있다 [15]. 국내에서 발생된 최대 지전기장 수준을 파악하기 위해 1996부터 지자기장 데이터를 입력하여 관측소별 일일 지전기장의 계산을 수행하였다. Fig. 8~11은 관측소 위치에 따른 일별 최댓값을 보여준다. 특정 관측소에서는 지자기 장비 장애나 점검 및 수리로 인해 데이터가 부재한 경우와 부적절한 데이터가 파악되었으며, 오류로 판단되는 데이터는 제거하여 지전기장 계산을 진행하였다. 최대 전기장 세기의 계산을 위해 요구되는 국내 대지저항 정보는 참고문헌 [12]에서 확인할 수 있다.

국내에 지자기 폭풍이 발생하는 경우 모든 관측 지역에서 해당 이벤트가 동일한 패턴으로 확인되어야 할 것이다. 하지만 앞서 분석한 4곳의 관측소 위치에서 최대 유도전기장의 세기는 모두 다른 일자에 발생된 것으로 확인되었다. 지전기장의 계산에 있어 오류로 판단되는 많은 데이터들이 제거되었지만, 여전히 많은 부분에서 데이터 오류가 존재하는 것으로 판단된다. 지난 20여 년간 국내에서 유도된 최대 지전기장은 2001년 12월 24일에 이천관측소에서 측정된

Table 1. 위도에 따른 지전기장 보정계수(α) [18]

지자기 위도(°)	보정계수(α)
≤ 40	0.1
45	0.2
50	0.3
54	0.5
57	0.7
59	0.9
≥ 60	1.0

Table 2. 분석 대상 국내 전력계통 정보

구분	개수	유효전력 [MW]	무효전력 [Mvar]
발전기	411	83,652.2	19,450.1
부하	1328	82,427.7	27,572.7
Switched Shunts	573		15,091.3
모선(버스)	2294		
변압기	687		
송전선로	2503		

0.6 V/km (E_x : 107.9 mV/km, E_y : 591.4 mV/km) 수준일 것으로 추측된다.

VI. 북미 지자기 폭풍의 영향 평가 방안

미연방에너지기구인 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)에서는 지자기 폭풍에 대비한 전력사의 위험도 분석 및 적절한 대응방안을 규정한 「지자기 폭풍을 위한 송전시스템 성능 계획(Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance, TPL-007-1)」을 2016년 9월 22일에 승인하였다 [16]. TPL-007-1은 북미 전력사들이 지자기 교란의 발생으로 인한 송전시스템의 취약점을 평가하도록 명시하고 있으며, 지자기 교란으로 인해 송전시스템 요구조건이 만족되지 못할 경우 해당 전력사는 성능 요구조건을 달성하기 위한 계획을 마련하도록 규정하고 있다. TPL-007-1은 송전시스템 취약성 평가를 위한 전기장의 세기를 8 V/km 기준으로 정하고 있으며 성능 요구조건은 변압기 중성점 유도전류의 크기가 225 A(75 A/phase) 미만으로 명시하고 있다. 추가적으로 FREC의 요청으로 북미 신뢰도위원회에서는 특정지역에 전기장의 강도가 증가되는 경우를 고려하여 강화된 기능 요구조건을 제시하는 TPL-007-2을 수립하였으며 2018년에 승인되었다. 개정된 요건에서는 일부 지역에서 12 V/km 전기장의 발생한 것을 고려하고 있으며 증가된 전기장에서 송전 시스템의 성능 요구조건을 255 A(85 A/phase)로 수정한 것이 주요 내용이다 [17].

A. 기준 전기장 크기 [18]

TPL-007-1에서 기준 전기장의 크기는 Plane wave 전자

Table 3. 국내 전력계통 무효전력 소비 증가량 분석

전기장 방향 [°]	1.2V/km 전기장에서 무효전력 소비 증가량 [Mvar]	6V/km 전기장에서 무효전력 소비 증가량 [Mvar]	비고
0	961.4	4,807.1	
26	883.6	4,417.7	최소 무효전력 증가
114	1,145.5	5,727.4	최대 무효전력 증가

기 모델, 북유럽 지자기 관측소로부터의 측정데이터 그리고 Quebec 대지저항 모델을 활용하여 통계적인 기법으로 결정되었다. 기준 전기장의 크기는 지자기 위도 60° 위치에서 최대 지전기장의 크기가 8 V/km이며, 다양한 전기장의 방향성이 고려되어야 한다. 기준g 전기장 세기가 발생하는 주기는 대략 100년에 한번 발생할 수 있는 최댓값으로 고려된다.

B. 기준 전기장 크기의 보정계수 [18]

앞서 설명한 기준 전기장의 크기는 지자기 위도 60° 및 Quebec 대지저항 모델을 활용하여 선정된 값이다. 지역에 따른 지자기 위도의 차이와 대지 전도도 모델의 차이로 인해 전기장의 세기가 변화하며, Eq. (12)와 같이 보정된다. 지자기 위도에 따른 보정계수 α 는 Table 1에 확인할 수 있다.

$$E_{peak} = 8 \times \alpha \times \beta \text{ (V/km)} \quad (12)$$

여기서

α : Scaling factor for Geomagnetic latitude

β : Scaling factor for local earth conductivity structure

대지저항 모델과 관련한 보정계수(β)와 관련하여 국내 대부분의 지역에서 대지저항 모델이 정의되어 있지 않으므로 적절한 β 보정계수를 설정하는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 분석에서는 지자기 폭풍으로 인한 국내 전력계통 영향 평가를 위해 보수적으로 최대 지전기장의 세기를 도출하는 β 보정계수가 1인 것으로 가정하였다.

VII. 지자기 폭풍에 의한 국내 전력계통 위험도 분석

국내 전력계통에서의 위험도 평가는 2016년도 최대 부하 케이스를 대상으로 진행하였으며 계통의 정보는 Table 2 과 같다. TPL-007-2에서 기준으로 제시된 12 V/km 수준의 전기장을 고려하여 평가가 진행되었다. 다만 지자기 위도가 30° 수준인 국내의 지리적 위치를 고려하여 Table 1에 제시된 위도에 따른 지전기장 보정계수(α) 0.1이 고려되었다. 즉, 위험도 분석은 1.2 V/km 수준의 전기장이 국내 전력계통에 발생되었을 상황을 가정하고 있다.

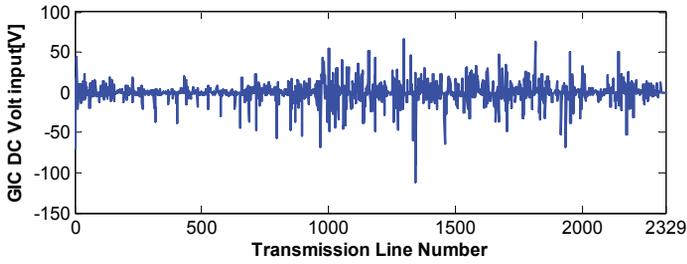


Fig. 12. 송전선로에 유기된 DC 전압 [12].

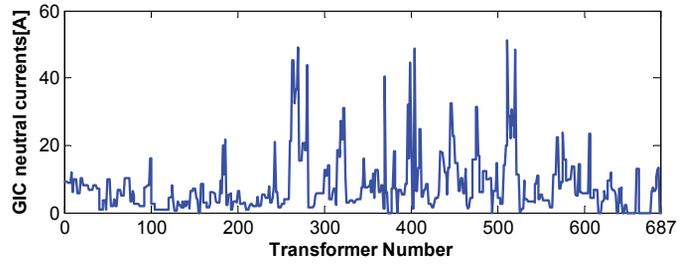


Fig. 14. 변압기 중성점 전류(A/phase) [12].

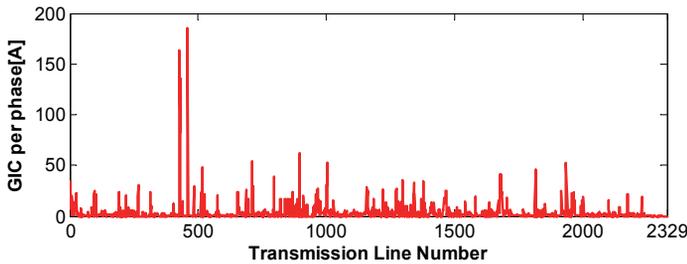


Fig. 13. 송전선로에 발생된 지자기 유도전류 [12].

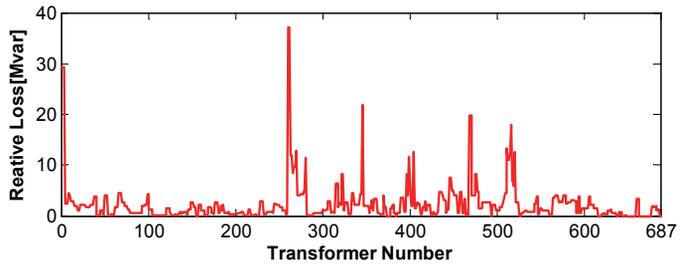


Fig. 15. 변압기 무효전력 손실.

국내 전력계통의 위험도 분석을 위해 지자기 유도전류와 변압기 무효전력 손실 계산을 수행하는 PowerWorld 시뮬레이터를 활용되었다. 또한 PowerWorld 시뮬레이터는 추가적인 변압기 무효전력 소비에 따른 조류해석을 수행하여, 계통에서 발생하는 전압의 변화를 파악할 수 있다.

지자기 유도전류 계산에 요구되는 DC 등가모델 구성을 위해서 계통 내 모든 버스와 변전소들의 위도 및 경도를 포함한 지리적 정보가 시뮬레이터에 입력되었다. 또한 한전의 변전소 설계지침에 따라 변전소 접지저항으로 1 Ω이 가정되었으며, 모든 변압기의 중성점 저항 값들은 무시되었다. 무효전력 손실 계산에 요구되는 K_r 상수와 관련하여, 765 kV와 345 kV 변압기는 단권변압기, 154 kV는 3상 5각 변압기로 구분되었다.

A. 지자기 유도전류 및 변압기 무효전력 손실 분석

북쪽(0°) 방향의 1.2 V/km의 전기장이 국내 전력계통에 발생할 경우, 송전 선로에 유기된 DC 전압의 크기, 송전선로에서의 지자기 유도전류, 변압기 중성점 전류 및 이에 따른 무효전력 손실이 계산되었으며, Fig. 12~15에서 확인할 수 있다. 먼저 Fig. 12는 송전선로들에 유기된 DC 전압의 크기이다. 다양한 수준의 DC 전압들이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이는 송전선로별 길이와 방향성의 차이로 인한 것이다. 최대 DC 전압은 93.36 km 송전선로에 유기된 111.85 V 수준이다. Fig. 13은 송전선로들에 유기된 지자기 유도전류의 절댓값을 보여주고 있으며, 최대치는 185.58 A이다. 또한 변압기 중성점에 발생하는 지자기 유도전류는 Fig. 14와 같으며, 최대 전류는 51.13 A/phase으로 원자력 발전소 한 곳의 승압용 변압기에서 확인되었다. Fig. 14에서 보듯이 국내 모든 변압기에서 TPL-007-2에서 제시한 85 A/phase 보다

작은 수준의 중성점 전류가 발생한다. Fig. 15에서는 변압기에서 발생된 추가적인 무효전력 소비를 확인할 수 있으며, 최대 무효전력 소비량은 37.16 Mvar이며, 765 kV 변압기 한 곳에서 발생된다.

지자기 폭풍으로 인한 전기장의 발생으로 각 변압기별 무효전력 손실이 증가하고 이는 국내 전력계통 전체에 무효전력 소비량을 증가시키게 된다. Table 3는 발생된 전기장의 크기(1.2 V/km, 6 V/km)에 따라 그리고 전기장의 방향성(0~360°) 변화에 따른 국내 전력계통에 추가되는 무효전력 손실량을 나타낸다. 전기장의 방향 0°는 북쪽 방향으로의 전기장을 의미하며 시계 방향으로 전기장의 방향이 증가한다. 국내 전력계통에 송전선로의 방향성에 따라 각 송전선로에 유도되는 DC 전압에 차이가 발생하며 이에 따른 유도전류량과 변압기 무효전력 소비량에도 차이가 발생하는 것이다. 전기장의 방향이 114°일 때 최대 무효전력 소비가 확인되었으며, 최소는 26°인 것으로 파악되었다. 전기장의 크기와 전기장의 방향성에 따른 무효전력 소비량의 증가분은 1.2 V/km 전기장에서 최대 1,145.5 Mvar 정도로 대상 전력계통의 무효전력 부하의 수준인 27,527 Mvar에 대비하여 작은 수준으로 전력계통 운영에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

B. 계통 전압변화 및 전압안정도 분석

전력계통에서 무효전력 소비의 변화는 계통 내 전압의 크기를 변화시킨다. 즉, 지역에서 무효전력을 공급하면 전압은 상승하며 반대로 무효전력 소비를 증가하면 계통 전압은 감소한다. 따라서 지자기 폭풍으로 발생된 전기장으로 인해 변압기의 무효전력 손실은 증가하며, 이는 계통 전체적으로 전압 크기를 감소시킨다. 국내 전력계통에서 각 변압기에서

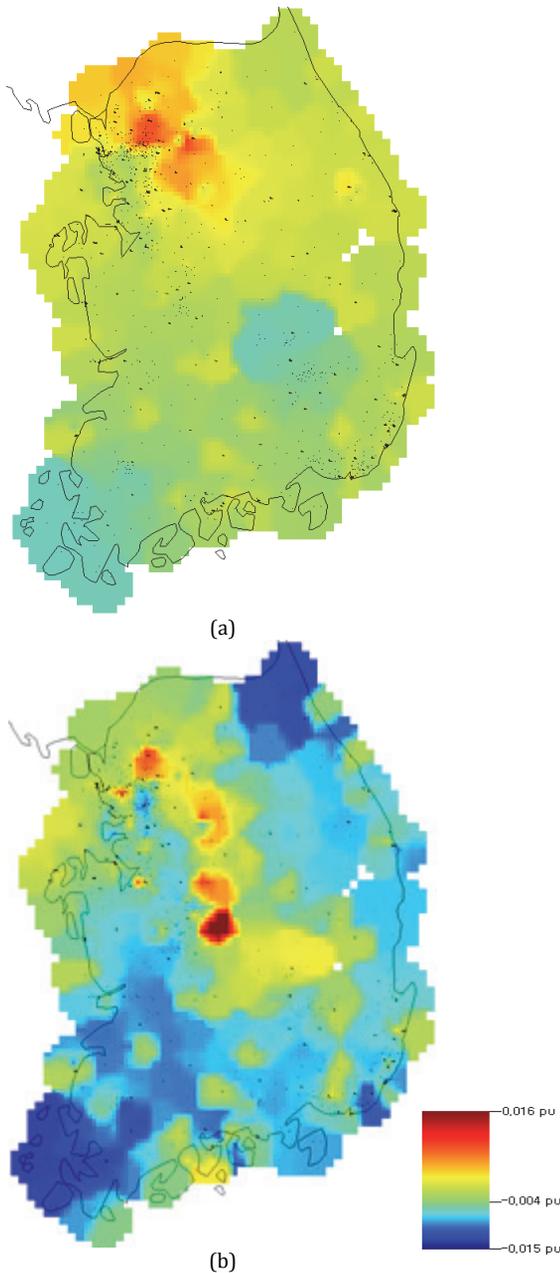


Fig. 16. 지자기 폭풍 발생 전후에 국내 계통 전압 크기의 차이 Contour 플롯[12]. (a) 1.2 V/km 전기장 인가 시. (b) 6 V/km 전기장 인가 시.

증가된 무효전력의 소비에 따른 시스템 전압의 변화를 분석하였다.

Fig. 16은 1.2 V/km와 6 V/km 전기장 발생 시 국내 전력계통 버스 전압의 크기를 Contour 플롯으로 표현한 것이다. 지자기 폭풍 발생 전과 후에 각 버스 전압크기의 차이를 Contour 플롯으로 도식화 한 것이다. Contour 플롯은 대규모의 정보를 한 번에 직관적으로 파악할 수 있는 장점을 가진다. Fig. 16에서 보듯 증가된 무효전력 소비로 인해 국내 계통의 전압의 변화가 나타난다. 하지만 변화된 전압의 크기는 1.2 V/km 전기장 인가 시 $-0.007 \sim 0.023$ p.u.이며, 6

V/km 전기장에 대해서는 $-0.015 \sim 0.018$ p.u. 수준으로 전압변화의 정도가 크지 않다. 이는 1.2 V/km 크기에 북쪽방향(0°) 전기장은 국내 전력계통에 961.4.9 Mvar 정도의 무효전력 소비를 증가시키며 27,527 Mvar 부하수준에 대비하여 추가되는 소비량이 매우 작기 때문이다. 시뮬레이션 상에서 특이한 점은 Fig. 16에서 붉은색으로 표시된 몇몇 지역에서 전압이 증가된 점이다. 이는 해당지역의 Switch Shunt에서 전압 유지를 위해 추가적으로 무효전력을 공급하는 것으로 확인되었다. 국내 전력계통에서 6 V/km 전기장의 크기는 지자기 위도 60° 에서의 기준 전기장 60 V/km 수준의 강력한 지자기 폭풍과 동일한 발생 확률을 가진다. 즉, 국내 전력계통에서 6 V/km가 발생할 확률은 극히 낮으며, 이러한 수준의 전기장이 발생하였을 경우에도 국내 전력계통은 전압 불안정 문제를 야기하지 않고 신뢰도 있는 전력계통 운영이 가능하다.

VIII. 결론

그간 지자기 폭풍은 국내 전력계통의 운영에 문제를 발생하지도 않았으며, 위협요소로 고려되지 않았다. 보고된 전력계통에서의 주요 사고들은 북미 혹은 북유럽지역에 한정되어왔다. 하지만 최근에 저위도 지역과 더욱이 중국과 일본의 전력계통에서 경험한 지자기 폭풍으로 인한 이상 현상들은 고려하면 국내 전력계통에서도 이러한 위협요소에 대한 분석과 대비가 필요하다. 본 기고에서는 국내 전력계통에 강력한 수준의 지자기 폭풍이 발생하였을 때 국내 전력계통의 취약성 분석의 결과를 제시하고 있다. 먼저 지난 20년간 국내에서 발생한 지자기장의 크기를 관측된 지자기장 데이터를 활용하여 계산하였으며, 최대 전기장의 세기는 2001년 12월 24일에 발생한 0.6 V/km 수준이다. 또한 북미 신뢰도위원회에서 제시된 기준전기장이 발생될 시 국내 전력계통에 유기되는 송전선로 DC 전압, 지자기 유도전류 및 변압기 무효전력 소비량의 증가에 대한 분석을 수행하였다. 1.2 V/km(지자기 위도 60° 지역에서는 12 V/km 수준)의 전기장이 발생하였을 경우에도 최대 변압기 중성점 전류의 크기가 51.13 A/phase로 요구되는 최대 기준 값인 85 A/phase보다 낮은 수준이다. 또한 변압기 무효전력 손실의 증가로 인한 국내 전력계통에서 발생하는 전체적인 전압 변화에 대한 분석을 수행하였다. 6 V/km 수준의 전기장을 유도하는 강력한 지자기 폭풍이 발생하였을 경우에도 국내 전력계통은 전압의 크기에 큰 변화를 일으키지 않았으며, 전압안정도 측면에서 안정적인 운영이 가능한 것으로 분석되었다.

지자기 폭풍과 같은 장애는 발생 확률이 매우 낮지만 전력계통 운영에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 국내 전력계통을 대상으로 지자기 폭풍의 위험도를 분석한 결과 다행

히 북미의 가이드라인을 만족하고 있으며, 추가적인 지자기 유도전류 감쇄방안이 필요해 보이지는 않는다. 하지만, 국내 전력시스템의 안정적인 운영을 위해 여전히 지자기 폭풍으로 발생될 수 있는 위험 요소들에 대한 지속적인 모니터링과 적절한 대응방안이 필요할 것이다. 이를 위해 우선되어야 할 부분은 지자기 유도전류 모니터링 설비의 구축이다. 불시에 발생하는 지자기 폭풍의 특성을 고려할 때 모니터링 시스템의 구축은 이로 발생하는 전력시스템의 영향성을 즉시 파악하여 대응할 수 있으며, 지속적으로 관측하여 데이터를 수집 할 수 있는 장점을 가진다. 한편에서는 지자기 폭풍에 대비한 지자기 장애 대응 절차를 마련하여 대비하고 있다. 수립된 절차서 또한 주기적인 지자기 폭풍에 의한 국내 전력시스템 위험도 평가의 과정을 통해 성능을 평가하고 절차를 조정하는 과정이 필요할 것이다.

REFERENCES

- [1] R. Pirjola, "Geomagnetically induced currents during magnetic storms," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, no. 6, pp. 1867-1873 2000.
- [2] J. G. Kappenman, "Geomagnetic Storms and Their Impact on Power Systems." *IEEE Power Engineering Review*, May 1996.
- [3] J. G. Kappenman and V. D. Albertson, "Bracing for the geomagnetic storms," *IEEE Spectrum*, vol. 27, no. 3, pp. 27-33 1990.
- [4] NERC report, March 13, 1989 Geomagnetic Disturbances.
- [5] C. T. Gaunt, G. Coetzee, "Transformer Failures in Regions Incorrectly Considered to Have Low GIC-Risk," *IEEE PowerTech 2007*, 99.807-812.
- [6] John Kappenman, "Geomagnetic storms and their impacts on the U.S. power grid", Metatech Corporation, January 2010.
- [7] Lian-Guang Liu, Wei-Li Wu and Kuan Zheng, "Preliminary estimate of GIC risk in China's future power grid due to geomagnetic disturbance," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-4.
- [8] L. G. Liu, C. M. Liu, B. Zhang, Z. Z. Wang and X. N. Xiao, "Strong magnetic storm's influence on China's Guangdong power grid," *Chinese 1. Geophysics*, vol. 51, pp. 976-981, 2008.
- [9] North American Electric Reliability Corporation, "2012 Special Reliability Assessment Interim Report: Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System," February 2012
- [10] NERC, "Application Guide: Computing Geomagnetically-Induced Current in the Bulk-Power System", December 2013.
- [11] T. J. Overbye, K. S. Shetye, T. R. Hutchins, Q. Qiu and J. D. Weber, "Power grid sensitivity analysis of geomagnetically induced currents," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4821-4828 2013.
- [12] B.S. Joo, J.W. Woo, J.H. Lee, I. Jeong, J. Ha, S.H. Lee, and S. Kim, "Assessment of the Impact of Geomagnetic Disturbances on Korean Electric Power Systems," *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1920, Jul. 2018.
- [13] L. Marti, J. Berge and R. K. Varma, "Determination of geomagnetically induced current flow in a transformer from reactive power absorption," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1280-1288 2013.
- [14] T. Hutchins, "Modeling, simulation, and mitigation of the impacts of the late time (E3) high-altitude electromagnetic pulse on power systems," Ph.D., University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [15] 국립전파연구원 우주전파센터, <http://spaceweather.rra.go.kr>
- [16] NERC, "Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Event(TPL-007-1)", Online available: <http://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability%20Standards/TPL-007-1.pdf>.
- [17] NERC, "Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Event(TPL-007-2)", Online available: <http://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability%20Standards/TPL-007-2.pdf>
- [18] NERC, "Benchmark Geomagnetic Disturbance Event Description". May 2016, Online available: http://www.nerc.com/pa/Stand/TPL0071RD/Benchmark_clean_May12_compl etc.pdf