

국내 전력망에 대한 지자기 유도전류의 영향

(The Effect of Geomagnetically Induced Current(GIC) on the Domestic Power Grids)

심해섭* · 전태현**

(Haesup Shim · Taehyun Jeon)

Abstract

There have been a lot of reports about the effects of geomagnetically induced current(GIC) on the power grids. However there has been little domestic efforts made in this relatively urgent area which include academic research or risk assessments on GIC. There still exist a claim that domestic power grids might be in the safe state from GIC since our geomagnetic latitude is low and our power grid is relatively small scale. However it has been already demonstrated that GIC has an effect on power grids located at all latitudes. In this study, we have reviewed the transpiratory principle of the GIC, case studies of the major damage in various regions and we have calculated the GIC that can occur in domestic power grids. This paper presents some of the fundamental information about the risk assessment of domestic power grids from GIC although more thorough investigation should be made to ensure the safe operation of nationwide electric power infrastructure.

Key Words : Geomagnetic Disturbance, Geomagnetically Induced Current, Power Grids

1. 서 론

우주기상은 태양 활동, 우주방사선 등이 원인으로 작용하여 우주 및 지상의 인간 활동에 영향을 미칠 수 있는 우주공간의 물리적 현상으로 정의된다. 이러한

현상은 현재까지 다양한 영역에서 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있으며 이들 중에는 전력망에 대해서도 영향을 미치는 우주기상 현상도 포함되어 있다. 대표적인 우주기상 현상으로는 지자기폭풍(Geomagnetic Storms), 태양폭발(Solar Flares) 그리고 방사선폭풍(Radiation Storms) 등이 존재하며 이들 중 특히 지자기 폭풍이 전력망에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[1].

태양활동으로 인하여 지구 자기장의 세기가 급격히 감소하는 현상을 지자기폭풍(Geomagnetic Storms) 또는 지자기교란(GMD : Geomagnetic Disturbance)이라 한다. GMD로 인하여 지상의 전력망에는 지자기 유도전류(GIC : Geomagnetically Induced Current)가

* 주저자 : 기상청 국가기상위성센터 위성기획과
** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보시스템공학과
* Main author : National Meteorological Satellite Center, Satellite Planning Division
** Corresponding author : Seoul National University of Science and Technology
Tel : 02-970-6409, Fax : 02-970-6409
E-mail : thjeon@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 24일
1차심사 : 2012년 10월 30일, 2차심사 : 2012년 11월 26일
심사완료 : 2012년 12월 5일

순환하게 되어 결국 전력망 장애의 원인이 된다. GIC로 인한 전력망의 대표적 피해사례는 1989년 3월 13일에 발생한 캐나다 퀘벡(Quebec)의 전력망 붕괴사건이다. 이 사건은 600만명이 9시간 동안 불시정전을 경험하게 했다[1-2].

GMD로 인한 전력망의 영향권을 약 50도(지자기적 위도) 이상으로 추정하여 국내 전력망에 대한 GMD의 영향은 미미할 것으로 추정되고 있다(서울의 지자기적 위도는 31도)[2]. 그러나 다가오는 2013년 태양활동 극대기에는 GMD의 영향권이 확장될 것이며, 특히 우리나라와 유사한 위도에서도 GMD로 인한 피해사례가 빈번히 보고되고 있어 이에 대한 위험성 평가와 대책이 요구된다. 그러므로 본 논문에서는 GIC의 발생 원인 및 피해사례, 국외 전력망에 대한 영향을 조사하고 GIC 계산 예 및 대책을 소개하여 국내 전력망에 대한 위험성 평가의 기초를 제공하고자 한다.

2. 지자기 유도전류의 발생 원인 및 영향

2.1 지자기 유도전류(GIC)의 발생 원인

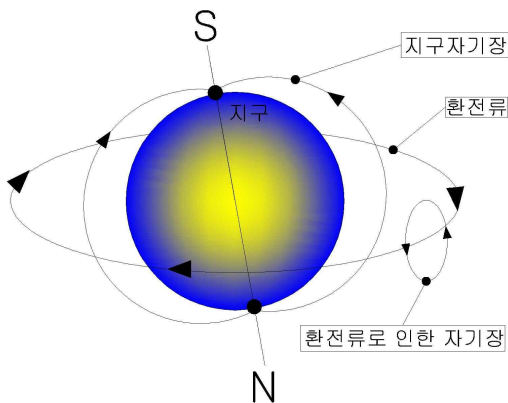


그림 1. 지구자기장과 환전류
Fig. 1. Earth's Magnetic Field and Ring Current

GMD의 발생 원인은 태양 코로나 홀(Solar Coronal Hole)과 코로나 질량 방출(CME : Coronal Mass Ejection)이다[1]. 태양은 지구로 충전된 입자를 방출하고 이 입자는 그림 1과 같은 지구자기장(Earth's

Magnetic Field)과 상호 반응하여 환전류(Ring current) 교란의 원인이 되어 GMD가 발생한다. 고에너지로 충전된 입자의 밀도가 증가하면 환전류의 세기도 증가하고 비례하여 자기장의 세기가 증가되어 결국 지표에서는 지구자기장과 환전류로 인한 자기장이 서로 상쇄되어 자기장이 크게 감소하게 된다. 이러한 지자기장의 변동은 지구 전장(Geoelectric Field)의 변동을 유발하고 결국 그림 2와 같이 대지와 폐회로를 구성하는 전력망에 GIC의 발생 원인이 된다[1,3]. 결국 GIC는 패러데이의 전자기유도(Electromagnetic induction)법칙에 따라 폐회로에 발생하는 순환전류이다. 폐회로 주위의 자계변화로 전장이 변하면 대지에 중성점이 직접 접지된 변압기와 송전선로로 구성된 폐회로에 전압(기전력)이 유도되는 현상이며 그 크기는 스톡의 정리에 따라 자속밀도의 시간적 변화와 전력망의 면적 등에 비례한다[3-4].

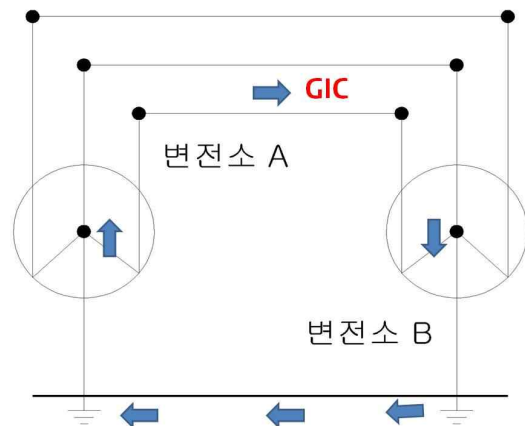


그림 2. 폐회로에서의(전력망) GIC
Fig. 2. GIC on the closed circle

2.2 전력망에 대한 GIC의 영향(피해사례)

1Hz이하의 유사 직류로 간주되는 GIC는 변압기의 1/2주기 포화(Half-cycle saturation), 고조파 발생과 무효전력 손실 증대, 조상 설비류의 고장, 보호계전시스템의 오작 등을 유발한다[5-6].

변압기의 1/2주기 포화현상은 DC성분 고조파의 영향으로 변압기의 자화특성이 변하여 변압기 여자전류

의 최대값과 왜형률이 증가하는 현상으로 변압기 권선의 형식과 구조 등에 영향을 받는다. 이러한 현상은 증가된 와전류로 인한 권선과 구조체의 국부발열을 야기하고 과도한 손실(무효전력의 소비)의 원인이 된다. 결국 변압기 절연에 대한 스트레스원이 되어 수명 단축이나 영구고장의 원인이 된다. 실제 측정된 GIC의 영향은 변압기에 대한 DC 성분 고조파의 교과서적인 영향과 동일하다. 여자전류 증가, 무효전력 손실 증가, 국부발열, 소음 증대, 고조파 왜형률 증가 등이다. 이외에도 GIC는 계전기 오작, 변류기 포화 및 GPS 신호 손실 등의 원인이 되어 전력망의 공급신뢰성을 심

각하게 위협한다. 대표적 피해사례와 전력망에서 GIC의 영향을 표 1과 그림 3으로 요약하였다[7-8].

송전선로와 부하는 저항(R)성분 이외에 인덕턴스(L)와 정전용량(C) 등으로 구성되므로 진상과 지상 무효전력 공급이 반드시 필요하다. GIC로 인한 전력망의 과도한 무효전력 소비는 조상설비 등의 과부하 차단과 오작을 유발하고 고조파는 조상설비의 용량을 저감시킬 뿐만 아니라 보호계전기 오작의 원인이 된다. 이러한 시나리오의 대표적 예가 1989년 3월에 발생한 캐나다 하이드로 퀘벡(Hydro-Quebec)의 전력망 붕괴 사태이다. 59초 동안 총 7기의 정지형 무효전력 보상 장치(SVC : Static Var Compensator)가 차단되어 무효전력 공급에 실패했고 25초 후 전압붕괴로 과급되어 결국 600만명이 9시간 동안 불시정전을 경험해야 했다. 이 사건의 주요원인은 GIC로 인한 변압기의 1/2주기 포화현상으로 발생한 고조파였다[9-10].

표 1. 주요 피해 사례
Table 1. Examples of the major damage

년	월	발생국	내 용
1980	10	캐나다	500kV 송전선로 차단
1980	12		735kV 변압기 소손
1981	4		735kV 변압기 소손
1981	4		500kV 송전선로 차단
1982	7	스웨덴	변압기(4기)소손 등
1989	3	캐나다	불시정전(9시간)
1989	3	영국	변압기 보호를 위한 회로차단
1989	3	미국	변압기 소손
1989	9		
1989	11	캐나다	138kV 송전선로 차단
1991	3	스웨덴	220kV 송전선로 차단 등
1991	4	미국	원전 변압기 소손
1991	6		변압기 소손 및 SCV 차단
1991	6	캐나다	138kV 송전선로 차단
1991	10		DC 송전선로 차단
1991	10	미국	변압기 소손 및 SCV 소손
1992	9		115kV SCV 차단
1992	11		
2001	11	뉴질랜드	변압기 보호를 위한 회로차단
2003	10	스웨덴	불시정전(50분)
2003	11	스웨덴	불시정전(1시간)
2003	11	남아공	변압기 소손(15기), 원전 비상조치
2003	11	미국	캐패시터 차단, 변압기 열화
2004	1	남아공	변압기 소손
2004	6		
2004	11	남아공	변압기 보호를 위한 회로차단

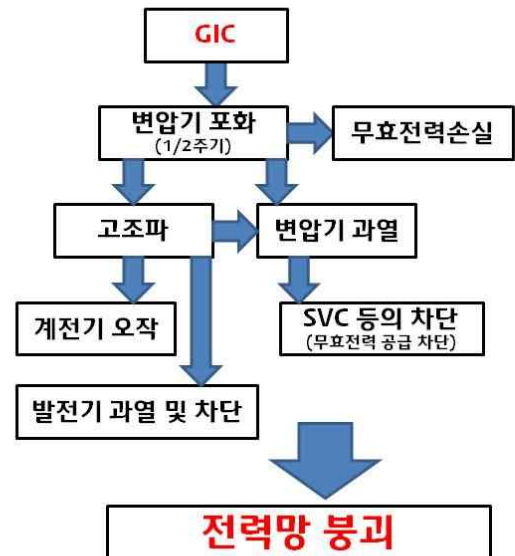


그림 3. 전력망에서 GIC 영향
Fig. 3. Effects of GIC on the power grid

3. 전력망에서의 GIC 산정 및 대책

3.1 전력망에서의 GIC 산정

GIC의 크기에 영향을 주는 요소는 자기장의 크기와

방향, 지자기적 위도, 전력망의 길이와 방향 및 저항성분의 크기, 지질학적 위치 및 대지저항, 변전소의 접지저항, 바다나 대형호수와의 근접성, 송전 전압, 변압기 형식(내철 또는 외철형) 등이다. 또한 교류도체의 실효저항은 직류도체저항의 함수이며 직류도체 저항은 온도에 따라 가변하므로 GIC는 교류도체의 주위온도와 계절적 요소에 영향을 받는다. 이처럼 지자기장의 변화와 이로 인한 유도전압과 GIC는 매우 복잡한 현상이다. 그러나 앞서 언급한 것처럼 GIC는 1Hz이하의 유사 DC로 간주되므로 다음 사항을 고려하고 저항만의 회로로 간주하여 산정할 수 있다[1,10].

- 1) 유도전압은 송전선로에 직렬 접속된 전압원으로 간주
- 2) 송전선로의 선로정수는 저항(R)만을 고려(L과 C 무시)
- 3) 송전선로는 단상의 망으로 간주
- 4) 변압기는 직접 접지된 권선저항만의 회로로 간주
- 5) 변전소내 접지저항은 변전소 기초 접지극 및 접지극과 접속된 송전계통의 모든 접지선로의 등가저항으로 간주

지자기장의 변동값만으로 GIC를 추정할 수 있는 간략식이 2009년 일본에서 발표되었으나 87kV/66kV, 95km 전력망에 대한 GIC의 실측값과 지자기장의 변화량에 대한 비례식으로 국내전력망에 직접 적용할 수 없다[3]. 본 고에서는 국내 최장 765kV 송전선로인 신태백-신가평 송전선로를 예시하여 GIC를 산정하고자 한다. 각 변전소의 위도는 동일위도로 가정하고 대지고유저항 등은 자료부족으로 산정에서 제외한다.

표 2. 계산 기초자료
Table 2. Basic Data for calculation

송전선로 길이(km)	154.7
송전선 종류	ACSR 480×6B
단위길이당 저항(Ω/km)	0.05994
변압기 Y권선저항(mΩ)	25.34
변전소 접지저항(Ω)	0.2

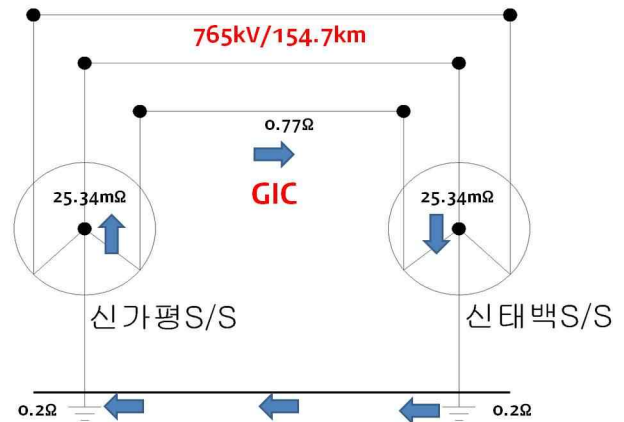


그림 4. GIC 계산을 위한 전력망 예
Fig. 4. Example of the power grid for calculation

신태백-신가평 T/L에서 GIC 계산을 위한 기초 자료는 표 2와 같다. 송전선인 ACSR 480×6B의 단위 길이당 저항은 0.05994Ω/km이며 6가닥을 1조로 구성하므로 전체 선로 길이 154.7km에 대한 각 송전선 저항의 합은 0.77Ω이다. 변압기의 시험성적서에 따르면 Y 권선의 저항은 25.34mΩ이며, 각 변전소의 실측 접지저항은 0.2Ω이다. GMD로 인한 전장값을 최악의 시나리오를 가정하여 1.7V/km(1989년 3월 캐나다 퀘벡)로 적용하면 송전선로에 유도되는 전압은 263V이다. 그러므로 GIC는 식 (1)과 같이 전력망을 단상의 저항만의 회로로 간주하여 산정할 수 있다[1,4].

$$\frac{263[V]}{0.77 + 0.02534 + 0.02534 + 0.2 + 0.2[\Omega]} = 216[A] \quad (1)$$

그러나 GIC가 계산되어도 이에 대한 내력과 관련된 국내 기준이 전무하여 GIC로 인한 전력망(특히 변압기)의 위험성 평가가 곤란하다. 현재로서는 미국과 유럽등지에서와 같이 GIC를 실측하고 예측 모델을 운영할 수 없으므로 국내 전력망에 대한 정확한 위험성 평가를 위해서는 장기간이 소요될 것이다. 그러나 현재 운영중인 국내 765kV 최장 송전선로인 신가평-신태백 변전소의 예방진단시스템 감시항목인 무효전력량, 절연유 온도, 부하전류, 고조파 추세를 그동안의 GMD 이벤트와 상호 비교하면 개략적인 GIC의 위험성 평가가 가능할 것이다. 무엇보다 필요한 것은 GIC의 실측

이다. 신태백-신가평 변전소의 변압기 중성점 접지측에서 GIC를 실측할 수 있다면 국내 지자기변동값과 비교하여 GMD 예보기준 수립은 물론 향후 GIC 예보에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

3.2 전력망에서의 GIC 대책

전력망에 발생 가능한 이상전압에 대한 내력시험의 종류는 상용주파내전압 시험, LIWL(Lightning Impulse Withstand Level) 및 SIWL(Switching Impulse Withstand Level)이다. 현재까지 유사 DC인 GIC의 내력시험 방법과 규정이 전무하나 설계단계에서 GIC로 인한 과급사고 경감대책을 NERC(North American Electric Reliability Corporation)는 다음과 같이 명시한다.

- 1) 신규 도입 변압기에 대한 GIC 절연내력 시험규정 제정 및 절연내력 명시
- 2) 변압기 주요 부위 열센서 부착
- 3) SVC 등은 과전류에 대한 내력 확보
- 4) 주요 장비에 대한 냉각장치 설치
- 5) 고조파 감시 및 제어장치 설치

또한 운영단계에서도 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 GMD 예보와 GIC 관계 시스템에 따라 다음과 같은 행동강령을 가지고 있다[1].

- 1) 송전선로에서의 수리, 교체 작업 중단 및 연기
- 2) 발전기 부하 저감 운전
- 3) 무효전력 공급 여유율 증대
- 4) 전압 및 무효전력 변동, 전력기기 온도상승, 이상 노이즈, 변압기 유증가스 증가, 보호계전시스템의 오작, 조상설비 등의 고장 대비

표 3은 NOAA의 GMD 물리량에 대한 GMD 예보 Scale 이다. GMD 물리량으로서의 Kp는 지표 자기장 교란을 측정하는 지수로 GMD의 척도가 된다[7]. 시간에 따른 지자기장 변동값을 나타내며 Kp 9의 경우 지자기장의 변화(감소)가 3시간동안 500nT를 초과했음을 의미한다. 그러나 지자기 관측기의 측정 위치가 모두 중·고위도권(44도~60도)에 위치하고 있어 Kp 지수를 국내에 적용하여 GMD 위험성 판단의 엄정한 기준

으로 적용하는 것은 곤란하다. 국내에서도 기상청 국가기상위성센터를 비롯하여 방송통신위원회 우주전파센터 등에서 지자기 관측을 실시하고 지자기폭풍 예보서비스를 시행하고 있으나 Kp 지수에 대한 NOAA Scale을 수정 없이 적용하므로 향후 국내 현황에 맞는 Scale의 연구와 적용이 요구된다.

표 3. NOAA GMD Scale
Table 3. NOAA Scale for Geomagnetic Storms

등급	영향(예상 피해)	물리량 (Kp)
G5 (심각)	- 광범위한 전압제어 문제 발생 - 보호계전 시스템의 문제 발생 가능 - 전력망 붕괴 또는 정전 발생 가능 - 변압기 소손 가능	9
G4 (경계)	- 광범위한 전압제어 문제 발생 가능 - 보호계전 시스템의 오작 가능	8
G3 (주의)	- 전압제어 문제 발생 가능 - 보호계전기 허경보 발생 가능	7
G2 (관심)	- 전력망 전압 경보 발생 가능(고위도) - 장기지속 될 경우 변압기 소손 가능(고위도)	6
G1 (일반)	- 미약한 전압변동 발생 가능	5

4. 결 론

국내 전력망에 대한 GIC의 위험성은 다음과 같은 추정으로 낙관적 평가가 이루어졌다. 첫째, 지자기적 위도가 낮다는 것이며 둘째, 국내 전력망의 폐회로 면적이 적다는 것이다(유도전압은 전력망의 폐회로 면적에 비례). 셋째, 그러므로 피해가 있다 해도 전력기기의 영구고장이나 전력망 붕괴의 가능성은 없다는 것이다.

그러나 일본(44도), 중국(23도), 남아공, 브라질 등 중·저위도권에서도 피해사례가 있으며 2013년 태양 활동 극대기에는 GMD의 영향권이 확장될 것이므로 최악의 GMD 시나리오를 가정한 적절한 대책이 필요하다. 또한 경미한 GIC도 절연 스트레스원으로 작용하여 전력망의 수명단축과 영구고장으로의 과급 가능

성이 있으므로 이러한 기회 손실에 대한 저감 대책이 요구된다.

전력망은 국가기반설비로서 단 1%의 위험 요소에 대해서도 엄정한 과학적 근거에 기초한 명확한 대책이 필요하다. 이미 북미, 유럽, 일본 등은 GIC에 대한 위험성 평가를 마치고 GIC 예·경보를 준비하거나 시행하고 있다. 그러므로 시급한 것은 2013년 태양활동 극대기를 앞두고 전력망에 대한 GIC의 위험성평가이며 이에 준한 GMD 예보기준의 수립과 대책 수립이다.

References

- [1] 2012 Special Reliability Assessment Interim Report. (2012). Effect of Geomagnetic Disturbance on the Bulk Power System (pp. 1-127). NERC.
- [2] Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan, and A. W. P. Thomson. (2012). Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios, Space Weather, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750.
- [3] WATARI Shinichi, et al. (2009). Effects of Geomagnetically Induced Current on Power Grids, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 56, 125-131.
- [4] T.J. Overbye, T.R. Hutchins, K. Shetye, J. Weber, S. Dahman. (2012). Integration of Geomagnetic Disturbance Modeling into the Power Flow: A Methodology for Large-Scale System Studies, North American Power Symposium.
- [5] R. Girgis. (2012). Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems, Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D).
- [6] IEEE Std PC57.110. (2007). Draft Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
- [7] www.swpc.noaa.gov
- [8] www.spaceweather.gc.ca
- [9] A.W.P. Thomson, T. Gaunt. (2009). Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids, Advanced in Space Research, 45(9).
- [10] Ming Zou, Lianguang Liu. (2010). GIC Calculation in Power Grid Based on Layered Earth Mode, Critical Infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference.

◆ 저자소개 ◆



심해섭 (沈海燮)

1974년 1월 7일생. 2009년 서울산업대학교 대학원 졸업(석사). 2004~2006년 극지연구소 남극세종과학기지 월동연구원. 2007년~현재 기상청 국가기상위성센터 주무관.



전태현 (田太賢)

1967년 1월 31일생. 1989년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1993년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(박사). 1998년 Motorola 연구원. 2001년 Texas Instruments 연구원. 2005년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임

연구원. 현재 서울과학기술대학교 전기정보시스템공학과 교수.

Tel : (02)970-6409

Fax : (02)970-6409

E-mail : thjeon@seoultech.ac.kr