

## 2.3.2 GIC の観測

亘 慎一 (情報通信研究機構)

(2020年1月8日受付、2021年5月31日公開、2022年1月28日改訂)

GICの影響を評価するためには、観測によりその大きさを知る必要がある。また、シミュレーションによるGICの計算結果を評価するためにも、実際の観測データによる検証が必要である (Viljanen 2011; Sun and Blach 2019; Nakamura et al. 2019)。GICについては、地磁気や電場の測定結果から求める方法もあるが、電力網の構成や地下の導電率の構造を考慮した計算が必要となる (Pulkkinen et al. 2007; Boteler and Pirjola 2017)。

GICを直接的に観測する方法としては、稼働中の電力システムに影響を与えないように、ホール素子やフラックスゲート方式磁気検出素子などを用いたクランプタイプの電流プローブを電力トランスの接地線に取り付けて観測するのが一般的である。クランプタイプの電流プローブ、観測装置のブロック図の例を図1、図2にそれぞれ示す。



図1. クランプタイプの電流プローブの一例

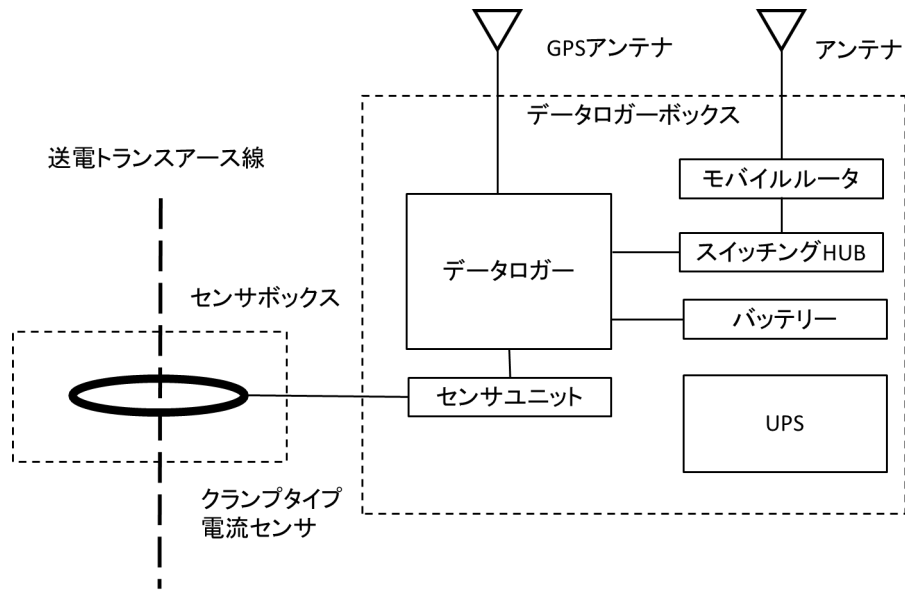


図 2. GIC 観測装置のブロック図の一例

GIC 観測を行う際には、以下のような点を考慮する必要がある (Watari et al. 2021)。

- ・ GIC の細かな変動を捉えるためには、できるだけ速いサンプリングを行うことが望ましい。惑星間空間衝撃波の到来に伴う SSC (Storm Sudden Commencement) あるいは SI (Sudden Impulse) と呼ばれる急激な地磁気変動に伴って大きな GIC が観測されることが知られている (Kappenman 2003)。図 3 に 2017 年 7 月 16 日の SSC に伴う GIC 変化とその周波数スペクトルを示す。データ量との兼ね合いもあるが、1 秒以上のサンプリングが望ましいと考えられる。

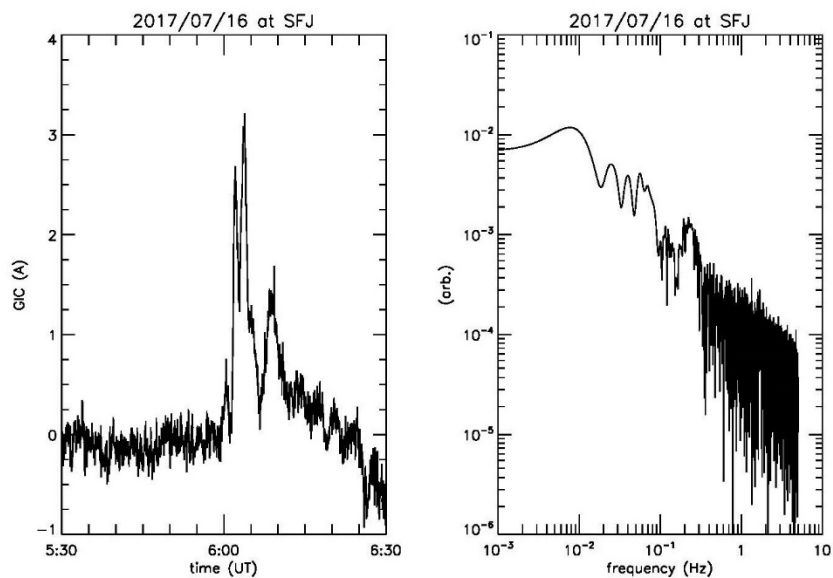


図 3. 2017 年 7 月 16 日の SSC に伴って東京周辺の S F J で観測された GIC とその周波数スペクトル

- ・電力網の構成も含めた GIC の評価を行うためには、対向する送電線をカバーする多数の観測点を設けて GIC の流入や流出を観測することが望ましい。流入や流出を評価するためには、GIC の極性の観測が必要である。GIC の流入点あるいは流出点となるような電力網の端点で観測を行うことにより、大きな GIC を観測することができる。
- ・高時間分解能で観測された GIC 観測データ、地磁気データ、電場データの比較を行うためには、データ間の時刻ずれによる影響を避けるため、記録の際に高精度の時刻情報が必要となる。GPS (Global Positioning System) など GNSS (Global Navigation Satellite System) の受信データを用いて高精度の時刻情報を作成する方法がある。
- ・観測装置を設置する変電所は人里離れた山中にあることも多く、記録されたデータを取得する方法を考慮する必要がある。一つの方法として、携帯電話回線を用いたインターネット接続の利用がある。インターネット接続を行うと準リアルタイムで観測データを取得することが可能となり、観測装置のデータ記録容量によるサンプルレートの制約を軽減することができる。また、観測装置に問題が発生した場合に観測装置のステータス情報を取得したり、再立ち上げしたりすることが遠隔からできるようになる。
- ・GIC の観測装置を動作させるためには電源が必要である。設置場所で提供してもらえる場合はよいが、それが難しい場合は、太陽電池の利用などの検討が必要である。
- ・大きな磁気嵐による影響など様々な地磁気変動に対する GIC 変動をとらえるためには長期間の GIC 観測が必要である。

GIC による電力網への影響は、北欧や北米など地磁気緯度の高い地域のものであると考えられていた。2001 年 11 月 6 日の磁気嵐の際にニュージーランドで発生した送電トランスの障害 (Marshall et al. 2012) や 2003 年 10 月末に発生したハロウィンイベントの大きな磁気嵐に伴い南アフリカで起こった送電トランスの焼損 (Gaunt and Coetzee 2007) などが報告されることにより、中低緯度でも GIC による電力網への影響が懸念されるようになった。この結果、中低緯度の国々でも GIC の観測が行われるようになってきた。さらに、地磁気データを使った解析などから赤道付近でも惑星間空間衝撃波の到来に伴って、大きな GIC が発生する可能性があることが報告されている (Carter et al. 2015)。図 4 に地理緯度と地磁気緯度の世界地図を示す。

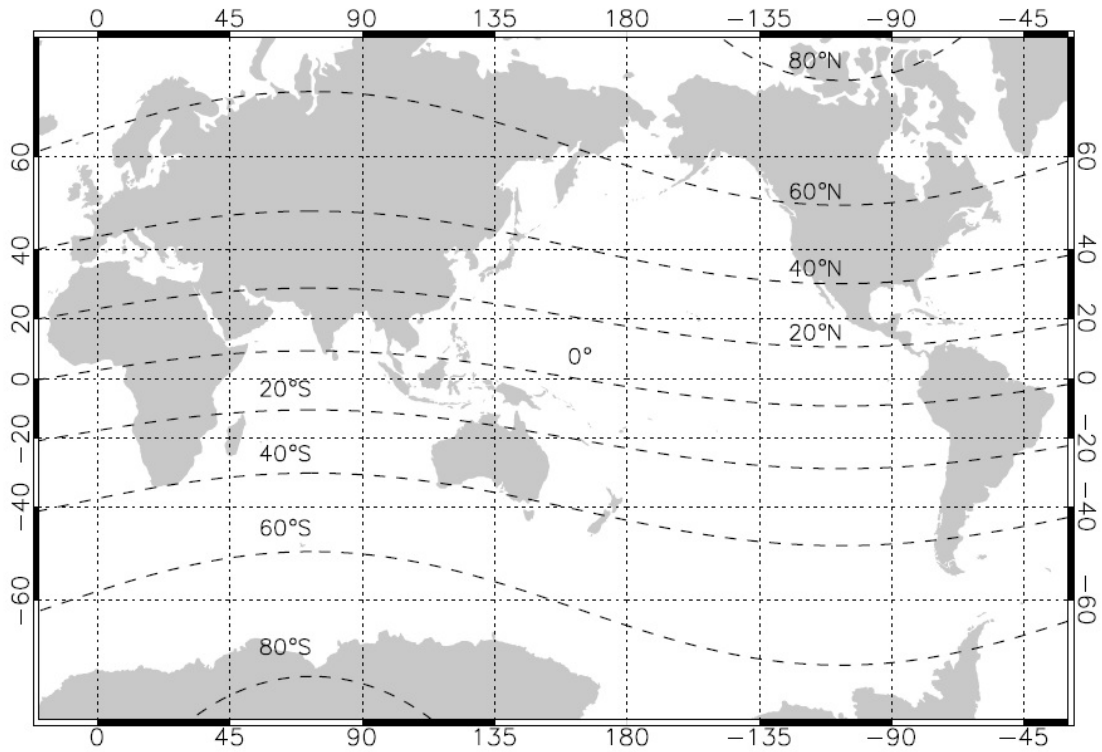


図 4. 地理緯度と地磁気緯度の世界地図

世界各国での GIC の観測例について、以下でいくつか紹介する。

・日本

2005 年 12 月から 2008 年 3 月にかけて北海道の女満別変電所で観測を実施した (Watari et al. 2008; Watari 2015)。一般的には、地磁気変動の時間微分に対応した GIC 変動が観測されると考えられているが、北海道の観測では、地磁気変動に近い変動を示す GIC が観測された。2017 年 2 月からは、東京周辺の 3 つの変電所や山口県の変電所で観測を実施している (Nakamura et al. 2019; Watari et al. 2021)。図 5 に東京周辺の SFJ、STB、SFS での 2018 年 5 月 5 日の磁気嵐の際の GIC 観測データを柿岡地磁気観測所の地磁気および電場データとともに示す。

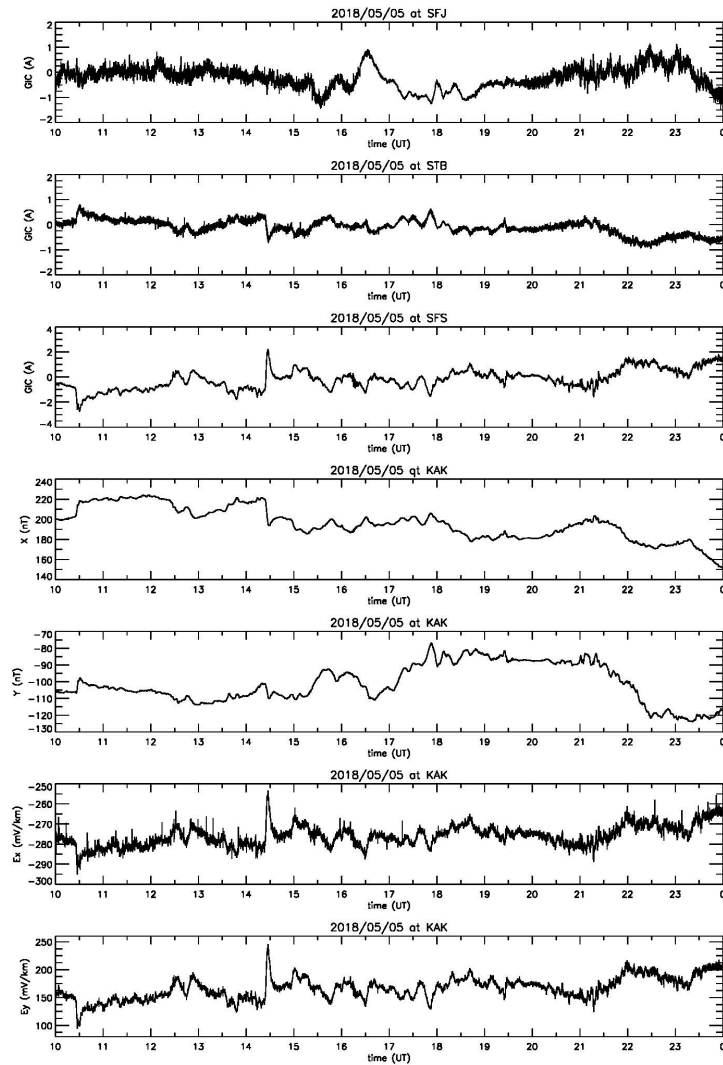


図 5. 2018 年 5 月 5 日の磁気嵐の際に観測された東京周辺の変電所で観測された GIC と柿岡地磁気観測所の地磁気および電場観測データ

・ 中国

ホール素子を用いた電流センサの出力があらかじめ定めた値を超えると記録を始める仕組みの観測装置を香港の近くの Ling'ao 発電所のトランスに設置して、2004 年頃から観測を行っている。2004 年 11 月 9-10 日の磁気嵐の際には、55.8A の GIC が観測された (Liu et al. 2009)。

・ニュージーランド

ニュージーランド南島と北島の間で直流送電を行っているため、リターンカレントのモニタとして、送電トランスのアースを流れる電流を計測している。このデータを用いて、2001年11月6日2時UT頃に磁気嵐に伴って複数の送電トランスの保護リレーが動作するなどした現象について解析が行われ、惑星間空間衝撃波の到来による地磁気の急激な変動が原因であったことが明らかにされた (Marshall et al. 2012)。

・オーストラリア

ホール効果を用いた電流センサ (LEM model LT505-S) を数カ所の変電所に設置し、1分サンプリングで GIC の観測を行っている。2012年7月14日の磁気嵐の際には、4~5A 程度の GIC が観測された (Marshall et al. 2013)。

・ブラジル

ブラジル国立宇宙研究所が、電力会社 FURUNAS と協力して、2004年から GIC の観測を行っている。南北方向より東西方向の電場が卓越する傾向があるので、東西方向の長さ 150 から 200km の 500kV 電力線 Itumbiara (18.4°S, 49.2°W) – Sao Simao (19.0°S, 50.5°W) 間及び Pimenta (20.5°S, 45.8°W) – Barreiro (20.0°S, 44.0°W) 間で観測を実施している。2004年11月7-10日の磁気嵐の際には、15~20A 程度の GIC が観測された (Trivedi et al. 2007)。

・南アフリカ

南アフリカでは、EPRI の SUNBURST プロジェクト (注) に参加して 2001年から Grassridge 変電所 (33.7°S, 25.6°E) と Hartebeesthoek (27.7°E, 25.9°S) 変電所で GIC の観測を行っている (Koen and Gaunt 2003; Ngwira et al. 2008)。2003年10月末の大きな磁気嵐 (ハロウィンイベント) 後の定期点検の際にいくつかの送電トランスで油中ガスの増加が見られ、その中には焼損している送電トランスも見つかった (Gaunt et al. 2007)。

・スペイン

北スペインの Vandellos 変電所に観測装置を設置して観測を行っている。GIC 観測のために開発した装置は、ホール素子を用いた電流センサからの入力を 1kHz でサンプリングして 1分値を作成し、GPS から取得した時刻情報とともに記録してモバイル回線でデータ伝送を行う (Torta et al. 2012)。

・英国

スコットランドの電力会社 Scottish Power が、GIC 観測装置を 400 kV 網の 3カ所に設置している。

GIC 観測装置は、ホール効果を用いたセンサを使い、入力にローパスフィルタを入れて高い周波数を取り除くようにしている。GIC の大きさが $\pm 5A$  超えるとシステムの電圧と電流を 0.1 秒あるいは 6.4kHz で高速サンプリングして記録するようになっている。さらに油中ガスのモニタも設置している (Breckenridge et al. 2001)。また、英国地質調査所が地磁気データを提供している。

- ・スウェーデン

ハロウィンイベントの際、2003 年 10 月 30 日にスウェーデンのマルメで停電が発生した (Pulkkinen et al. 2005)。Simpevarp の 400kV 網の電力トランスで GIC の 1 分値と温度の観測が行われており、2013 年 10 月 29 日には、150A を超える GIC が観測されている (Wik et al. 2009)。

- ・フィンランド

フィンランド気象研究所が電力会社と協力して、400 kV の送電網で GIC 観測を約 30 年間継続している。これまでの観測の中で最大のものは、1991 年 3 月 24 日の磁気嵐の際に Rauma の送電トランスで観測された 201A (1 分値) である (Pirjola et al. 2007)。

- ・ロシア

ロシアのコラ半島の 110-330kV の送電網で GIC 観測を行っている (Sakharov et al. 2007)。Belakhovsky et al. (2019) は、この 10 秒値の GIC 観測データを用いて昼側の TCV (Traveling Convection Vortices) など高緯度でローカルに起こる急激な地磁気変動により大きな GIC が観測されるいくつかの例を示している。

- ・カナダ

1989 年 3 月 13 日の磁気嵐の際、GIC によりカナダの電力会社 Hydro-Quebec の送電網に障害が発生し、ケベックで停電が起こった。1991 年 3 月 24 日の磁気嵐の際には、110A を超える GIC が Radisson の電力トランスで観測された (Bolduc 2002)。カナダの電力会社 Hydro One では、自社の電力網の 17 ヶ所に GIC 測定装置、6 ヶ所に磁力計を設置している (Marti and Yiu 2015)。

- ・米国

米国の電力会社 Dominion Virginia Power では、カナダで GIC による停電が発生した 2 年後に EPRI の SUNBURST プロジェクト (注) に参加して 500kV 網で GIC の観測を行っている。GIC モニタに加えて、高調波モニタ、油中ガスモニタ、温度モニタをトランスに設置している (Sun et al. 2015)。

(注) SUNBURST プロジェクト (<http://sunburstproject.net>)

EPRI (Electrical Power Research Institute) が主導して、カナダや米国を中心として、GIC やその電力網

への影響を準リアルタイムで監視するためのプロジェクト。

## 謝辞

GIC測定にご協力いただいている(株)東京電力パワーグリッド、地磁気及び電場の観測データを提供いただいた気象庁柿岡地磁気観測所に感謝いたします。

## 参考文献

- Belakhovsky, V. et al., Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines, *J. Space Weather Space Clim.*, 9, A18 (2019). doi:10.1051/swsc/2019015
- Bolduc, L., GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system, *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.*, 64(16), 1793-1802 (2002). doi:S1364-6826(02)00128-1
- Boteler, D.H., and Pijola, J., Modeling geomagnetically induced currents, *Space Weather*, 15(1), 258-276 (2017). doi:10.1002/2016SW001499
- Breckenridge, T.H., Cumming, T., and Merron, J., Geomagnetic induced current determination and monitoring. 2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE), 9-12 April 2001, Amsterdam, Netherlands. doi:10.1049/cp:20010147
- Carter, B.A., Interplanetary shocks and the resulting geomagnetically induced currents at the equator, *Geophys. Res. Lett.*, 42(16), 6554-6559 (2015). doi:10.1002/2015GL065060
- Gaunt, C.T. and Coetzee, G., Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk, 2007 IEEE Lausanne Power Tech Conference, 1-5 July 2007, Lausanne, Switzerland. doi:10.1109/PCT2007.4538419
- Kappenman, J.G., Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations, *Space Weather*, 1(3), 1016 (2003). doi:10.1029/2003SW000009
- Koen, J. and Gaunt, T., Geomagnetically induced currents in the Southern African electricity transmission network, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, 23-26 June 2003, Bologna, Italy. doi:10.1109/PTC.2003.1304165
- Liu, C., Liu, L., and Yang, Y., Monitoring and modeling geomagnetically induced currents in power grids of China, 2009 Asia-Pacific Power and Engineering Conference, 27-31 March 2009, Wuhan, China. doi:10.1109/APPEEC.2009.4918502
- Marshall, R.A. et al., Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network, *Space Weather*, 10(8), S08003 (2012). doi:10.1029/2012SW000806
- Marshall, R.A. et al., Observations of geomagnetically induced currents in the Australian power network, *Space Weather*, 11(1), 6-16 (2013). doi:10.1029/2012SW000849



- Marti, L., Yiu, C., Real-time management of geomagnetic disturbances: Hydro One's eXtreme Space Weather control room tools. *IEEE Electrification Magazine*, 3(4), 46-51 2 December 2015. doi:10.1109/MELE.2015.2480637
- Nakamura, S. et al., Time domain simulation of geomagnetically induced current (GIC) flowing in 500-kV power grid in Japan including a three-dimensional ground inhomogeneity, *Space Weather*, 16(12), 1946-1959 (2019). doi:10.1029/2018SW002004
- Ngwira, C.M. et al., Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network, *Space Weather*, 6(11), S11004 (2008). doi:10.1029/2008SW000408
- Pirjola R.J., Viljanen, A.T., and Pulkkinen, A.A., Research of geomagnetically induced currents (GIC) in Finland, 2007 Seventh International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 26-29 June 2007, St. Petersburg, Russia. doi:10.1109/EMCECO.2007.4371707
- Pulkkinen et al., Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system, *Space Weather*, 3(8), S08C03 (2005). doi:10.1029/2004SW000123
- Pulkkinen, A., Pirjola, R., and Viljanen, A., Determination of ground conductivity and system parameters for optimal modeling of geomagnetically induced current flow in technological systems, *Earth, Planets and Space*, 59, 999-1006 (2007). doi:10.1186/BF03352040
- Sakharov, YA.A., Danilin, A.N., and Ostafyichuk, R.M., Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula, 2007 Seventh International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 26-29 June 2007, St. Petersburg, Russia. doi:10.1109/EMCECO.2007.4371714
- Sun, R. et al., Mitigating geomagnetic disturbances: A summary of Dominion Virginia Power's efforts, *IEEE Electrification Magazine*, 3(4), 34-45, 2 December 2015. doi:10.1109/MELE.2015.2480636
- Sun, R. and Blach, C., Comparison between 1-D and 3-D geoelectric field methods to calculate geomagnetically induced currents: A case study, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(6), 2163-2172 (2019). doi:10.1109/TPWRD.2019.2905532
- Torta, J.M. et al., Geomagnetically induced currents in a power grid of northern Spain, *Space Weather*, 10(6), S06002 (2012). doi:10.1029/2012SW000793
- Trivedi, N.B. et al., Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study, *Space Weather*, 5(4), S04004 (2007). doi:10.1029/2006SW000282
- Viljanen, A., European project to improve models of geomagnetically induced currents, *Space Weather*, 9(7), S07007 (2011). doi:10.1029/2011SW000680
- Wadari, S. et al., Measurement of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan, 7(3), S03002 (2009). doi:10.1029/2008SW000417
- Wadari, S., Estimation of geomagnetically induced current based on the measurement data of a transformer in a Japanese power network and geoelectric field observations, *Earth, Planets and Space*, 77, 67 (2015). doi:10.1186/s40623-015-0253-3
- Wadari, S., Nakamura, S., and Ebihara, Y., Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73, 102 (2021). doi:10.1186/s40623-021-01422-3
- Wik, M. et al., Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems, *Ann. Geophys.*, 27, 1775-1787 (2009). doi:10.5194/angeo-27-1775-2009