

超高圧変電所の中性点接地線を用いた電磁気連続モニタリングの試み

—序報—

井筒 潤¹⁾・原田 誠²⁾・寺山武志³⁾・植竹富一³⁾・長尾年恭²⁾*

¹⁾ 中部大学地球ウォッチ・市民安全センター・²⁾ 東海大学地震予知研究センター・³⁾ 東京電力株式会社

An Approach of the Continuous Electrical State Monitoring by Using the Ground Wire of Neutral Point at Extra-high Voltage Substations

—A Preliminary Report—

Jun Izutsu¹⁾, Makoto Harada²⁾, Takeshi Terayama³⁾, Tomiichi Uetake³⁾ and Toshiyasu Nagao²⁾*

¹⁾ Earth Watch - Safety Net Research Center, Chubu University

²⁾ Earthquake Prediction Research Center, Tokai University

³⁾ Tokyo Electric Power Co., Inc.

Abstract

We propose a new monitoring system by using the neutral current of transformers at substations of an electric power company named “neutral current monitoring”. It means that we have been measuring the telluric field by using the power line system in order to monitor the electromagnetic state of the underground over an extended time period. The principle of this system is as follow: the neutral points of the transformers in the substations are grounded to the earth and power lines connect them. If the neutral points of the transformers correspond to the grounded electrodes and the power line between substations corresponds to the electric wire between the electrodes, we can observe the telluric field and change of the electromagnetic structure of the underground between substations by measuring the current which flows at the neutral point of the transformer to some extent.

We found that the neutral current is affected by various factors such as the geomagnetic changes and artificial noises like as the conventional telluric field observations. We would be able to investigate the underground electric conductivities near the substations by calculated response function between geomagnetic field data and neutral current data.

Key words: neutral current of transformers, telluric field observation, geomagnetic variation

1. はじめに

各種アンケート等で、地震予知の実現はいつの時代でも実現してほしい科学技術の上位にランクされるが、現実には東海地震の短期・直前予知を除いて、その実現可能性は極めて低い。その東海地震にしても、警戒宣言が発令されるのは、想定される前兆すべりが東海地方に配

備された歪計で観測された場合のみであり、それ以外の先行現象は警戒宣言発令の根拠にすらなっていないのが現状である。したがって地震予知を議論する前に我々がなすべき事は、長期間安定に地下の状態をいろいろな観点（地震活動、地殻変動、地球化学的変動、電磁気的変動等）から継続的に監視できる技術を開発する事であろう。

* e-mail: nagao@scc.u-tokai.ac.jp

しかしながら大地震は稀な現象であり、もし先行的な現象が存在するとしても、それを客観的に判断するためには、まず長期間にわたり安定的なデータを取得する必要がある。しかし、一般的には大学の一研究室で10年、20年と連続的に野外でデータを取得する事は極めて困難を伴う。

本論文では、電力会社のインフラを活用し、長期間安定してデータが取得できる可能性を持つ、新たな地電流測定法とも考えられる中性点電流測定について報告し、中性点電流がどのような性質を持っているのか、これまでに得られている知見について述べていきたい。

2. 中性点電流測定とは

一般に地電流観測として報告されている観測は、実際には電流ではなく、電極を埋設した二地点間の電位差を観測しており、正確には地電位差観測と呼ぶべきものである。今回紹介する観測方法は、それとは異なった方法によるものである。

一般に電力会社では、電力は三本一組の送電線で三相交流(位相がそれぞれ 120° ずつ異なる)として送電されている。この三本の線は変電所で結合されており、その点は理論的には電流・電圧ともゼロになり中性点と呼ばれる。長距離送電線の両端の変電所において、超高压変圧器の中性点は電力系統の保護及び人身保安のために直接大地へと接地されている。両変電所間に地電位差がある場合、地電流が地表だけではなく中性接地点を通して電力設備にも電流が流れる。したがって中性点にクランプ型電流計を設置すれば、中性点を流れる電流を観測することが可能となる。この変圧器の中性接地点を地電流測定における接地電極として、変電所間の送電線を電極間の電線とそれぞれ対応させると、電力会社の広域送電線路を利用して(この変電所間の)送電設備を流れる電流をモニタリングする事が可能となる(Fig. 1)。

しかしながら、本観測には、以下のような課題も存在する。

- 1) 計測が電位差ではなく、電流のため、計測自体(換言すれば、中性点接地が変電所でなされている事自体)が自然の電場を乱している可能性が存在する。
- 2) 単純な2地点間を流れる電流ではない。つまりネットワークとなっている(変電所配置に代表される)送電システム全体を含む系としての電流変化を観測している。

観測システム(=接地の条件、変電所の配置など)が一定であれば、後述するように、中性点電流は地磁気の誘導成分を記録している事も事実であり、磁場変動に対する周波数ごとの変換関数も決定できる事から、地球電

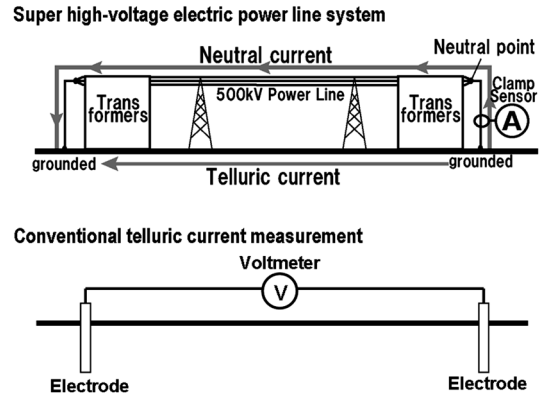


Fig. 1. The conceptual figure of the measurement of the current by the power line system.

磁気学にとって全く無意味な観測ではないと著者らは考えている。1)の問題については、大地を流れる電流と中性点間を流れる電流は、周波数ごとのそれぞれの抵抗に反比例する形で分配されて流れているものと考えられる。また2)の問題については、接地の場所や送電系統が変更されない限り系は安定と考えられ、その安定な期間内では時間変動についても議論できる可能性も存在する。

従来の地電位差測定でも、電話線を電極間の電線として使用することにより、数km~10km程度の基線長での測定がなされてはいるが(たとえば Uyeshima, 2007)、中性点電流測定方式では現存する電力系統をそのまま利用して、数十キロにおよぶさらに長い基線長で地電流を測定することができ、より広範囲の観測を行うことができる点が利点である。さらに中性接地点での接地抵抗は極めて小さく(1オーム以下)安定しており、保守・管理も電力会社によって万全になされている事も大きな特長である。ただし、電力供給系はネットワークとなっており、単純に2地点間を流れる電流ではない事に注意を払う必要がある。Fig. 1に中性点電流の測定原理と従来の地電流(地電位差)測定の比較の図を示す。

3. 過去の中性点電流測定例

中性点電流観測による地電流測定はGIC(Geomagnetic Induced Current)観測を目的として特に高緯度地方(例えばカナダ: Albertson *et al.*, 1974, Lundby *et al.*, 1985)では以前から精力的に行われていた。高緯度地方では大規模な磁気嵐によって地表に大きな地電流が流れ、そのために電気設備が破壊される事故がたびたび発生している(Boteler *et al.*, 1998)。古くは1847年にイギリス南部でもオーロラが観測されたほどの大規模な磁気嵐時にすべての電信機が使用不能に陥ったことが報告されており、近年では1989年3月13日に発生した大規

模な磁気嵐の際に流れた地電流によってカナダのハイドロケベック社の変圧器が故障し、モントリオールやケベックなどの大都市などでも9時間以上の大停電を引き起こしおよそ600万人が影響を受けた事例がある (Allen *et al.*, 1989).

日本では湯元 (1992) が中部電力東栄変電所の500kV変圧器中性点電流を観測し、母子里の地磁気変動と比較している。日本では雷撃などによる異常電流の検知のためのトリガとして中性点電流のモニタを行っているが、大規模な磁気嵐の場合でも高緯度地方と比べて地磁気が大きく変動することはなく、送電設備にダメージを与えるほどの地電流も流れないため、定常的な中性点電流の観測および記録はあまり報告されていない。

関西電力の樋口らは中性点電流観測によって地震と関連する地電流異常が観測できるのではないかと考え、猪名川変電所の500kV変圧器中性点接地線に電流計を設置し、1996年より中性点電流の連続観測を行った (樋口, 2000)。1999年9月22日19時17分に京都中部で発生したマグニチュード3.0、深さ11.8kmの地震の前後に猪名川変電所で30A以上の異常な中性点電流変化を観測したと報告している。これまで地震前後に大規模な中性点電流変動が観測されたのはこの1例だけであるが、この規模の地震は観測点周辺でも年間10個程度は発生しており、全くの偶然であったかもしれない。

村山ほか (2000) では東北電力275kV送電系統の中新田、秋保、仙台の三箇所の変電所で中性点電流を観測し、地磁気変動による誘導地電流測定を行っていた。また、変電所近くで発生した地震に伴って、地震発生前に中性点電流データにスパイク状のノイズが観測されたことを報告している。

武内ほか (2003) 及び牟田神東ほか (2003) ではこのような中性点電流変動が震源付近の電磁氣的異常が原因であると仮定して、地表付近での電位差のシミュレーションを行なった。その結果、震源が2変電所間の中央ではなく、変電所間の距離の1/4程度離れたところに存在する場合が最も大きな中性点電流が流れることを示し、震源と変電所の幾何的な位置によって流れる中性点電流の大きさが大きく異なることを指摘している。

4. 東京電力の中性点電流観測システム

東京電力では地震前兆を含む地殻活動監視の可能性を検証するため、2002年3月より中性点電流の連続観測を開始した (植竹・野口, 2003)。関東周辺での地震発生状況を勘案し、地震活動度が比較的活発な地域である山梨県東部から神奈川県西部で観測を実施することにし、東

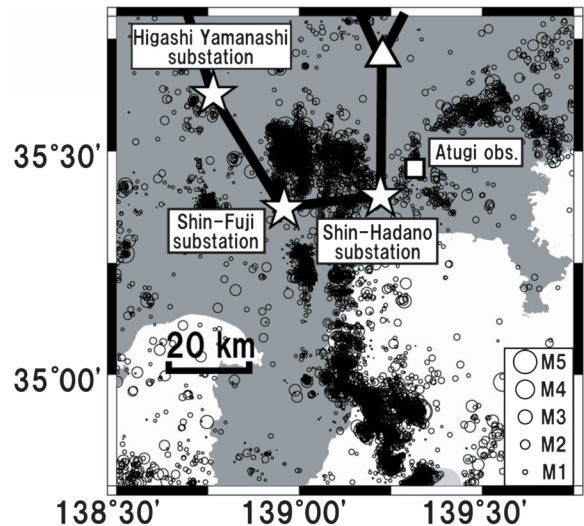


Fig. 2. The distribution map of substations, the Atsugi telluric field observation station, and hypocenters from 2002 to 2007.

山梨変電所、新富士変電所、新奈野変電所の3つの超高圧変電所を観測点とした。Fig. 2に観測点配置を示す。星印は中性点電流を観測している変電所であり、三角は中性点電流を観測していない変電所である。図には観測を開始した2002年から2007年までにこの地域で発生した地震の震央分布も同時に示した。

観測は中性点接地線に流れる電流 (準直流成分) を計測している。複数台ある変圧器のうちの一を選び、既設の中性点接地線にクランプ式電流計を取り付け、電流値を2Hzサンプリングで収録している。観測点間の同期や他のデータとの比較のことも考えGPSにより一時間毎に収録装置の時刻を校正している。

なおFig. 2に四角で示した厚木観測点は、(株)フジタ技術センターを中心とする研究グループと東海大学によって厚木に設置された地電流観測点である。厚木観測点は南北、東西および垂直方向に測線が設置されており、さらにNTTメタリック専用回線を電線として契約し、厚木観測点から東海大学病院りんどう寮 (平面距離約3.2kmで南南西方向) までの測線を観測している。この厚木観測点で観測された地電流と中性点電流との比較は後章で行う。

5. 観測された中性点電流の特徴

東京電力の観測に対する現在までの研究から中性点電流の特徴として以下の点が判明している (たとえば井筒ほか, 2003, Izutsu *et al.*, 2006)。

(1) 基本的に地磁気変動による誘導地電流を観測しており、地磁気と同様の1日周期の日変化、及び地磁気急変

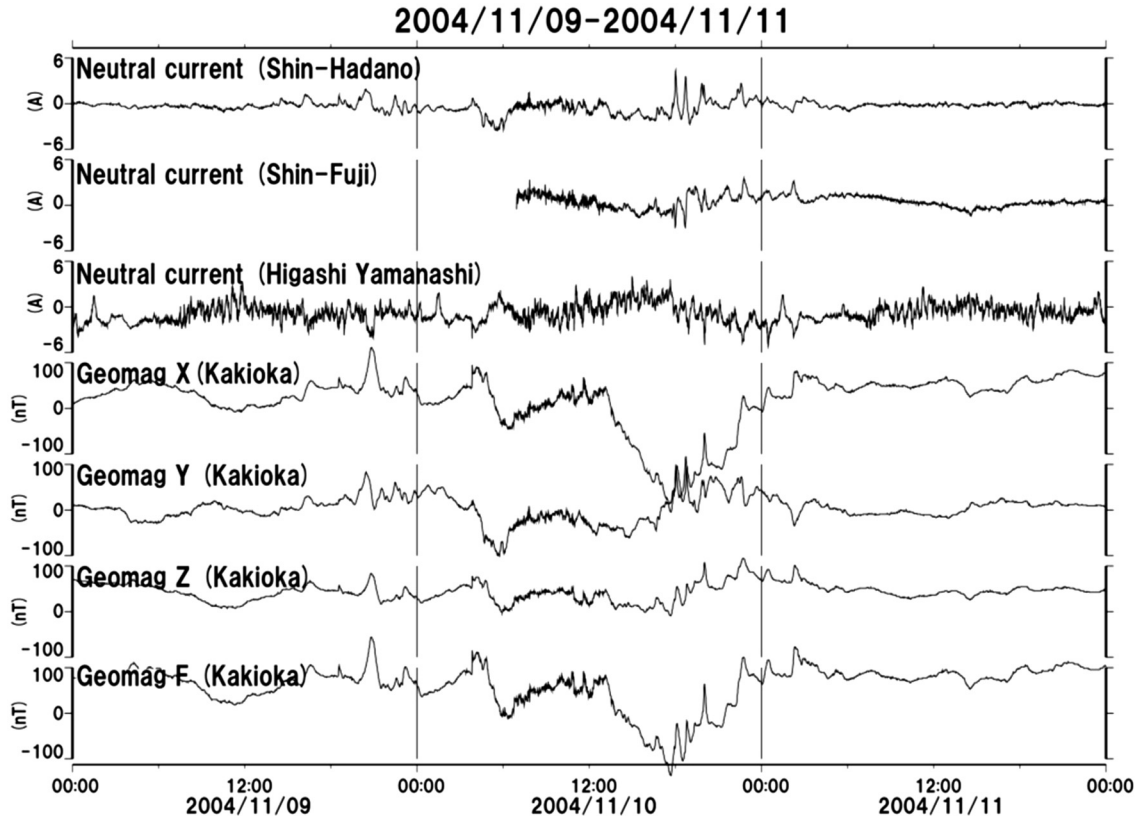


Fig. 3. The fluctuation of neutral currents and geomagnetic components observed at the Kakioka geomagnetic observatory during the large magnetic storm from Nov., 9 to Nov. 11, 2004.

に伴う中性点電流の急変が観測されている。Fig. 3は大きな磁気嵐が発生した2004年11月9日から11月11日までの各変電所における中性点電流の変動と、気象庁柿岡地磁気観測所で観測された地磁気4成分の変動を示したものである。

(2) すべての観測点において、人工ノイズの影響を受けるために昼間はノイズが大きく、夜間はノイズが小さい。特に東山梨観測点はJR中央本線に近く、電車からの漏洩電流の影響を大きく受けており、早朝から深夜にかけて大きなノイズが混入している。Fig. 4は2005年8月22日から28日までの東山梨変電所の中性点電流24時間のデータである。図中の点線は観測点に近いJR笹子駅を通過する特急列車の通過時刻であり、全体的に見てノイズのピーク時に特急列車が変電所付近を通過していると考えられる。図中に四角で囲んだ時間帯(8月25日)は台風11号の上陸に伴い、初狩駅-勝沼ぶどう郷駅間の倒れ掛かった木が送電線に触れて信号トラブルが発生したため列車が運休していた時間帯であり、それ以外の日に見られる変動がこの時間には見られない事からもノイズ源が直流電化のJR線である事が推察できる。

(3) 中性点電流には電力系統起源(雷サージや開閉サー

ジなどの過電流)のパルス状のシグナルが観測される(樋口, 2000)。これらの過電流は持続時間が数ミリ秒から数百ミリ秒程度であるため、現在の観測システムでは(主たる)観測ターゲットとしていない。

(4) 中性点電流には年間変動が見られ、この変動は観測点周辺の気温変動とよく一致する。Fig. 5は2002年から2007年までの新秦野変電所の中性点電流変動と新秦野変電所の最寄りのアメダス観測点である海老名の気温変動を示した。中性点電流の年間変動パターンは気温の年間変動とよく一致しているが、気温の日変動と中性点電流の日変動はあまりよい一致を見せておらず、気温変動が中性点電流に及ぼす影響は現時点では不明である。さらに数年のデータで比較すると新秦野変電所の中性点電流データは年々増加する傾向にあり、年変動よりもさらに長い周期の変動が存在する可能性も存在する。

(5) 中性点電流データをフーリエ変換し周波数領域でデータを解析すると、すべての観測点において24時間、12時間、8時間、6時間などの24時間周期の高調波成分が卓越している事が判明した。また3観測点の中では最も海に近い新秦野変電所では、M2分潮(主太陰半日周潮)やO1分潮(主太陰日周潮)等が分離できる事が判明

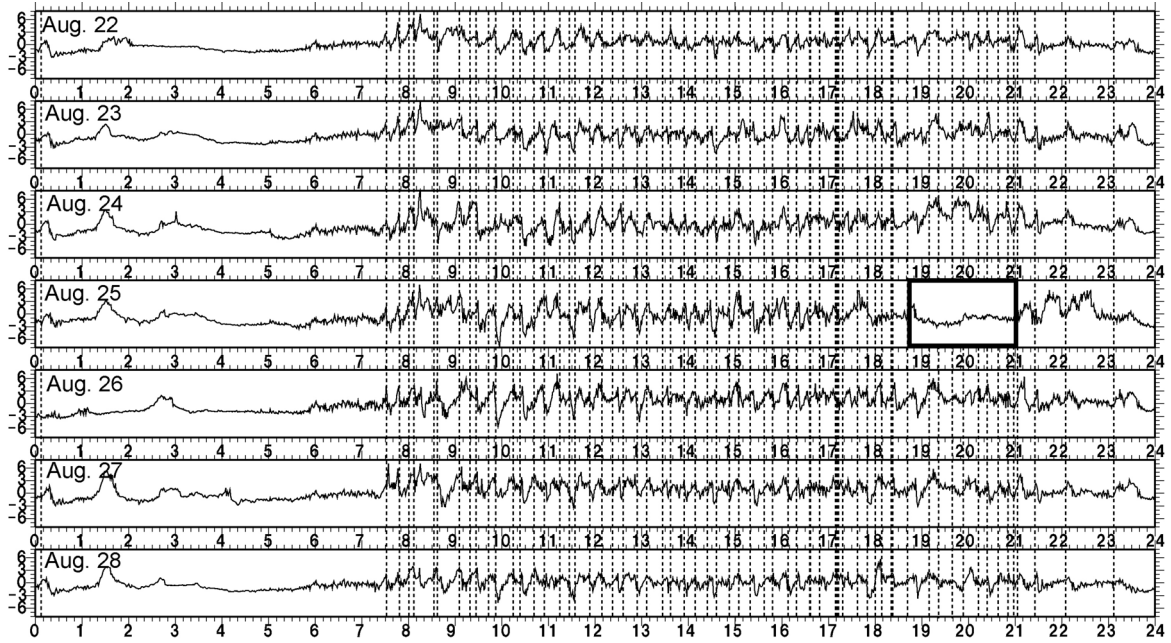


Fig. 4. The figure shows the daily variations of the neutral current observed at the Higashi Yamanashi substation from Aug. 22 to 28, 2005. The open rectangular on Aug. 22 shows DC-driven train stopped due to Typhoon No. 11.

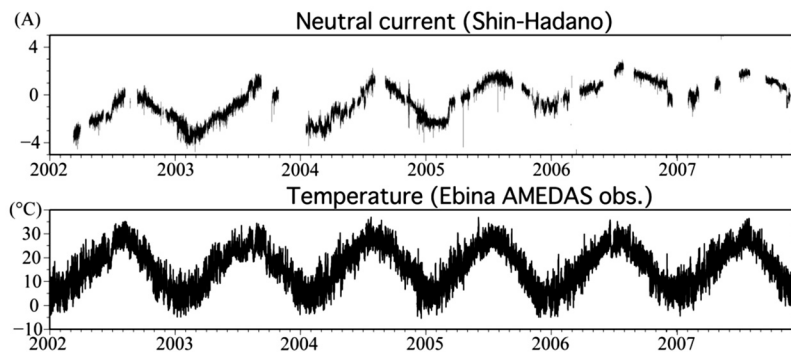


Fig. 5. The change of the neutral current at the Shin-Hadano substation and the temperature at the Ebina AMEDAS observatory from 2002 to 2007.

した。

6. 地電流観測との比較

Fig. 6 に 2003 年 6 月 1 日から 30 日までの各変電所での中性点電流観測データおよび厚木での地電位差観測データ (ch01: 南北測線, 測線長 148 m, 埋設深さ 1 m; ch03: 東西測線, 測線長 131 m, 埋設深さ 1 m; ch09: 南北測線, 測線長 148 m, 埋設深さ 20 m; ch10: 南北測線, 測線長 148 m, 埋設深さ 20 m; ch11: 鉛直測線, 測線長 49 m, 埋設深さ 1 m から 50 m; ch13: 鉛直測線, 測線長 49 m, 埋設深さ 1 m から 50 m; ch16: 南南西方向長測線, 測線長 3430 m, 埋設深さ 48 m から 30 m), 柿岡での地磁気変動の全磁力成分, 厚木での気温, および降水量

を示す。

東山梨変電所の近傍には JR 中央本線が, 厚木周辺には小田急小田原線および JR 相模線が運行しており, 早朝から深夜にかけて大きなノイズが混入している。新秦野および新富士変電所の中性点電流は比較的人工ノイズが小さく, 地磁気の日変化に対応する変動もみられる。厚木の地表付近にある電極を用いた測線 (ch01, ch03, ch13) や, 厚木-りんどう寮間の長測線 (ch16) には降水に伴いノイズレベルの増大やベースラインの変動などが観測されている。観測の結果から中性点電流は, 地磁気変動に対応して変動しており, 従来の地電流測定と同様, 地磁気変動によって大地に生じた誘導電流を測定しているといえる。また, 近くを運行している電車からの

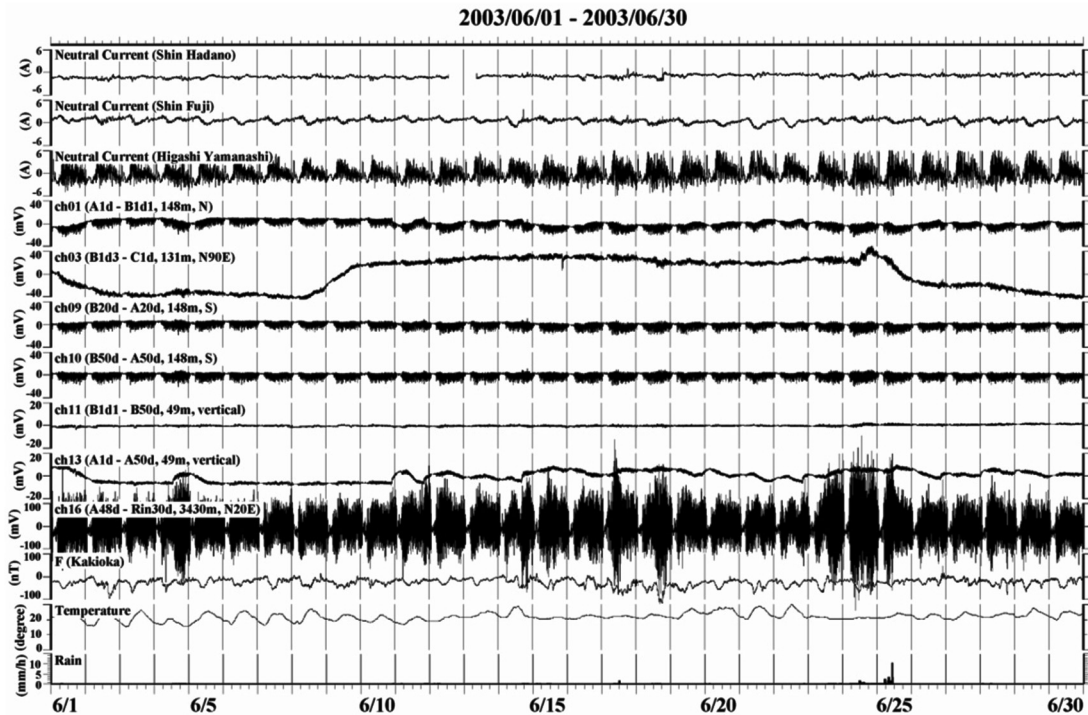


Fig. 6. The neutral currents at each substation and the electric potential differences at Atsugi station observed from June 1, 2003 to June 30, 2003. The geomagnetic variation at Kakioka, the temperature and rain fall at Atsugi station are also shown.

漏洩電流が大きなノイズ源となる (Tanbo *et al.*, 2002) 点でも一致している。

ただし、最初にも述べたとおり、中性点電流の場合は各方向の送電線が変電所内ではすべて母線に接続され、そこに変圧器が接続されているため、たとえば新富士変電所の場合は東山梨-新富士間の地電流と新富士-新秦野間の地電流とが混在していると考えられ、これをどのように考えるかが今後の課題である。

7. 地磁気変動に対する中性点電流の応答

地磁気変動が中性点電流変動の主な原因である事はこれまでの解析からも推定されるが、より定量的な評価のため、ここでは解析手法として Harada *et al.* (2004) で提唱されている、ウェーブレット変換を用いた応答関数解析を用いて解析を行なった。周波数領域での中性点電流を $I(\omega)$ として、周波数領域での磁場水平南北成分を $H_x(\omega)$ 、磁場水平東西成分を $H_y(\omega)$ とすると、磁場水平成分の線形結合として中性点電流を表すことができ、次の関係の式が成り立つ。

$$I(\omega) = TF1(\omega) \cdot H_x(\omega) + TF2(\omega) \cdot H_y(\omega)$$

この周波数応答関数 $TF1(\omega)$ 、 $TF2(\omega)$ は一般的に複素数であり、磁場変動と中性点電流変動との定量的な

関係をあらわす。これを求めることによって磁場変動から中性点電流変動を計算によって予測することができる。また、周波数応答関数の時間変化を見ることにより、観測点周辺の地下構造の変化が観測できる可能性がある。

本来は変電所での磁場と電場の応答関数であるので、変電所周辺で中性点電流だけでなく磁場も同時に観測する必要があるが、線形結合の入出力成分である磁場と電場の両方に系統的なノイズが混入すると、そのノイズのために入出力成分間の相関が高くなり、正確な応答関数が求まらない恐れがある (ノイズの応答関数を求めてしまう可能性がある)。ここではそれを回避する目的もかねて、柿岡地磁気観測所の磁場データ (南北成分, 東西成分) を解析に使用した。

新秦野変電所の中性点電流データの柿岡地磁気データに対する周波数応答関数を Fig. 7 に示す。左上が $TF1(\omega)$ の実部, 右上が $TF1(\omega)$ の虚部, 左下が $TF2(\omega)$ の実部, 右下が $TF2(\omega)$ の虚部をそれぞれ示しており、横軸は周期, 縦軸が係数の値を示している。エラーバーは標準偏差から求めた 95% の信頼区間である。ここでは 2004 年 11 月の新秦野中性点電流および柿岡地磁気データの 1 秒値を使用して周波数応答関数を求めている。係数の値は数百秒以下の周期ではエラーバーも大きく安定していないが、1,000 秒を超える長周期成分では比較

的安定して係数の値が求まっている。

8. 新富士変電所近傍での地電位差臨時観測データとの比較

変電所の中性点電流観測が何を測定しているのかについて評価を行なうため、2008年11月から12月にかけて、新富士変電所から約600m離れた地点で地電位差臨時観測（使用機材：白山工業LS3350、1Hzサンプリング、測線長：南北40m、東西40m、使用電極：鉛-塩化鉛）を実施した。Fig. 8に12月2日の新富士中性点電流

と地電位差臨時観測データを一例として示す。残念ながら、観測期間中の太陽活動は極めて静穏であったため、地磁気誘導成分の定量的評価は充分には行なえなかったが、人工ノイズとの関係を明らかにする事ができた。目視でも見てとれるが、新富士変電所の場合、中性点電流記録は南北方向の地電位差記録とよく似た変動を示している。両者の相互相関係数は日によって若干違うが、概ね0.7程度で推移した。今後は地電位差臨時観測の結果を参照データとして利用し、中性点電流データに含まれる人工ノイズや地磁気誘導成分の周波数依存性等についての評価を行なっていきたい。

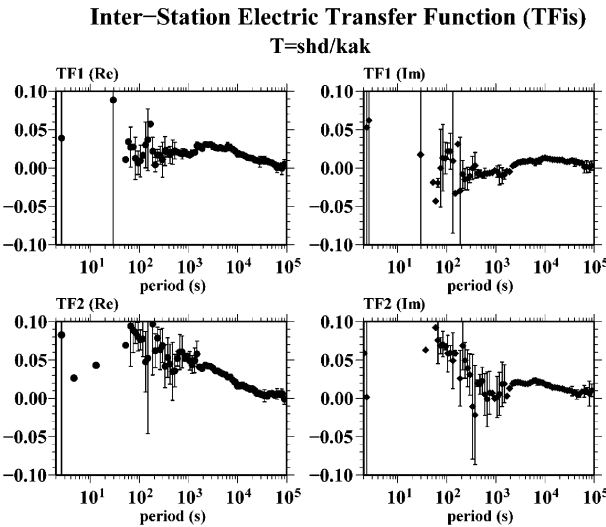


Fig. 7. Calculated inter-station transfer functions between the Shin-Hadano neutral current data and the Kakikoka magnetic data.

9. まとめ

東京電力による超高压変電所における中性点電流の測定は2002年より開始され、現在も継続中である。これまでの観測結果から、中性点電流データの特徴を概ね把握することができた。特に、中性点電流は地磁気変動に大きく影響されるので、その応答を調べることによって、観測点周辺の地下の電氣的構造を推定することも可能かもしれない。

中性点電流は、従来の地電流測定測線に相当する電力線が複数の変電所間で連続しているため、単純に電場水平成分を測定しているものではない。従ってMT法と同様の手法で地下構造を求めることは難しい。しかし、本研究で求めた周波数応答関数は地下の電氣的構造の情報を含むと考えられるので、変電所の近傍で、別途MT法の観測を行ってその結果と比較することで、両者を対応づけることは可能であろう。今後は、地下の電氣的構

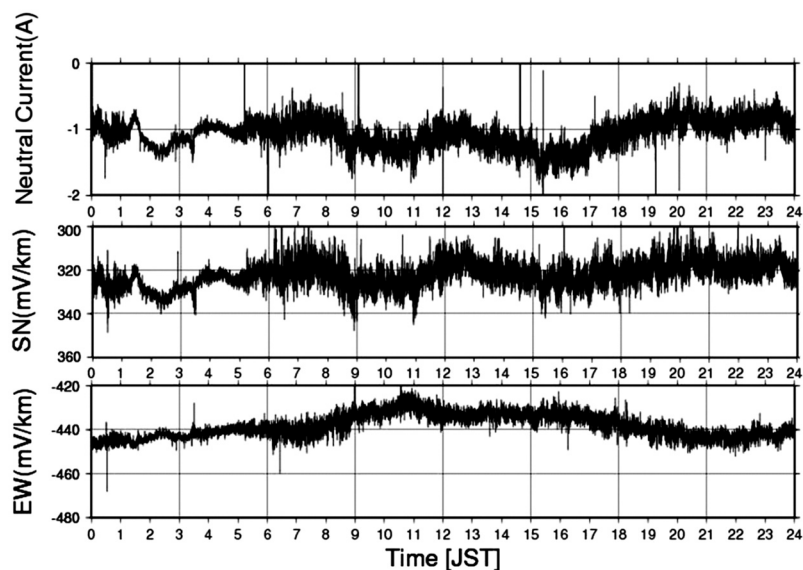


Fig. 8. An example of the temporal observation near the Shin-Fuji substation on December 2, 2008.

造の変化をモニタする手法（アルゴリズム）の確立を目指してゆきたい。

謝 辞

気象庁地磁気観測所には柿岡の地磁気データを提供していただいた。中性点電流に関しては東京電力の各変電所の方々の多大なるご協力のもと行われており、ここに感謝の意を表します。さらに東京電力の金谷淳二氏、野口厚子氏には観測装置の設置、運用に関して大変お世話になりました。東海大学海洋学部4年の富永紘次君は、新富士変電所近傍での臨時地電流観測を手伝っていただいた。同じく感謝の意を表します。

引用文献

- Albertson, V.D., J.M. Thorson Jr. and S.A. Miske Jr., 1974, The Effects of Geomagnetic Storms on Electrical Power Systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-93**, No. 4, 1031-1044.
- Allen, J., L. Frank, H. Saver, and P. Reif, 1989, Effects of the March 1989 Solar Activity, *EOS*, **70**, No. 46, 1479-1488.
- Boteler, D.H., R.J. Pirjola and H. Nevanlinna, 1998, The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth's Surface, *Advances in Space Research*, **22**, No. 1, 17-27.
- Harada, M., Hattori, K. and Isezaki, N.: "Transfer Function Approach to Signal Discrimination of ULF Geomagnetic Data", *Phys. Chem. Earth*, **29**, pp. 409-417, 2004.
- 樋口武光, 2000, 変電所中性点接地線からの地電流測定結果, 電気学会研究会資料 高電圧研究会, HV-00-5, 25-33.
- 井筒 潤・尾池和夫・武内康夫・牟田神東達也, 2003, 中性点電流データと自然現象との関係について—地震に伴う電磁現象に関する研究 (その3)—, 電気学会研究会資料 電磁環境研究会, **EMC-03-23**, 45-49.
- Izutsu, J., T. Ochi, T. Uetake and T. Mutakamihigashi, The relationship between the current through the transformer neutral point and natural phenomena, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, **126-A**, No. 4, 233-237, 2006.
- Lundby, S., B.E. Chapel, D.H. Boteler, T. Watanabe, and R.E. Horita, 1985, Occurrence Frequency of Geomagnetically Induced Currents: A Case Study on a B.C. Hydro 500 kV Power Line, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **37**, 1097-1114.
- 村山賢持・瀬戸正弘・北村保夫・渡辺富也, 2000, 送電線の中性点における電流測定, 東北工業大学紀要 I: 理工学編, 第20号, 233-242.
- 牟田神東達也・武内康夫・井筒 潤・尾池和夫, 2003, 土中電界の地表電気現象基礎解析—地震に伴う電磁現象に関する研究 (その2)—, 電気学会研究会資料 電磁環境研究会, **EMC-03-22**, 39-44.
- 武内康夫・樋口武光・尾池和夫・井筒 潤・牟田神東達也, 2003, 変圧器中性点に流れる地電流観測と接地回路の地電流基礎解析について—地震に伴う電磁現象に関する研究 (その1)—, 電気学会研究会資料 電磁環境研究会, **EMC-03-7**, 37-42.
- Tanbo, T., Nagao, T. and Sakai, H., 2002, Geoelectromagnetic study using the leak current from railroad as a signal. — Application to Ohtawa Station, Gifu Prefecture, Japan —, *Proc. Japan Acad.*, **78**, Ser. B, 179-184.
- 植竹富一・野口厚子, 2003, 神奈川県西部の地震活動域周辺での中性点電流観測, 電気学会研究会資料 電磁環境研究会, **EMC-03-8**, 43-46.
- Uyeshima, M., 2007, EM Monitoring of Crustal Processes Including the Use of the Network-MT Observations, *Surv. Geophys.*, **28**, 199-237, DOI 10.1007/s10712-007-9023-x.
- 湯元清文, 1992, GIC 効果について, *月刊海洋*, **24**, No. 7, 430-433.

(Received June 24, 2008)

(Accepted February 27, 2009)