

短絡事故が生じるような送電線の地震時振動特性について

東電設計(株) フェロー会員 ○中村 秀治

東電設計(株) 本郷榮次郎 東京電力(株) 鈴木 貴雄

1. はじめに

東日本大震災を引き起こした東北地方太平洋沖地震は三陸沖を震源として、震源断層が岩手県沖から茨城県沖までおよそ 500km に及ぶマグニチュード 9.0 の大きな地震となり、宮城県で震度 7 を観測したほか、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の広い範囲で震度 6 強を観測した。本地震は 3 つの破壊が連続して発生したものと分析されているが、継続時間の長い地震動になった。結果的に震源からかなり離れた群馬県内、山梨県内などを含めて 100 件以上の電気事故が発生し、その内、短絡事故は約 40% であった。

本報告は送電線の地震時振動特性の解析手順を検討し、事故の再現が可能なことを確認することを目的としている。

2. 電気事故発生箇所の特徴

東北地方太平洋沖地震に伴う電気事故の分析結果の中から、留意すべき事項は次の通りである。

- (1) 電気事故発生個所の鉄塔高：40～60m の事故発生率が高い。
- (2) 電気事故発生個所の径間長：300～400m の事故発生率が高い。
- (3) 電気事故発生の電線サイズ：電線サイズは断面積 240mm^2 以下～ 810mm^2 まで、事故発生に関して特徴は見出せないが、太サイズの方が若干遅く揺れ始めて、地震動の後まで揺れが続く傾向がある。
- (4) 地震発生から電気事故発生までの経過時間：東北地方太平洋沖地震時、現地での震動発生から 120 秒以降に電気事故が発生し、180 秒後までの間に約 90% の電気事故が発生している。

以上は発生件数から見たものであるが、解析結果はこの分析結果に整合することが必要と思われる。

3. 送電鉄塔・架渉線連成系に対する従来の地震応答解析の課題

通常の加速度入力の時刻歴解析を行う限り、短絡事故を再現するのは難しい。主な理由は次の通りである。

- (1) 径間 300～400m の電線 1 次固有周期は 5～7 秒。鉄塔 1 次固有周期は概ね（鉄塔高(m)/100）秒である。
- (2) 電線の 1 次モード 0.4% で剛性比例型減衰を用いることが多いが、高次モードの減衰が大きいので、地震動発生から 120 秒～180 秒に生じるような短絡事故に結びつく揺れが生じない。
- (3) 地盤特性など考慮して地盤バネを用い、仮によく揺れる条件を設定したとしても、隣り合う電線は同位相で平行に揺れるので、離隔が縮まらない。

隣り合う電線間の揺れに位相差をつけようとするのであれば、①不平均張力が働く場合、②腕金長さ、腕金配置などの非対称性により鉄塔に捩れ変形が生じる場合、③短径間かつ複雑な架渉線配置で鉄塔自体の揺れが複雑になり、結果として電線の揺れにも位相差が生じる場合、等が考えられる。しかしながら、これらの考慮により、電線間の離隔距離が縮まる傾向は見られるにもかかわらず、短絡事故発生箇所や発生時間などにおいて実態と一致しないのが実情である。

4. 短絡事故の解析モデルと解析方法

電気事故発生条件の特徴に従い、事故原因を究明するための解析モデルと解析方法は次のように設定する。

- (1) 同一の耐張型鉄塔（山形鋼鉄塔、塔高：44.5m（図-1））、水平角 0、垂直角 0 で、6 基 5 径間モデルとする。
- (2) 径間長は 300, 300, 370, 440, 440m、高低差は径間長の 5%、両端径間は境界影響除去のためのダミー（図-2）。
- (3) 電線は 66kV、鋼心耐熱アルミ合金より線系を想定し、断面積 690mm^2 、質量 2.198kg/m 、水平張力 29000N 、2 回線とする。地線は断面積 67.3mm^2 程度のより線を想定する。各径間内で電線・地線は 60 要素分割する。
- (4) 山形鋼鉄塔の減衰定数は 2%（剛性比例型）、電線の減衰定数は 0.4%（レイリー型（1.0sec., 5.0sec.））とする。
- (5) 地震応答解析は、重力下における静的釣合い状態を見出した後、時間刻み $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、大変形を考慮した時刻歴応答解析（Newmark の β 法、 $\beta=1/4$ ）で行い、時間刻み毎の離隔距離を算出する。

キーワード 送電線、送電鉄塔、地震動、短絡事故、非線形地震応答解析、地動変位
 連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野 3 丁目 3 番 3 号 東電設計株式会社電気本部
 TEL: 03-6372-5720 E-mail: h.nakamura@tepsco.co.jp

5. 鉄塔の固有振動特性と検討用地震波

鉄塔の固有周期：曲げ1次変形モード：0.41sec (2.45Hz)
 曲げ2次変形モード：0.13sec (7.50Hz)
 振り1次変形モード：0.087sec (11.4Hz)

電線1次モード：径間300m：6.50sec (0.154Hz)
 径間370m：7.22sec (0.139Hz)
 径間440m：7.87sec (0.127Hz)
 地線1次モード：径間440m：7.52sec (0.133Hz)

地震波は K-Net, 2011/03/11, YMN005

(甲府) NS (図-3) を用い、地震力は加速度入力と、地動変位入力(図-4)で位相差を与えた多点入力の両解析を試みる。

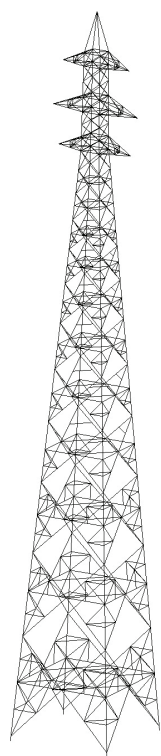


図-1 鉄塔単体

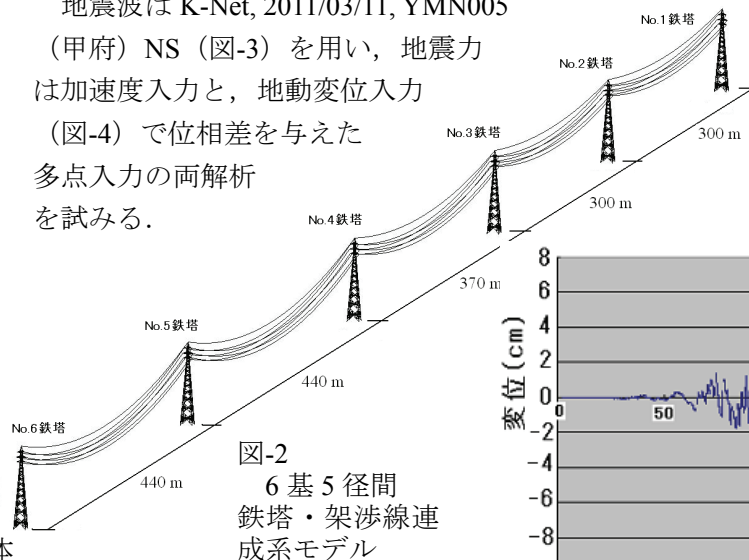


図-2
6基5径間
鉄塔・架渉線連
成系モデル

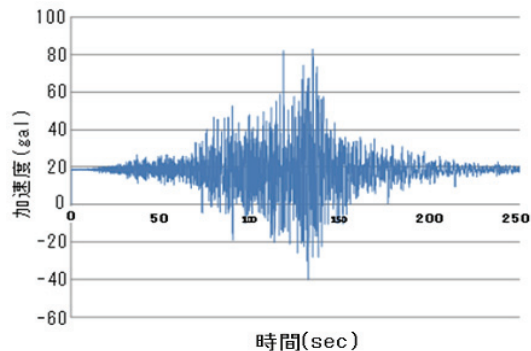


図-3 K-Net, 2011/03/11,
YMN005 (甲府) 加速度
波形 NS

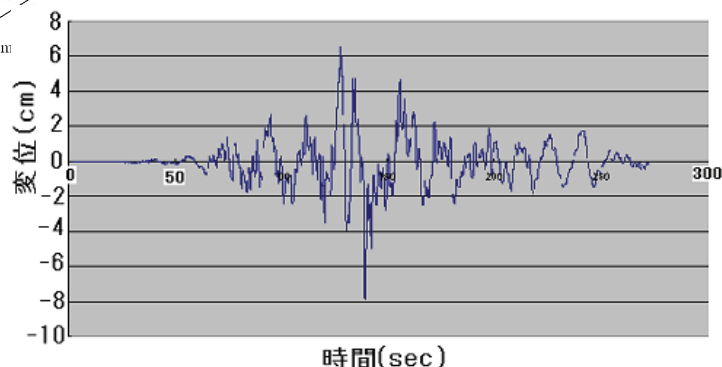


図-4 YMN005 地動変位波形 NS

6. 解析結果に基づく電線振動の考察

まず、通常の加速度入力で時刻歴応答解析して、電線の揺れが小さく、短絡に至る程ではないことを確認した後、全ての鉄塔最下部に同位相で地動変位を入力して応答解析を行った。両解析結果において変位が絶対変位と相対変位の違いはあるが、両方共全く同じ応答解析結果となることを確認した。次に河川横断箇所のような場合、地質構造が複雑で、送電線路の方向に位相差の生じることは考えられるので¹⁾、鉄塔毎の地動変位に位相差を付けた多点入力解析を行なった。位相差を0.1sec刻みで大きくして行くと、位相差数秒あたりまでは徐々に電線振動が増大し、短絡が起こりえることを確認した(図-5)。

電線は地震時にある程度地震動が継続してから揺れ始めて、地震動が終った後まで揺れ続ける。なお、鉄塔間の位相差が大きいほど電線の揺れが大きくなるということではない。また、水平張力、腕金位置の高低差、非対称な腕金配置、カウンターウェートの設置位置なども微妙に短絡要因となり得ることがわかった。

7. 結 び

本検討により、震源から遠い場所で、特に大きな地震動とは言えない状況下で短絡事故の起き得ることを確認した。ただし、地動変位に位相差のある2つの鉄塔を介して電線内に水平張力変化が生じ、電線に面内鉛直振動を引き起こす過程を理論的に明らかにする必要がある²⁾。この問題を解決することにより、短絡事故に対する有効対策が明らかになるものと思われる。解析結果の詳細は講演会当日に示す予定である。

参考文献 1) 土木学会：地震動のローカルサイトエフェクトー実例・理論そして応用一、2005., pp.215
 2) 土木学会：ケーブル・スペース構造の基礎と応用、鋼構造シリーズ 11, pp.80-84, 1999.

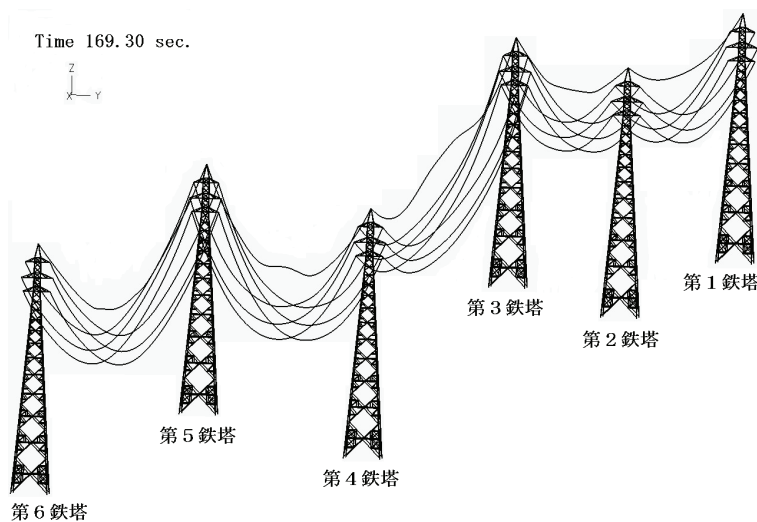


図-5 鉄塔・架渉線連成系の振動状況