

氏 名	Pham Viet Hung
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 950 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Extensive Analyses on Large Amplitude Gusty-Wind-Induced Vibrations of Overhead Transmission Line Systems (ガスト風に起因した架空送電線システムの大振幅振動に関する詳細解析)
論文審査委員	委員長 教授 山口 宏樹 委員 教授 奥井 義昭 委員 教授 松本 泰尚 委員 准教授 齊藤 正人

論文の内容の要旨

Large-amplitude wind-induced vibrations of ice-accreted/unaccreted conductors in overhead transmission lines are frequently observed in the field. Damages due to the large-amplitude wind-induced vibrations are costly and affect many aspects of the modern society. However, despite of many researches and applications, a numerous number of serious damages due to the large-amplitude wind-induced vibration have been observed in the transmission lines that is reported by TEPCO. Since 2002, our preliminary studies firstly pointed out that the causes of the unrealizable protection methods for minimizing vibration amplitude and avoiding damage might be a misunderstanding in characterizing the vibration type that could be a gust response or other unstable-phenomena as galloping.

An attempt is made to identify the large-amplitude-gust responses and to distinguish them from the unstable phenomena as galloping based on the field-observed vibrations of the transmission lines. An extensive method of combining the field-measured data analysis, eigenvalue analysis, and gust response analysis in both frequency and time domains is applied.

In the first chapter, highlights of the research topics, objectives, methodologies, transmission line systems and field measurement are presented. A brief description of the dissertation content is also given.

In Chapter 2, to have insight into the characteristics of gusty wind and dynamic responses in the field, the mean wind direction, mean wind velocity, wind turbulence intensity, RMS, MPPA, PSD, and time series of dynamic displacement response are first studied. In the preliminary interpretation, for example, the wind direction is taken into account in the comparison of RMS, MPPA, etc. and the turbulence intensities are analyzed to get idea of wind velocity fluctuations. The RMS, MPPA, time series give the essential information for understanding the characteristics of field-large-amplitude response of the overhead transmission line conductors. Based on the results of the parabolic trends of RMS, MPPA and the way of large amplitude development in the time, it can be preliminarily concluded that field-measured vibrations are possibly gust responses.

In Chapter 3, the dynamic characteristics of transmission lines are identified based on the eigenvalue analysis. Finite element models (FEM) of the three transmission line systems are created in FEMAP with NX Nastran computing

software. In creating the FE model of the transmission line system, one of the most important parts is to find out the appropriate static equilibrium configurations of the conductors subjected to the body loads. Therefore, to solve this nonlinear problem, an iterative algorithm is proposed to obtain appropriate FE models. Then eigenvalue analysis is conducted. The results of natural frequencies and mode shapes are used for interpreting the field-measured vibration and are incorporated with the gust response analysis.

In Chapter 4, for the further interpretation, the frequency-domain gust-response analysis is conducted based on the buffeting theory, the result of eigenvalue analysis and the field-measured data. Both the vibrations of conductor at mid- and quarter-spans, and jumper in the three lines are studied. Firstly, spectra of the wind-field turbulence are obtained by using the Fast-Fourier-Transform. Then, in the frequency domain, the resonant dynamic response of the transmission line in the particular modes is determined based on Davenport's approach. The RMS of the buffeting theory-based vibration response is compared with the RMS of the measured-vibration response for assessing characteristics of the measured-vibration response. It is found that almost cases of the comparison show a good agreement. In detail, the PSD and vibration-time series of both typical events (good agreement) and particular events (scattering datasets) are analyzed. From the reasonable agreement between the analytical and measurement in RMS and PSD comparison, this chapter confirms that most of the field-measured vibrations could be the gust response. There might be a possibility of the galloping phenomena in some cases and more vivid interpretation for identifying the galloping is required in the future.

In Chapter 5, for the further study about the nonlinear characteristics of the large-amplitude gust response, the time-domain gust-response analysis is considered. A significant feature of this approach is that the time-dependent characteristics of the unsteady-aerodynamic forces and nonlinearities of the both aerodynamic and structural origins are taken into account. In the time-domain analysis of the transmission line, the accuracy of the analysis results depends significantly on the FE model of the transmission line and the wind field model. Because it is difficult to obtain the time series of wind velocity at all nodes of the conductor in the site, the wind field applied on the transmission line model is simulated based on the measured-wind velocity data by using the spectral representation technique. Different from the one-dimensional structures such as bridge, the two-dimensional cable structure with an enormous number of nodes and elements makes the wind-field simulation to be more complicated. To deal with this issue, the grid of finite locations of the wind-time series that covers all the nodes of the conductor bundle is used. Based on the measured-wind record at the reference point (top of tower), the mean wind at each grid point is obtained by using the power law theory with the consideration of the terrain condition and the turbulence spectra is obtained based on the fitted cross-spectra and the cross-spectral-density matrix. Then, the FE model of transmission line that is subjected the wind-force model is analyzed in NX Nastran computing software. Both the basic and advanced (aerodynamic analysis) NX Nastran solvers are employed to simulate the vibration response of the conductor bundle. The time-series-vibration comparison of measurement and simulation is conducted to investigate the nonlinear characteristics of the large-amplitude-gust response that is developed in the time domain. The result is usable in designing and controlling damage due to the large-amplitude response.

Chapter 6 shows the essential conclusions and recommendations. Based on long-time-field observations in the different types of transmission line systems, the current analysis is a first extensive study on finding the causes of the recently-field-observed damages in the long-span large-bundled conductor transmission line systems. The most meaningful objective of this study is to confirm that the large-amplitude field-measured vibration is the gust response. The gust responses can be approximately large to cause the damages in the overhead transmission lines. The confirmation blasts the embroilment in identifying properly the vibration characteristics and making a right decision in the designing and application. The results could be also a good reference for the design code as well as the vibration control for minimizing large-amplitude-vibration.

論文の審査結果の要旨

架空送電線システムにおける導体の風応答振動は、着氷雪の有無によらず、現場において頻繁に観察され、大振幅振動をもたらす電氣的大事故は現代社会生活に多大な影響を及ぼしてきた。これまでに極めて多くの研究がなされてきてはいるものの、送電線の大振幅風応答振動は未だに多種多様な機械的損傷を構造部材等にもたらしている。

このような背景にあって、本論文では、実送電線の風応答観測データを詳細に解析することにより、不安定現象であるギャロッピングとは異なる、ガスト風に起因した大振幅振動に着目してその振動の性質を特定することを試みている。

本論文は全6章から成り、第1章では序論として、研究の背景、目的および概要を示している。

第2章では、解析対象とした送電線、計測方法、計測された風及び振動の概要を説明した後、その基本的な特徴を把握する目的で、計測データから平均風速、風の乱れの強さ、応答のRMS値（平均振幅）、最大応答振幅、スペクトルを求めて考察を加えた。対象とした送電線は1スパン8導体、ジャンパー線を有する2スパン4導体、3スパン2導体の送電線3種類であり、データ解析の結果、観測された風応答のほとんどはガスト応答である可能性が高いことが推論された。

次に第3章では、対象とした3つの送電線システムの構造振動特性を把握するため、固有振動解析を行った。解析には汎用有限要素解析コードFEMAP/NX Nastranを用い、送電線システムを、有限要素法をベースとして適切にモデル化している。吊り構造である送電線の解析モデルの作成に当たって最も重要なことの一つとして、死荷重による静的つり合い形状の再現がある。本論文では、弾性カテナリー理論を併用した、有限要素モデルでの静的つり合い状態作成アルゴリズムを導入し、その効率化と高精度化を図っている。固有振動解析の結果としての固有振動数は、2章で求めた風応答振動のスペクトルピークとほぼ一致しており、解析の精度は十分であると考えられた。

第4章においては、3章での固有振動解析結果を用いて、周波数領域でのガスト応答解析を行い、振動応答のパワースペクトルおよびRMS値についてガスト応答解析結果と計測データ解析結果とを比較して考察を加えている。周波数領域のガスト応答解析は、計測データからの風速パワースペクトルを入力として、空力アドミッタンスを介して空気力のパワースペクトルに変換、風速の空間相関を加味したジョイントアクセプタンス、および固有振動解析結果を反映した機械的アドミッタンスを乗じて応答のパワースペクトルを求めるものであり、解析の中では多くのパラメータについて仮定する必要がある。本論文ではそれらのパラメータ値の取り得る範囲を詳細に分析した上で適切に仮定し、ガスト応答解析を行った。その結果、ほとんどの解析結果は計測結果と良い一致を見ており、3つの異なる送電線で観測された大振幅風応答振動はガスト応答の可能性が高いと結論された。なお、両者に差があるケースについては、計測振動データの時刻歴を確認したところ、その発達過程からギャロッピング振動と思われるものも散見されたが、このことに関しては今後、より詳細な解析が必要である。

さらに第5章では、時間領域でのガスト応答解析（シミュレーション）を試みている。これは、周波数領域解析では風や応答の定常性を仮定することから、平均風速の大きく急速な変化に対する準静的な振動といった非定常応答を表し得ないこと、自励空気力のような非線形現象を扱い得ないことによる。

本論文では、時刻歴応答シミュレーションの第1段階として、空間相関を加味して空間に分布した自然風をシミュレートし、自励空気力を無視した空力減衰のみを考慮したガスト応答解析を試みて、定常風応答はある程度再現することが可能となった。しかし、非定常解析には至っておらず、したがって非定常な計測結果と整合する解析結果は得られていない。そこで、時間領域での送電線のガスト応答解析における仮定や問

題点を整理し、今後の解析的研究に資する考察を示した。

以上の研究成果を基に、第6章では、各章で得られた結論を要約し、今後の展望とともに研究全体としての結論をまとめている。

以上のように、本論文は、形式の異なる3つの架空送電線システムを対象とし、実際のガスト風下で計測された風速・振動計測データを基として、有限要素法に基づく固有振動解析、周波数領域でのガスト応答解析、時間領域での風応答シミュレーション解析を行い、計測データとの比較から、その振動特性や発生メカニズムを精緻かつ多角的に検討して、多くの知見を得たものである。その成果は、今後の送電線の風応答対策や維持管理問題の解決に寄与するものであって、構造工学上、および耐風工学上貢献するところが大きい。よって本論文は博士（学術）の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。

なお、本論文での成果は、審査制度のある国際学術誌に1編（Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 126, pp.48-59, 2013）、査読付きの国際会議論文2編（Proc. of 9th Int. Symposium on CABLE DYNAMICS, 2011, Proc. of 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013）にて発表していることを付記する。