

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06219

研究課題名(和文)分散電源・能動的負荷を含む配電系統の動特性モデル構築法と安定度計算への応用

研究課題名(英文) Dynamic modelling of distributed power system including active load and its application to stability analysis

研究代表者

白井 康之 (Shirai, Yasuyuki)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60179033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：分散型電源の系統連系や自動制御を含んだパワーエレクトロニクス機器の増加に伴い、配電系統の特性が動的かつ複雑になっている。本研究では、系統に対して微小な擾乱を意図的に注入し、それに対する電圧、位相、電力潮流などの応答データをもとに、配電系統全体を伝達関数モデルとしてシステム同定し動特性を把握する、微小擾乱注入手法を提案してきた。この得られた伝達関数を用いて、従来の定態安定度解析手法(固有値解析)に組み込むことで、動的負荷を含む電力系統の定態安定度を定量的に評価する手法を提案し、無効電力補償装置(SVC)を含んだ一機無限大母線系統に適用してその妥当性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電に代表される分散型電源の系統連系や自動制御を含んだパワーエレクトロニクス機器の増加に伴い、配電系統の特性が動的かつ複雑になっている。不確定要素が多くなった系統では、安定度余裕を大きめにとる必要があるため、再生可能エネルギー導入量が制限されることになっている。本研究では、系統オンラインデータからシステム同定によって配電系統の動特性を伝達関数モデルとして表現し、従来の定態安定度解析手法(固有値解析)に組み込むことで、動的負荷を含む電力系統での定態安定度を定量的に評価する手法を提案し、その妥当性を明らかにした。これによってより精度の高い安定度評価が可能となり、柔軟な系統運用が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In the past, power system stability evaluation has been performed by using static load models. Recently, however, the rate of active and dynamic electric equipment such as energy storage devices, dispersed generators and inverter fed loads in distribution system has increased. In such situation, an evaluation method is needed to grasp the dynamic characteristic of distribution system appropriately. Therefore, a new method for evaluating the dynamic characteristics of distribution system from on-line measured data was proposed.

A dynamic load model is obtained as a transfer function between the terminal voltage, angle and the active and reactive power. The transfer function is introduced to the state equation of the whole power system and the eigen-value analysis is applied on the equation to evaluate the power system stability.

The proposed method was demonstrated using commuter simulation to evaluate the control function of an SVC installed in a distribution network.

研究分野：電気機器工学、電力工学

キーワード：配電系統 動特性 系統安定度 分散電源 固有値解析 系統モデル

### 1. 研究開始当初の背景

従来、電力系統の解析においては、負荷特性は端子電圧および周波数に対する静的な応答特性による分類から、定電力、定電流、定インピーダンス負荷特性を想定し、一般的にこれらの混在したものとして模擬している。しかし、安定度解析などでは、広い周波数成分を持った電力動揺に対して、負荷のダイナミックな応答特性すなわち動特性が安定性に大きく影響を与えることが指摘され、特に誘導機負荷など回転系のエネルギーを持つ負荷の割合を考慮した動特性モデルが提案されている。これらのモデルの基礎データは、系統操作時や事故時などの過渡的な擾乱が生じたときの計測結果を用いたもので、十分とは言えない。

近年、一般的な受動的負荷や誘導機負荷ばかりでなく、パワーエレクトロニクス応用負荷、種々の分散電源、蓄電設備などが導入され、これらが能動的に電圧制御や電力制御に参画する機能を持つようになるなど、配電系統はますます複雑化してきている。さらに、分散電源の大量導入により、系統事故時の大量脱落を防止する機能（FRT 機能）を持つ電源が増加し、系統安定度には分散電源などの制御機能が大きく影響を与える状況になりつつあり、負荷の動特性評価の重要性が増している。また、負荷は、日、週、季節で変動するもので、それぞれの時間断面で系統的なモデル構築が行えることが重要である。

### 2. 研究の目的

太陽光発電に代表される分散型電源の系統連系や自動制御を含んだパワーエレクトロニクス機器の増加に伴い、配電系統の特性が動的かつ複雑になっている。その状況下でも電力を安定供給し続けるためには、配電系統の動特性を精度よく把握する事が必要とされる。今までに、配電系統の動特性を把握するための手法として微小擾乱注入手法を提案・研究してきた。これは、電力系統に対して悪影響を与えない程度の微小な擾乱を意図的に注入し、それに対する電圧、位相、電力潮流などの応答データをもとに、配電系統全体を伝達関数モデルとしてシステム同定する手法である。この微小擾乱注入手法を用いたシステム同定の実証が行ってきた。本研究では、無効電力補償装置(SVC)を含んだ一機無限大母線系統において、システム同定による動的負荷モデリング手法と、従来の定態安定度解析手法（固有値解析）を統合することで、動的負荷を含む電力系統での定態安定度を定量的に評価する手法を提案し、その妥当性を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1)システム同定

システム同定とは、動的システムにおいて実測された入出力データから目的に合った観点においてそのシステムと等価な数学モデルを構築する手法である。今回は、同定対象とする電力系統を Fig.1 のような出力誤差モデルの伝達関数で表す。電圧  $V$ , 位相  $\delta$  を入力、有効電力潮流  $P$ , 無効電力潮流  $Q$  を出力とした 2 入力 2 出力モデルとなっている。

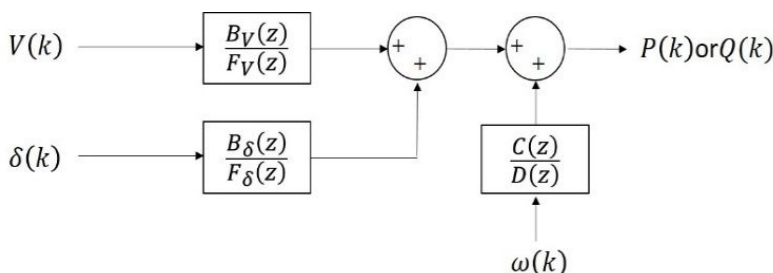


Fig.1 Transfer Function Model

#### (2)微小擾乱注入

発電機と無限大母線の間、0.1 pu の送電リアクトルを含み経路の途中に SVC が備えられた系統である。電力注入装置(Power Injection Device)から微小な有効・無効電力変動を注入し、測定点 A における  $V, \delta, P, Q$  の時間変動を測定する。この変動データから、上述の伝達関数モデルを同定する。注入する変動信号としては、時間領域で連続かつ、必要帯域の周波数を広く含むものが望ましく、式(1)で表されるチャープ信号を用いた。ただし  $P_0$ : 振幅[pu],  $T$ : 注入時間[s],  $f_{max}$ : 最大周波数[Hz],  $t$ : 時刻[s]である。

$$P = P_0 \sin \frac{2\pi f_{max} t^2}{T} \dots \dots \dots (1)$$

(3)固有値解析

従来の定態安定度解析手法である固有値解析では、まず電力系統全体を同期発電機、送電網、負荷等に分割し、その特性を状態方程式の形に記述し、適当な状態変数の下、統合することにより一つの式(2)のような状態方程式として表すものである。ただしx:各特性の状態方程式である。

$$\frac{dx}{dt} = [A]x \dots \dots \dots (2)$$

行列[A]の固有値を調べることで、システムの振動モードを定量的に知ることができる。説明は割愛するが、固有値の実部が負であれば、システムは安定し、システムの減衰率を表し、虚部は固有の振動周波数を表す。今回は、システム同定により求められたモデル対称の特性を示す状態方程式を同期発電機の一つのように扱うことで固有値法に組み込んでいる。

4. 研究成果

4.1 モデル系統

本実験で用いた実験系統の構成を Fig.2 に示す。

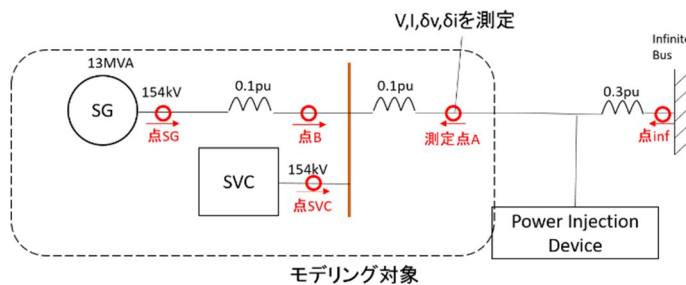


Fig.2 power system circuit

実験系統に用いた同期発電機は定格容量 13 MVA、定格出力電圧 154 kV であり、これを本系統のベース量とする。この発電機は励磁電圧制御の AVR,周波数制御のガバナを有している。注入する擾乱信号は、最大周波数 3 Hz,振幅 0.005 pu とし、有効、無効電力の順にそれぞれ 60 s 注入する。また、想定する自励式 SVC は、無効電力出力により電圧降下を抑制する AVR 機能を模擬しており、構成は Fig.3 のようになっている。

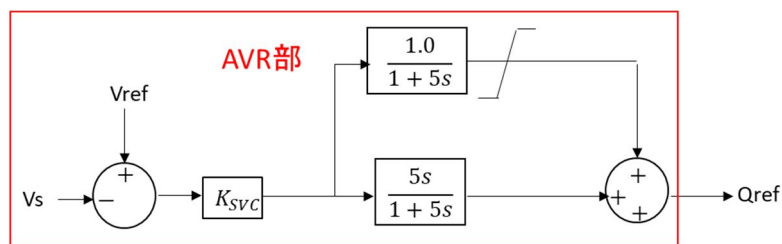


Fig.3 SVC AVR Model

本実験では、Table.1 のケースについて、実際の $\Delta I_D, \Delta I_Q$ 出力（実出力）と実際の $\Delta V_D, \Delta V_Q$ 入力（モデル出力）の時間変化データを作成したモデルに通したときの $\Delta I_D, \Delta I_Q$ 出力（モデル出力）を比較し、モデル化精度を検証した。ただし、 $K_{SVC}$ とは SVC の AVR 部のゲインである。その後、固有値解析を行い、各ケースの違いが系統にどう影響するのかを検証した。

Table.1 Experiment case

Case	$K_{SVC}$	$\Delta chirp[pu]$
0	SVC なし	0.001
1	0.25	0.005
2	0.5	0.005

## 4.2 結果及び考察

### (1) 実出力とモデル出力の比較

紙面の都合上、Case1,2 での $\Delta I_D$ の比較のみ Fig.4 に示す。実出力が青線、モデル出力が緑線で表され、ほぼ完全に一致していることからモデル化精度が高いと確認できる。

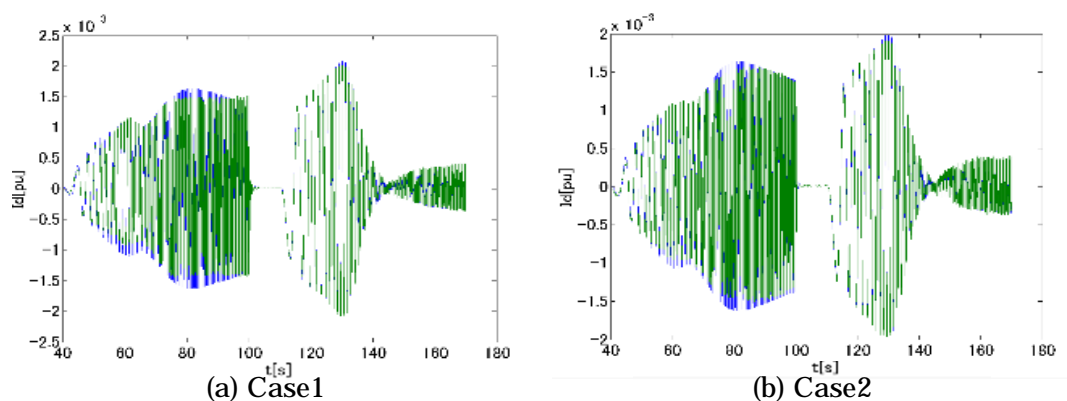


Fig.4  $\Delta I_D$  Comparison

### (2) 固有値解析

今回は数十個算出される固有値のうち、振動周波数(Hz)を表す虚部の値が、電力系統の固有周波数である 0.8~2 Hz 程度の値をとるものの中でも実部の絶対値が最も小さい固有値を採用し、Fig.5 に各ケースの固有値の実部の比較を、Fig.6 に虚部の比較を示す。

実部が負の値をとっていることから系が安定していると分かる。SVC の特性は、同期化力を向上させ、制動力を低下させる。このとき系統の振動の特性としては減衰率が下がり、振動周波数が高くなる<sup>(3)</sup>。Case0,1 の比較から実部の絶対値は低下し、虚部が増加しているの、この特性を反映しているといえる。また、SVC の AVR 部のゲインを上げることで、AVR の効果が強くなり、系統の同期化力が大きくなる。このとき系統の振動の特性としては系統の振動の周波数が上がる一方で、減衰率にはほぼ影響しない<sup>(3)</sup>。Case1,2 を比較すると虚部が大きく増加し、実部はあまり変化していないので、この特性を反映しているといえる。

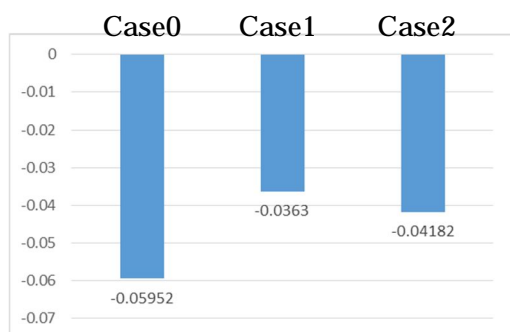


Fig.5 Real part of the eigenvalue

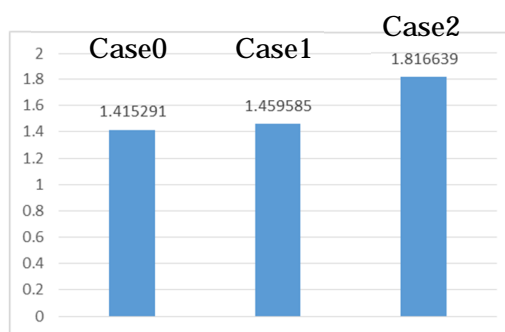


Fig.6 Imaginary part of the eigenvalue

### (3) まとめ

単純な一機無限大母線に SVC が具備されたような系統モデルにおいて、微小擾乱注入手法を用いた定態安定度評価の妥当性を調べた。固有値の変化から、AVR ゲインの大きさの変化による影響等で妥当性がみられ、結果、提案手法が SVC を要素として含む部分系統に対しても適用可能であることが示せた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 松本 航輝, 西村 大貴, 白井 康之: "システム同定を用いた配電系統動特性評価のシミュレーションによる検討", 電気学会全国大会, 九州大学 2018
2. 松本 航輝, 西村 大貴, 白井康之: "システム同定を用いた電力系統の固有値法に基づく動態安定度解析", 平成 30 年電力・エネルギー部門大会, P57, 徳島大学, 2018 年 9 月 11 日
3. 西村 大貴, 井上 大輔, 白井康之: "模擬電力系統を用いたシステム同定による動的負荷モデリングの検討", 平成 29 年電力・エネルギー部門大会, P56, 明治大学, 2017 年 9 月 5 日
4. Daisuke INOUE, Koji NISHIGUCHI, Daiki NISHIMURA and Yasuyuki SHIRAI: "Experimental Study of Dynamic Modeling of Distribution System with System Identification", 3-A-90152, ICEE 2016 Okinawa (The International Conference on Electrical Engineering 2016), Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan, (3-7, July, 2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。