

A-2-19

# 誘導発電機で構成される電力ネットワークの 集団ダイナミクスに関する数値的検討

A Numerical Study on Collective Dynamics in a Power Network of Induction Generators

薄 良彦  
Yoshihiko Susuki

星野 光  
Hikaru Hoshino

引原 隆士  
Takashi Hikihara

京都大学 Kyoto University

## 1. 概要

結合振動子系の力学は、サイエンス及び工学両方の観点から注目を集めている。筆者らは、先行研究 [1,2] に基づいて、多数の同期発電機で構成される電力ネットワークの集団ダイナミクスを結合振動子系を用いて解析し、発電機群の集団不安定化現象を示した [3]。本報告では、誘導発電機で構成される電力ネットワークの集団ダイナミクスを記述する数学モデルを解析し、[3] と類似した不安定化現象が発生することを示す。なお、誘導発電機で構成される電力ネットワークはウィンドファームのモデル [4] とみなされ、本解析は近年の再生可能エネルギーへの注目の高まりから実用的意義を有している。

## 2. 数学モデル

図1の誘導発電機  $N$  機が送電線を介して無限大母線に連系された電力ネットワークを考える。文献 [5] で導出されている誘導機のダイナミクスを表す数学モデルと図1の電力ネットワークの回路解析の結果から、図1の電力ネットワークに生起する電気機械的ダイナミクスは式 (1) で記述される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_d' &= \varepsilon \{A_0 v_d' + b_d\} + A_1(\omega_r) v_q' \\ \dot{v}_q' &= \varepsilon \{A_0 v_q' + b_q\} - A_1(\omega_r) v_d' \\ \dot{\omega}_r &= \varepsilon \{\tau_e(v_d', v_q') - \tau_m\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

左辺のドット (  $\cdot$  ) は変数の時間微分を表す。  $v_d'$ ,  $v_q'$  及び  $\omega_r$  は、それぞれ発電機  $\#i$  の  $d, q$  軸の背後電圧  $v_{di}', v_{qi}'$  及び回転子の角速度  $\omega_{ri}$  を成分とするベクトルである:  $v_d' \triangleq (v_{d1}', \dots, v_{dN}')^T$ ,  $v_q' \triangleq (v_{q1}', \dots, v_{qN}')^T$ ,  $\omega_r \triangleq (\omega_{r1}, \dots, \omega_{rN})^T$  ( $T$  はベクトルの転置を表す)。  $A_0$ ,  $b_d$ ,  $b_q$  及び  $\tau_m$  は図1のネットワーク構成及び誘導機の仕様により決まる定数行列及びベクトルである。  $A_1$  は変数  $\omega_{ri}$  を要素に含む対角行列であり、  $A_1 = \text{diag}(\omega_s - \omega_{r1}, \dots, \omega_s - \omega_{rN})$  で与えられる。  $\omega_s$  は回転子の同期速度であり、  $\omega_s = 1.0$  となるように式 (1) 中の変数及びパラメータを単位化している。  $\tau_e$  は発電機  $N$  機の電気的出力を表すベクトル値関数である。  $\varepsilon$  は発電機回転子の電気的過渡現象の時定数及び誘導機の単位慣性定数により決まる正の定数であり、本解析では1より十分小さい。このことから、式 (1) で記述される力学系は、  $v_d'$  及び  $v_q'$  を速い変数、  $\omega_r$  を遅い変数として有する特異摂動系とみなされる。

## 3. 数値計算結果及び議論

図2に  $N = 8$  とした場合の電力ネットワークの集団ダイナミクスの一例を示す。全ての発電機の動作点が安定平衡点に存在する条件下で、局所的擾乱として発電機  $\#1$

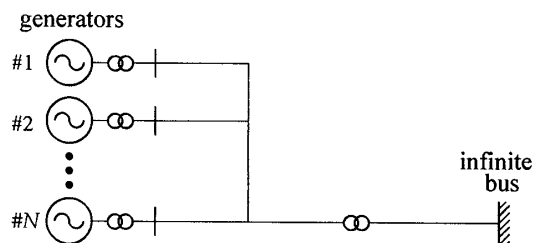


図1 誘導発電機で構成される電力ネットワーク

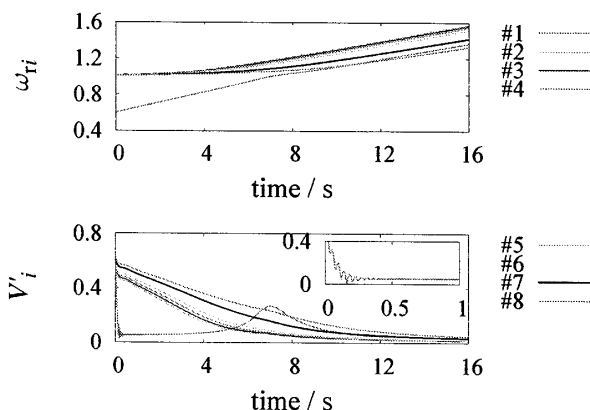


図2 局所的擾乱に対する電力ネットワークの集団ダイナミクス

に関する回転子角速度  $\omega_{r1}$  の初期条件を  $\omega_{r1}(0) = 0.60$  と設定した場合の角速度  $\omega_{ri}$  及び背後電圧の振幅  $V_i' \triangleq (v_{di}'^2 + v_{qi}'^2)^{1/2}$  の時間変化を示している。初期条件及び式 (1) の構造から、局所的擾乱は遅い変数  $\omega_{ri}$  の変化として加わり、それが速い変数の時間変化を生み、引き続いて遅い変数の時間変化を生む。この繰り返しにより、各発電機に局所擾乱の影響が波及し、最終的には全ての発電機回転子の角速度がコヒーレントに増加し、背後電圧の振幅が低下する。上述の角速度のコヒーレントな増加及び電圧振幅の低下は電力ネットワークにとって好ましくない現象であり、筆者らが文献 [3] で示した同期発電機の集団不安定化現象と類似したものである。なお、不安定化現象の発生メカニズムは今後の検討課題である。

## 参考文献

- [1] I. Mezić, PNAS **103** (20) 7542–7547 (2006).
- [2] P. Du Toit *et al.*, Physica D **238** 490–501 (2009).
- [3] Y. Susuki *et al.*, J. Nonlinear Sci., **21** (3) 403–439 (2011).
- [4] A. Radunskaya *et al.*, IEEE T. Power Syst., **23** (2) 657–663 (2008).
- [5] P. Kundur, Power System Stability and Control (McGraw-Hill, 1994) pp. 279–305.