状態故障評価行列を用いた 電力ネットワークにおけるサイバー攻撃・故障の診断

藤田 佑樹*・大川 佳寛*・滑川 徹**,**

Diagnosis of Cyber Attacks and Faults in Power Networks
by Using State Fault Diagnosis Matrix

Yuki FUJITA*, Yoshihiro OKAWA* and Toru NAMERIKAWA**,**

This paper discusses cyber attacks and faults diagnosis method for networked electrical power systems. A power system is divided into some areas, then phase angles and angular frequencies are estimated by Kalman filter in each area. Then we propose a diagnosis method for the power grid by using state and output fault diagnosis matrices which are composed of the estimate value and output matrix. These diagnosis matrices can immediately reflect an existence or non-existence of abnormal signal. Finally we show simulation results to analyze effectiveness of the proposed method.

Key Words: power network, cyber attack diagnosis, fault diagnosis matrix, Kalman filter

1. はじめに

主要インフラの管理にはサイバー攻撃をも想定した積極的な防衛機能の構築が必要不可欠である。主要インフラの1つである電力ネットワークにおいてもこの機能は近年さらに重要性が増しており、特に地震が頻発する日本においては、サイバー攻撃のみでなく自然災害の擾乱による故障の検出、診断も課題となっている。原子力発電所の稼働率低下に伴い現在積極的に議論されている次世代電力ネットワーク(スマートグリッド)の影響を考慮すると、電力ネットワークに対するセキュリティ向上に関する技術開発は危急の課題となっている^{1)~3)}。

電力ネットワークに対するサイバーアタックや故障の診断手法は、現在までにさまざまなものが提案されてきた。診断手法の例としては、電力システムをディスクリプタシステムとして扱い、異常信号を集中的に検出・識別する手法^{4),5)}を挙げることができる。しかし、今後ますます電力システムの高度化、複雑化が想定される今、診断はより分散的に行なわ

れるべきである。実際に、分散制御の観点から電力システムにアプローチする研究が近年盛んに行なわれている⁶⁾。このような背景から、サイバー攻撃・故障の検出を分散的に行なう手法も提案されており、代表的な手法としてはオブザーバを利用した Fault Detection and Isolation (以下 FDI) フィルタを用いた手法などが挙げられる^{7)~11)}。文献7)では FDI フィルタを用いた異常検出手法が提案されており、文献8), 9)では FDI フィルタが存在する必要十分条件、文献10)では分散型 FDI フィルタが存在するための条件がそれぞれ明らかにされている。また文献11)では分散型 FDI フィルタを用いて隣接ノード情報のみを利用した異常検出手法が提案されているが、状態側に異常信号が付加された場合のみの議論になっており、出力側に関する議論が十分ではない。

このような背景から、本稿では複数の発電機から構成される大規模ネットワークにおいて、サイバー攻撃および物理的故障による攻撃・故障信号が状態と出力のどの部分に付加されているのかを分散的かつ独立的に診断する手法を提案する。また本稿ではサイバー攻撃を共有情報の改竄や悪用、発電機に対する発電量の調整信号の改竄^{12),13)}などを想定している。本提案法では付加された攻撃・故障信号をオンラインで即座に検出するために、まず電力システムをいくつかのエリアに分割し、各エリアにおいてカルマンフィルタを用いて状態推定を行なう。つぎに、この推定値や出力行列などを適切に組み合わせることで、故障評価行列という行列を定義する。この故障評価行列は、状態および出力のそれぞれに対して個別に定義され、本稿ではそれぞれ、状態故障評価行列、出力故障評価行列¹⁴⁾と呼ぶ。この二種類の故障評価行列により、状態お

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

*** (独) 科学技術振興機構, CREST 川口市本町 4-1-8

* Graduate School of Science and Engineering, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

** Faculty of Science and Engineering, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

*** JST, CREST, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi

(Received December 28, 2012)

(Revised July 16, 2013)

よび出力に対する異常信号をそれぞれ独立的に診断することが可能となる．この故障評価行列は，異常信号が外部から付加された場合，即座にその異常の大きさを自身の対角項の大きさに反映する．そこで，本手法ではこの故障評価行列の対角和に対して閾値を設け，閾値内ならば正常，そうでなければ異常であると診断する．この閾値は，出力故障評価行列では定数としているが，状態故障評価行列では診断遅延時間を短縮するため動的に決定している．最後に，提案法の有効性をシミュレーション 1 および 2 で検証する．シミュレーション 1 では状態に対してステップ状の異常信号を付加し，これを状態故障評価行列および閾値の動的決定によって診断する．シミュレーション 2 では出力に対して同様の異常信号を付加し，これを出力故障評価行列を用いて診断する．

2. 問題設定

一般的に電力ネットワークに内在する N 機ある発電機のうち， j 番目の発電機の動揺方程式は (1) 式で表わすことができる．

$$M_j \ddot{\delta}_j(t) = P_{mj}(t) - D_j \dot{\delta}_j(t) - P_{ej}(t), \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

ここで，発電機 j の慣性定数を M_j ，相角偏差を δ_j ，機械入力を P_{mj} ，ダンピング定数を D_j ，電気出力を P_{ej} としており，また各値は単位法を用いて表わすものとする．

電力ネットワークは無数の発電機，変電所，需要家などの動的負荷および送電線によって形成されるが，本稿では Fig. 1 のような N 機の発電機ノードと M 機の母線から構成される電力ネットワークを L 個のエリアに分割したシステムを対象とする．

Fig. 1 Partition of IEEE 118 bus system into L areas

Fig. 1 の電力システムに対してつぎの仮定 1 を置く．

[仮定 1]

- i. 超高压送電により送電損失が零とみなせる．
- ii. 隣接ノード間の相角偏差は十分小さい．

ここで，負荷は一般のモーター負荷を想定しており，それ

ゆえ母線を含んだすべてのノードが動揺方程式によって支配される．したがって仮定 1 が成立するとき，ノード j の動揺方程式は (1) 式を変形して次式のように表わすことができる．ただし， $j \in \{1, 2, \dots, N + M\}$ である．

$$M_j \ddot{\delta}_j + D_j \dot{\delta}_j = P_{mj} + P_{in,j} - \sum_{l \in \mathcal{N}_j} |V_j| |V_l| B_{jl} (\delta_j - \delta_l) \quad (2)$$

上式において $\mathcal{N}_j$ はノード j の近傍， $|V_j|$ はノード j の電圧， B_{jk} はノード jl 間のサセプタンスである．また $P_{in,j}$ は他エリアからの電力流入量を表わしており，ノード j が他エリアと接続していなければ 0 である．(2) 式の動揺方程式を各エリアごとにまとめ，離散時間線形時不変システムとして表現すると，エリア i のシステムは次式となる¹⁵⁾．ただし， $i \in \{1, 2, \dots, L\}$ である．

$$x_{k+1}^i = A^i x_k^i + B^i u_k^i + w_k^i + E_k^i h_k^i \quad (3)$$

$$y_k^i = C^i x_k^i + v_k^i + F_k^i g_k^i \quad (4)$$

ただし，エリア i に存在するノード数を $|i|$ とすると， $x^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ ， $A^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$ ， $B^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$ ， $u^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ は，ノード $j \in \{1, \dots, |i|\}$ を用いて次式で与えられる．

$$x_j = \begin{bmatrix} \delta_j & \omega_j \end{bmatrix}^T, x^i = \begin{bmatrix} x_1^T & \dots & x_{|i|}^T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$A^i = (M^i)^{-1} \left(D^i - W^i \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

$$m_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & M_j \end{bmatrix}, M^i = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & m_{|i|} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$d_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -D_j \end{bmatrix}, D^i = \begin{bmatrix} d_1 & & \\ & \ddots & \\ & & d_{|i|} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$W_{(s,t)}^i = \begin{cases} \sum_{t \in \mathcal{N}_s} |V_s| |V_t| B_{st} & t = s \\ -|V_s| |V_t| B_{st} & t \in \mathcal{N}_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_j = \begin{bmatrix} P_{in,j} & P_{mj} \end{bmatrix}^T, u^i = \begin{bmatrix} P_1^T & \dots & P_{|i|}^T \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$B^i = M^{i-1} B', B' = \text{diag}[b, \dots, b], b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで， ω_j は角周波数であり，また，出力行列 C^i は単位行列である． $w_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ はプロセス雑音で (1) 式の動揺方程式を (2) 式のように表現した際に生じるモデル化誤差や負荷変動の影響などを想定しており，正規分布に従う共分散行列 $W^i \geq 0$ ，平均 0 の白色雑音過程とする． $v_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ は状態の観測時に加わる観測雑音で正規分布に従う共分散行列 $V^i \geq 0$ ，平均 0

の白色雑音過程である。そして、 $E_k^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$, $h_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$, $F_k^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$, $g_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ がそれぞれ状態と出力に対するサイバー攻撃や故障信号を表わしており、これらはガウス性の白色雑音とは限らない。本稿においては、これらの信号を観測環境の急激な変化に伴う出力へのバイアス付加や、共有情報の改竄や悪用などのサイバー攻撃による状態量変化と想定する。仮に $F_k^i g_k^i > 0$ の場合、これは時刻 k においてエリア i のいずれかのノードに異常信号が付加されることを意味する。

以上によってモデル化された電力システム (3), (4) 式に対して以下の仮定を設ける。

[仮定 2]

- i. $\mathbb{E}[v_k^i v_s^{iT}] = \mathbb{E}[w_k^i w_s^{iT}] = 0 \quad (k \neq s)$
- ii. $\mathbb{E}[v_k^i w_s^{iT}] = \mathbb{E}[v_k^i h_s^{iT}] = \mathbb{E}[v_k^i g_s^{iT}] = \mathbb{E}[w_k^i h_s^{iT}] = \mathbb{E}[w_k^i g_s^{iT}] = 0$
- iii. $\mathbb{E}[x_0 v_s^{iT}] = \mathbb{E}[x_0 w_s^{iT}] = \mathbb{E}[x_0 h_s^{iT}] = \mathbb{E}[x_0 g_s^{iT}] = 0$
- iv. $\mathbb{E}[\{h_k^i - E(h_k^i)\} \{h_k^i - E(h_k^i)\}^T] = H_k^i \geq 0$
 $\mathbb{E}[\{g_k^i - E(g_k^i)\} \{g_k^i - E(g_k^i)\}^T] = G_k^i \geq 0$

[仮定 3]

- i. $(A^i, W^{i\frac{1}{2}})$ は可到達
- ii. (C^i, A^i) は可検出

仮定 2 はプロセス雑音、並びに観測雑音の白色性に起因する性質および、これらの雑音と異なる特性を有した故障信号の性質についてまとめたものである。本稿ではカルマンフィルタを用いて、広く故障現象一般を扱える枠組みについて議論する。それゆえ、確率的に発生する故障を表現するために故障信号を確率的に表現する。また、仮定 3 は後述の故障評価行列で用いる推定誤差共分散行列についての代数 Riccati 方程式が正定な唯一解をもつために必要な仮定である。

つぎに本稿で扱う、サイバー攻撃・故障の診断問題を以下のように定義する。

[問題 1] 仮定 1~3 が成り立ち、電力ネットワークモデルが (3), (4) 式で与えられ、時刻 k においてあるノードにサイバー攻撃もしくは故障が生じている場合 (つまり $E_k^i h_k^i = F_k^i g_k^i = 0$ ではない場合)、問題が生じているエリア i のノード j を迅速に特定する診断信号 R_k^j を生成せよ。

3. 故障評価行列を用いた診断手法

本章では状態故障評価行列および出力故障評価行列を用いたサイバー攻撃・故障の診断手法を提案する。診断信号の生成手法について議論する第 3 章では、オンラインで閾値を決定する手法についても言及する。

3.1 状態故障評価行列

本節では、カルマンフィルタの状態推定値を用いて状態故障評価行列を定義し、その性質についても述べる。

今、時刻 $k-1$ において推定したエリア i の状態および誤差共分散をそれぞれ $\hat{x}_{k|k-1}^i, P_{k|k-1}^i$ とし、カルマンゲインを

K_k^i とすると、時刻 k における推定式は以下となる。

$$\hat{x}_{k+1|k}^i = A^i \hat{x}_{k|k}^i + B^i u_k^i \quad (12)$$

$$\hat{x}_{k|k}^i = \hat{x}_{k|k-1}^i + K_k^i \{y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i\} \quad (13)$$

$$S_k^i = \text{cov}(y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i) \quad (14)$$

$$K_k^i = P_{k|k-1}^i C_k^{iT} \{S_k^i\}^{-1} \quad (15)$$

$$P_{k+1|k}^i = A^i P_{k|k}^i A^{iT} + W_k^i \quad (16)$$

$$P_{k|k}^i = P_{k|k-1}^i - K_k^i C_k^i P_{k|k-1}^i \quad (17)$$

このとき、 $\eta_k^i = x_k^i - \hat{x}_{k|k-1}^i$, $\eta^{i'} = x_k^i - \hat{x}_{k|k}^i$ とすると、 $\eta_k^i = x_k^i - \hat{x}_{k|k-1}^i = A(x_{k-1}^i - \hat{x}_{k-1|k-1}^i) + w_{k-1}^i + E_{k-1}^i h_{k-1}^i$ であるので、 $\eta_k^i = A\eta_{k-1}^i + w_{k-1}^i + E_{k-1}^i h_{k-1}^i$ となる。状態に対する攻撃および故障信号が、誤差共分散にどのような影響を及ぼしているかを確認するため、 $\eta^i, \eta^{i'}$ を用いて展開すると誤差共分散 $P_{k|k-1}^i$ は次式のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} P_{k|k-1}^i &= \text{cov}(\eta_k^i) \\ &= A^i P_{k-1|k-1}^i A^T + W_{k-1}^i + E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^i \\ &\quad + \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \right. \\ &\quad \left. - \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \right] \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \right] \\ &\quad + \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{iT} h_{k-1}^i \left(\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} \right] \right) \right. \\ &\quad \left. - \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{iT} h_{k-1}^i \right] \left(\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} \right] \right) \right] \quad (18) \end{aligned}$$

上式を用いて時刻 k におけるエリア i の状態故障評価行列 $N_k^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$ を次式のように定義する。

$$\begin{aligned} N_k^i &:= P_{k|k-1}^i - A^i P_{k-1|k-1}^i A^{iT} - \hat{W}_{k-1}^i \\ &= W_{k-1}^i - \hat{W}_{k-1}^i + E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^i \\ &\quad + \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \right. \\ &\quad \left. - \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \right] \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \right] \\ &\quad + \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{iT} h_{k-1}^i \left(\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} \right] \right) \right. \\ &\quad \left. - \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{iT} h_{k-1}^i \right] \left(\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} \right] \right) \right] \quad (19) \end{aligned}$$

ただし、 $\hat{W}_k^i$ はプロセス雑音 w_k^i と同様、平均 0 の白色雑音過程をもつ推定雑音 $\hat{w}_k^i$ の共分散 $\mathbb{E}[\hat{w}_k^i \hat{w}_k^{iT}]$ である。状態故障評価行列 N_k^i はプロセス雑音の共分散とその推定値を表わす項を除けば、故障信号の共分散に関する項と故障信号とほかのパラメータの相関項から成る。そのため外部から攻撃または故障信号 $E_k^i h_k^i$ が付加された場合、その影響を対応する

行列要素に反映することができる．ここで，状態故障評価行列 N_k^i について以下の特性が成り立つ．

[特性 1] 仮定 1~3 が成り立つとき，状態に対する攻撃・故障信号と状態故障評価行列の間には以下の関係式が成立する．

$$E_k^1 H_k^1 E_k^{1T} \geq E_k^2 H_k^2 E_k^{2T} \iff N_k^1 \geq N_k^2 \quad (20)$$

[Proof]

(i) まず $N_k^1 \geq N_k^2 \implies E_k^1 H_k^1 E_k^{1T} \geq E_k^2 H_k^2 E_k^{2T}$ を示す．

攻撃・故障信号が状態故障評価行列に及ぼす影響を明らかにするため，まずは (19) 式のうちプロセス雑音の共分散とその推定値，そして異常信号の大きさを表わす項を除いた部分を抜き出すと次式となる．

$$\begin{aligned} & \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \right. \\ & - \mathbb{E} \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} \right] \left(h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - \mathbb{E} \left[h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} \right] \right) \\ & + \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{i'} h_{k-1}^i \left(\eta_{k-1}^{iT} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{iT} A^{iT} \right] \right) \right. \\ & \left. - \mathbb{E} \left[E_{k-1}^{i'} h_{k-1}^i \right] \left(\eta_{k-1}^{iT} A^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_{k-1}^{iT} A^{iT} \right] \right) \right] \quad (21) \end{aligned}$$

上式は期待値および共分散の定義，特性を用いることで次式のように書き換えることが可能である．

$$\begin{aligned} & = A^i \text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right) E_{k-1}^{iT} \\ & + E_{k-1}^{i'} \text{cov} \left(h_{k-1}^i, \eta_{k-1}^{iT} \right) A^{iT} \quad (22) \end{aligned}$$

ここで，上式第 2 項の $E_{k-1}^{i'} \text{cov} \left(h_{k-1}^i, \eta_{k-1}^{iT} \right) A^{iT}$ が第 1 項の転置 $\left\{ A^i \text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right) E_{k-1}^{iT} \right\}^T$ であることに留意すると，状態故障評価行列 N_k^i の対角和は次式で表わすことができる．

$$\begin{aligned} \text{trace} N_k^i & = \text{trace} \left(W_{k-1}^i - \hat{W}_{k-1}^i \right) \\ & + \text{trace} \left(E_{k-1}^{i'} H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \right) \\ & + 2 \text{trace} \left\{ A^i \text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right) E_{k-1}^{iT} \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

上式において，プロセス雑音とその推定値は相殺しているため，左辺は N_k^i ，右辺は H_{k-1}^i および $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ に依存していることがわかる．また， H_{k-1}^i と $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ は片方が増加している場合，他方も増加し，減少の場合も同様である．たとえば， H_k^i が増加した場合，これは異常信号 $E_k^i h_k^i$ の値の増加を意味し，このとき異常信号の増加に伴う推定誤差により $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ の値が大きくなる．したがって， H_{k-1}^i と $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ の大小関係の一致性に留意すると，上式から N_k^i が増加すれば $E_{k-1}^{i'} H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT}$ もそれに伴い増加することがいえる．

(ii) つぎに $E_k^1 H_k^1 E_k^{1T} \geq E_k^2 H_k^2 E_k^{2T} \implies N_k^1 \geq N_k^2$ を示す．

(i) の場合と同様の手順で次式を得ることができる．

$$\begin{aligned} & \text{trace} \left(W_{k-1}^i - \hat{W}_{k-1}^i \right) + \text{trace} \left(E_{k-1}^{i'} H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \right) \\ & + 2 \text{trace} \left\{ A^i \text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right) E_{k-1}^{iT} \right\} = \text{trace} N_k^i \quad (24) \end{aligned}$$

上式から N_k^i は H_{k-1}^i および $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ に依存していることがわかる．したがって， H_{k-1}^i と $\text{cov} \left(\eta_{k-1}^{i'}, h_{k-1}^{iT} \right)$ の大小関係の一致性に留意すると， $E_{k-1}^{i'} H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT}$ が増加すれば N_k^i もそれに伴い増加することがいえる．

以上の (i)，(ii) より (20) が成り立つ． $\square$

以上の特性 1 より，状態故障評価行列 N_k^i は外部から与えられた異常信号 $E_k^i h_k^i$ の有無や大小による影響を自身の要素に反映できることが示された．また (23) 式から推定精度も故障評価行列に対して影響を多分に与えていることがわかる．これより，減衰定数や慣性定数が変化する発電機故障や，コンダクタンスおよびサセプタンスに関する送電線欠落の故障といった，行列 A^i, B^i に影響を及ぼしてカルマンフィルタの推定精度を劣化させる故障も診断可能であることが上記の特性からわかる．つまり，慣性定数 m_j ，減衰定数 d_j ，電圧 $|V_j|$ ，サセプタンス B_{ij} ，機械入力 P_m ，他エリアからの電力流入 P_{in} ，コンダクタンス G_{ij} に関する故障はこの状態故障評価行列を用いて診断可能である．

3.2 出力故障評価行列

つぎに出力故障評価行列を定義する．故障信号が含まれる場合の観測誤差共分散は次式となる．

$$\begin{aligned} S_k^i & = \text{cov} \left(y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i \right) \\ & = C^i P_{k|k-1}^i C^{iT} + V_k^i + F_k^i G_k^i F_k^{iT} \\ & + \mathbb{E} \left[C^i \eta_k^i \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & - \mathbb{E} \left[C^i \eta_k^i \right] \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \\ & + \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \left(\eta_k^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_k^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & \left. - \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \right] \left(\eta_k^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta_k^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right] \quad (25) \end{aligned}$$

上式を用いて時刻 k におけるエリア i の出力故障評価行列 $M_k^i \in \mathbb{R}^{2|i| \times 2|i|}$ を次式のように定義する．

$$\begin{aligned} M_k^i & := S_k^i - C_k^i P_{k|k-1}^i C_k^{iT} - \hat{V}_k^i \\ & = V_k^i - \hat{V}_k^i + F_k^i G_k^i F_k^{iT} \\ & + \mathbb{E} \left[C_k^i \eta^i \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & - \mathbb{E} \left[C_k^i \eta^i \right] \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \\ & + \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \left(\eta^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & \left. - \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \right] \left(\eta^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right] \quad (26) \end{aligned}$$

ただし、 $\hat{V}_k^i$ は平均 0 の白色雑音過程をもつ推定雑音 $\hat{v}_k^i$ の共分散 $\mathbb{E}[\hat{v}_k^i \hat{v}_k^{iT}]$ であり、状態故障評価行列と同様、出力故障評価行列においても M_k^i は観測雑音の共分散とその推定値を表わす項を除けば、故障信号の共分散に関する項と故障信号とほかのパラメータの相関項から成る。そのため外部から攻撃または故障信号 $F_k^i g_k^i$ が付加された場合、その影響を対応する行列要素に反映することができる。ここで出力故障評価行列 M_k^i について以下の特性 2 が成り立つ。

[特性 2]

仮定 1~3 が成り立つとき、出力に対する攻撃・故障信号と出力故障評価行列の間には以下の関係式が成立する。

$$F_k^1 G_k^1 F_k^{1T} \geq F_k^2 G_k^2 F_k^{2T} \iff M_k^1 \geq M_k^2 \quad (27)$$

[Proof]

(i) まず $M_k^1 \geq M_k^2 \implies F_k^1 G_k^1 F_k^{1T} \geq F_k^2 G_k^2 F_k^{2T}$ を示す。

外部から与えられる異常信号が出力故障評価行列に及ぼす影響を考察するため、まずは (26) 式のうち、観測雑音の共分散とその推定値、そして異常信号の大きさを表わす項を除いた部分を考察する。

$$\begin{aligned} & \mathbb{E} \left[C_k^i \eta^i \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & - \mathbb{E} \left[C_k^i \eta^i \right] \left(g_k^{iT} F_k^{iT} - \mathbb{E} \left[g_k^{iT} F_k^{iT} \right] \right) \Big] \\ & + \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \left(\eta^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right. \\ & \left. - \mathbb{E} \left[F_k^i g_k^i \right] \left(\eta^{iT} C_k^{iT} - \mathbb{E} \left[\eta^{iT} C_k^{iT} \right] \right) \right] \quad (28) \end{aligned}$$

上式は期待値および共分散の定義、特性を用いることで次式のように書き換えることが可能である。

$$= C_k^i \text{cov} \left(\eta^i, g_k^{iT} \right) F_k^{iT} + F_k^i \text{cov} \left(g_k^i, \eta^{iT} \right) C_k^{iT} \quad (29)$$

ここで、上式第 2 項の $F_k^i \text{cov} \left(g_k^i, \eta^{iT} \right) C_k^{iT}$ が第 1 項の転置 $\{ C_k^i \text{cov} \left(\eta^i, g_k^{iT} \right) F_k^{iT} \}^T$ であることに留意すると、出力故障評価行列 M_k^i の対角和は次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \text{trace} M_k^i &= \text{trace} \left(V_k^i - \hat{V}_k^i \right) \\ &+ \text{trace} \left(F_k^i G_k^i F_k^{iT} \right) \\ &+ 2 \text{trace} \left\{ C_k^i \text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right) F_k^{iT} \right\} \quad (30) \end{aligned}$$

上式において、観測雑音とその推定値が相殺しているため、左辺は M_k^i 、右辺は G_k^i および $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ に依存していることがわかる。また、 G_k^i と $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ は片方が増加している場合、他方も増加し、減少の場合も同様である。たとえば、 G_k^i が増加した場合、これは異常信号 $F_k^i g_k^i$ の値の増加を意味し、このとき異常信号の増加に伴う推定誤差により $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ の値が大きくなる。したがって、 G_k^i と $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ の大小関係の一致性に留意すると、上式から M_k^i が増加すれば $F_k^i G_k^i F_k^{iT}$ もそれに伴い増加することがいえる。

(ii) つぎに $F_k^1 G_k^1 F_k^{1T} \geq F_k^2 G_k^2 F_k^{2T} \implies M_k^1 \geq M_k^2$ を示す。

(i) の場合と同様の手順で次式を得ることができる。

$$\begin{aligned} & \text{trace} \left(V_k^i - \hat{V}_k^i \right) + \text{trace} \left(F_k^i G_k^i F_k^{iT} \right) \\ & + 2 \text{trace} \left\{ C_k^i \text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right) F_k^{iT} \right\} = \text{trace} M_k^i \quad (31) \end{aligned}$$

上式から M_k^i は G_k^i および $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ に依存していることがわかる。したがって、 G_k^i と $\text{cov} \left(\eta_k^i, g_k^{iT} \right)$ の大小関係の一致性に留意すると、 $F_k^i G_k^i F_k^{iT}$ が増加すれば M_k^i もそれに伴い増加することがいえる。

以上の (i), (ii) より (27) が成り立つ。 $\square$

以上の特性 2 から、出力故障評価行列 M_k^i は外部から与えられた異常信号 $F_k^i g_k^i$ の有無や大小による影響を自身の要素に反映できることが示された。また、(30) 式から推定精度も故障評価行列に対して影響を多分に与えており、これより、状態故障評価行列と同様に、減衰定数や慣性定数が変化する発電機故障や、コンダクタンスおよびサセプタンスに関する送電線欠落の故障といった、行列 A^i, B^i に影響を及ぼしてカルマンフィルタの推定精度を劣化させる故障も診断可能であることが上記の特性からわかる。

3.3 閾値の動的決定と診断信号

本節では、前節までに定義した故障評価行列 N_k^i, M_k^i から診断信号 R_k^j を生成する。ここで、各エリア単位ではなく、各ノード単位で異常を診断するために、エリア i における故障評価行列 N_k^i, M_k^i に対し、そのエリア内に存在するノード j に対応した部分行列 N_k^{ij}, M_k^{ij} を以下のように定義する。

$$N_k^{ij} = \begin{bmatrix} N_{(2j-1, 2j-1)}^i & N_{(2j-1, 2j)}^i \\ N_{(2j, 2j-1)}^i & N_{(2j, 2j)}^i \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$M_k^{ij} = \begin{bmatrix} M_{(2j-1, 2j-1)}^i & M_{(2j-1, 2j)}^i \\ M_{(2j, 2j-1)}^i & M_{(2j, 2j)}^i \end{bmatrix} \quad (33)$$

そして問題 1 の解として、これらの N_k^{ij}, M_k^{ij} を用いて診断信号 R_k^j を次式で定義する。

$$R_k^j := \begin{cases} 0 & \text{if } \mathcal{M}^{\min} \leq \text{trace} M_k^{ij} \leq \mathcal{M}^{\max} \\ & \text{かつ } \mathcal{N}_k^{\min} \leq \text{trace} N_k^{ij} \leq \mathcal{N}_k^{\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

これより、行列 N_k^i および M_k^i はエリア単位の異常しか診断できないが、各行列において各ノードの影響が最も顕著に表われる部分である対角要素をそれぞれ抜粋して扱うことで、ノード単位の診断が可能となる。また (34) 式において、出力故障評価行列の閾値である $\mathcal{M}^{\min}, \mathcal{M}^{\max}$ はどの程度まで故障を許容するかあらかじめ決めておく設計パラメータであり、これは定数である。一方で、状態故障評価行列の閾値である $\mathcal{N}_k^{\min}, \mathcal{N}_k^{\max}$ は誤差共分散をみて動的に決定する。決定方法はつぎのとおりである。

$$\mathcal{N}_{k+1}^{\max} = \begin{cases} \mathcal{N}_k^{\max} - \mathcal{N}^+ & \text{if } P_{k+1|k} < \mathcal{C}1 \text{ かつ} \\ & |P_{k+1|k} - P_{k|k-1}| < \mathcal{C}2 \\ \mathcal{N}_k^{\max} + \mathcal{N}^- & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

$$\mathcal{N}_{k+1}^{\min} = \begin{cases} \mathcal{N}_k^{\min} + \mathcal{N}^+ & \text{if } P_{k+1|k} < \mathcal{C}1 \text{ かつ} \\ & |P_{k+1|k} - P_{k|k-1}| < \mathcal{C}2 \\ \mathcal{N}_k^{\min} - \mathcal{N}^- & \text{otherwise} \end{cases} \quad (36)$$

ここで、 $\mathcal{C}1$ および $\mathcal{C}2$ は設計パラメータであり、どの程度の推定精度ならば閾値を変動させるかを定めるパラメータである。 $\mathcal{N}^+$ 、 $\mathcal{N}^-$ はそれぞれ誤差共分散の値および変動が小さいときにどの程度閾値を狭めるかを決定するパラメータであり、かつ、逆に推定がうまく行なえていない場合には閾値を広げるパラメータでもある。ただしすべての $\mathcal{N}^+$ 、 $\mathcal{N}^-$ が同一の値である必要はない。また、閾値は設定した最大値および最小値の中で上下動を繰り返す。

4. シミュレーションによる有効性の検証

本章では **Fig. 2** のような、12 母線系統が 4 つのエリアに分割された電力システムにおいて手案法の有効性を検証する。

ここで、出力故障評価行列の閾値は $\mathcal{M}^{\max} = 0.5$ 、 $\mathcal{M}^{\min} = -0.5$ 、状態故障評価行列の上限値に関してはそれぞれ初期上限値を $\mathcal{N}_0^{\max} = 0.5$ 、上限値の最小値および最大値を $0.1 \leq \mathcal{N}_k^{\max} \leq 0.5$ 、上限値に対する変動幅を $\mathcal{N}^+ = 0.04$ 、 $\mathcal{N}^- = 3.0$ 、故障評価行列の下限値に関してはそれぞれ初期下限値を $\mathcal{N}_0^{\min} = -0.5$ 、下限値の最小値および最大値 $-0.5 \leq \mathcal{N}_k^{\min} \leq -0.1$ 、下限値に対する変動幅 $\mathcal{N}^+ = 0.04$ 、 $\mathcal{N}^- = 1.0$ 、推定誤差に関する設計パラメータを $\mathcal{C}1 = 0.005$ 、 $\mathcal{C}2 = 0.3$ とした。また、サンプリング時間は $T_s = 0.1$ s である。

Fig. 2 Division of 12 bus power network system into 4 areas

[シミュレーション 1]

シミュレーション 1 では状態に対してのみステップ状の攻撃・故障信号を付加し、これを状態故障評価行列により診断可能か検証する。また閾値を動的決定に決定することにより、診

Fig. 3 Attack or fault signals for state

Fig. 4 Traces of state fault diagnosis matrix and thresholds

Fig. 5 Diagnostic signals

断精度を劣化させることなく遅延の短い診断を行なうことが可能かも検証する。付加した状態に対する異常信号は **Fig. 3** のとおりである。Fig. 3 において実線がノード 1 に付加した異常信号を示しており、破線がそのほかのノードに付加した信号を示している。したがって、本シミュレーションにおいて異常信号を付加したのはノード 1 だけであることがわかる。Fig. 3 の異常信号下において、閾値を動的に決定した場合の状態故障評価行列および閾値の推移が **Fig. 4** である。また、診断信号の推移を **Fig. 5** に示す。

Fig. 4 から異常信号が付加されると即座にその影響が状態故障評価行列の対角和に反映されていることが確認できる。また異常信号が付加される前まではカルマンフィルタによる推定が精度良く行なわれており、その結果上限値 $\mathcal{N}_k^{\max}$ および下限値 $\mathcal{N}_k^{\min}$ の値が、より判定が厳しく行なわれるように動的決定されている。そして異常信号の付加と同時に推定精度が劣化し、閾値がもとに戻っていることも確認できる。また診断信号のシミュレーション結果 Fig. 5 と攻撃・故障信号

Fig. 6 Attack or fault signals for output

Fig. 7 Traces of output fault diagnosis matrix and thresholds

Fig. 8 Diagnostic signals

Fig. 3 を比較することで、異常信号の検出・診断が提案法によって達成されていることも確認できる。さらに閾値を動的に決定することで、異常信号の付加と同時にある勾配をもって増加する故障評価行列から、診断遅延の比較的短い診断信号を生成できていることが確認できる。

[シミュレーション 2]

シミュレーション 2 では出力に対してのみステップ状の攻撃・故障信号を付加し、これを出力故障評価行列により診断可能か検証する。付加した出力に対する異常信号は Fig. 6 のとおりである。Fig. 6 において実線がノード 1 に付加した異常信号を示しており、破線がそのほかのノードに付加した信号を示している。したがって、本シミュレーションはシミュレーション 1 と同様、ノード 1 にのみ異常信号が付加されていることがわかる。Fig. 6 の異常信号下において、出力故障評価行列の推移および閾値を示した図が Fig. 7 である。また、Fig. 7 をもとに生成された診断信号の推移を Fig. 8 に示す。

Fig. 7, Fig. 8 から、シミュレーション 1 と同様に、出力に対する異常信号も即座に診断できており、誤検出および誤診断はないことが確認できる。また出力異常診断においては特に遅延が生じないため、出力故障評価行列 M に対して閾値を動的に決める必要性はないと判断できる。

5. おわりに

本稿では次世代電力網の脅威として考えられ得るサイバー攻撃や大規模な擾乱に焦点を当て、状態推定理論を応用し、攻撃・故障信号の検出および診断手法を提案した。本手法ではまず、電力網を複数のエリアに分割し、各エリアにおいてカルマンフィルタを用いて状態推定を行なった。そしてその推定値や誤差共分散行列などを用いて、状態故障評価行列および出力故障評価行列という二種類の行列を定義した。これらの故障評価行列は、外部から状態および出力にそれぞれ異常信号が付加された場合、即座にその影響を独立的に反映することが可能であるため、一種の故障評価指標ともいえる。この状態故障評価行列および出力故障評価行列に対してそれぞれ閾値を設定し、それをもとに正常か異常かを判断する診断手法を提案した。またこの閾値を動的に決定することによって診断遅延を短縮させる手法に関しても言及した。最後に、シミュレーションにて本提案法の有効性を検証した。

参考文献

- 1) A.R. Metke and R.L. Ekl: Security technology for smart grid networks, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-1, 99/107 (2010)
- 2) S. Sridhar, A. Hahn and M. Govindarasu: Cyber-Physical system security for the electric power grid, *Proceedings of the IEEE*, 99-1, 1/15 (2012)
- 3) 早川朋久: 電力ネットワークにおける分散的故障・攻撃検知, 計測と制御, 51-1, 69/74 (2012)
- 4) F. Pasqualetti, F. Dörfler and F. Bullo: Cyber-Physical Attacks in Power Networks: Models, Fundamental Limitations and Monitor Design, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2195/2201 (2011)
- 5) A. Domínguez-García and S. Trenn: Detection of impulsive effects in switched DAEs with applications to power electronics reliability analysis, *IEEE Conference on Decision and Control*, 5662/5667 (2010)
- 6) T. Namerikawa and T. Kato: Distributed Load Frequency Control of Electrical Power Networks via Iterative Gradient Method, *Proc. of the 50th IEEE Conf. on Decision and Control*, 7723/7726 (2011)
- 7) J. Meiry and R. Beard: Failure accommodation in linear systems through self-reorganization, Ph.D. dissertation, Dep. Aero. Astro., Mass. Inst. Technol., Cambridge, MA (1971)
- 8) M. Massoumnia: A geometric approach to the synthesis of failure detection filters, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 31-9, 839/846 (1986)
- 9) M. Massoumnia, G. Verghese and A. Willsky: Failure detection and identification, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 34-3, 316/321 (1989)
- 10) N. Meskin and K. Khorasani: Fault detection and isolation of actuator faults in spacecraft formation flight, *Proc. IEEE Conf. Dec. Contr.*, 1159/1164 (2006)
- 11) H. Hashimoto and T. Hayakawa: Distributed cyber attack

- detection for power network systems, *Proc. of the 50th IEEE Conf. on Decision and Control*, 5820/5824 (2011)
- 12) A. Pashar and S. Mirzakuchaki: A Solution to Remote Detecting of Illegal Electricity Usage Based on Smart Metering, *Proc. of the IEEE International Workshop on Soft Computing Applications*, 163/167 (2007)
 - 13) P.M. Esfahani, M. Vrakopoulou, K. Margellos, J. Lygeros and G. Andersson: A Robust Policy for Automatic Generation Control Cyber Attack in Two Area Power Network, *Proc. of the 49th IEEE Conf. on Decision and Control*, 5973/5978 (2010)
 - 14) K. Kosugi, S. Tokumoto and T. Namerikawa: Fault-tolerant Sensor Network based on Fault Evaluation Matrix and Compensation for Intermittent Observation, *Proc. of the 51st IEEE Conf. on Decision and Control*, 1834/1839 (2012)
 - 15) A. Teixeira, H. Sandberg and K.H. Johansson: Networked Control Systems under Cyber Attacks with Applications to Power networks, *American Control Conference*, 3690/3696 (2010)

=====

[著 者 紹 介]

藤 田 佑 樹

2011 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン
工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合
デザイン工学専攻に入学。

大 川 佳 寛

2012 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン
工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合
デザイン工学専攻に入学。

滑 川 徹 (正会員)

1994 年金沢大学大学院自然科学研究科システム
科学専攻博士課程中退。同年金沢大学工学部電
気・情報工学科助手。同講師を経て 2002 年長岡
技術科学大学機械系助教授。2006 年金沢大学大
学院自然科学研究科電子情報科学専攻助教授を経て
2007 年同大学理工学研究域電子情報学系准教授。
2009 年より慶應義塾大学理工学部システムデザ
イン工学科准教授となり現在に至る。ロバスト制御
理論, 分散協調制御理論とそのロボティクス応用
に関する研究に従事。博士 (工学)。システム制御
情報学会, IEEE などの会員。

=====