

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 滑川徹（慶應義塾大学）

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

*Y. Fujita and T. Namerikawa (Keio University)

Abstract— 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 matrixes which are composed of the estimate value, output matrix, and so on. These diagnosis matrixes 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

主要インフラの防護にはサイバー攻撃をも想定した積極的な防衛体制の構築が必要である。主要インフラの一つである電力ネットワークにおいてもこれは必要であり、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なおさら重要である¹⁾²⁾。そこで、本稿では電力ネットワークにおけるサイバー攻撃・故障の検出と診断を行う。

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、現在までに様々なものが提案されてきた³⁾⁴⁾。しかし、今後益々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われるべきである。また、状態および出力のどちらにも異常信号が付加されても、独立的かつ早急に異常検出・診断が行われる事が期待される。

このような背景から、本稿ではサイバー攻撃・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。この手法では、まず電力システムを幾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う。次に、この推定値や出力行列などを適切に組み合わせる事で、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⁵⁾と呼ぶ。この二種類の故障評価行列により、状態お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オフラインで決定しているが、状態故障評価行列では診断遅延時間を短縮するためオンラインで決定している。最後に、提案法の有効性をシミュレーションにて検証する。

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) 式で表わす事ができる。

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

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} 、ダンピングを D_j 、電気出力を P_{ej} としており、単位には単位法を用いている。

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。

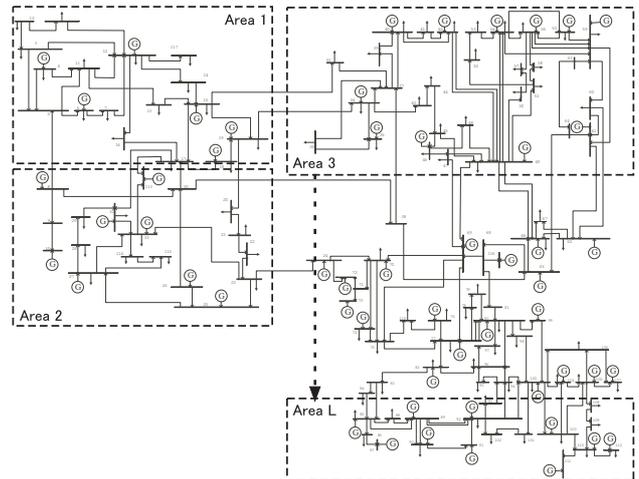


Fig. 1: Partition of IEEE 118 bus system into L areas

Fig.1 の電力システムに対して次の仮定 1 を置く。

仮定 1

- i . 超高压送電により送電損失が零
- ii . 隣接ノード間の相角偏差は十分小さい
- iii . ノード $i(\in Area L_1)$ はノード $j(\in Area L_1)$ の情報を取得可能

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全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す事ができる。ただし、 $j \in \{1, 2, \dots, N + M\}$ である。

$$M_j \ddot{\delta}_j + D_j \dot{\delta}_j = P_{m_j} + P_{in,j} - \sum_{k \in \mathcal{N}_j} |V_j| |V_k| B_{jk} (\delta_j - \delta_k) \quad (2)$$

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 jk 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毎にまとめ、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⁶⁾。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。

$$x_j = [\delta_j \quad \omega_j]^T, x^i = [x_1^T \quad \dots \quad x_{|i|}^T]^T \quad (5)$$

$$A^i = (M^i)^{-1} \{D^i - \mathcal{W}^i \mathcal{L}^{i'}\} \quad (6)$$

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

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

$$\mathcal{W}^i = \{\mathcal{K}^i \otimes \mathcal{G}\} \{(\mathcal{L}^i)^\dagger \otimes \mathcal{H}\} \quad (9)$$

$$\mathcal{K}_{(s,t)}^i = \begin{cases} \sum_{t \in \mathcal{N}_s} |V_s| |V_t| B_{st} & t = s \\ -|V_s| |V_t| B_{st} & t \in \mathcal{N}_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathcal{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathcal{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathcal{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathcal{L}^{i'} = \mathcal{L}^i \otimes \mathcal{F}, \mathcal{L}_{(s,t)}^i = \begin{cases} \sum_{t \in \mathcal{N}_s} 1 & t = s \\ -1 & t \in \mathcal{N}_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_j = [P_{in,j} \quad P_{m_j}]^T, u^i = [P_1^T \quad \dots \quad P_{|i|}^T]^T \quad (13)$$

$$B^i = M^{-1} B', B' = \text{diag}[b, \dots, b], b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで、 ω_j は角周波数、 \mathcal{L} はグラフラプラシアン、 \cdot^\dagger はレゾルベント行列⁷⁾である。また、出力行列は単位行列であり、 $w_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ はプロセス雑音で正規分布に従う共分散行列 $W^i \geq 0$ 、平均0の白色雑音過程であり、 $v_k^i \in \mathbb{R}^{2|i|}$ は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事を意味する。

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

$$i. E[v_k^i v_s^{iT}] = E[w_k^i w_s^{iT}] = 0 \quad (k \neq s)$$

$$ii. E[v_k^i w_s^{iT}] = E[v_k^i h_s^{iT}] = E[v_k^i g_s^{iT}] = E[w_k^i h_s^{iT}] = E[w_k^i g_s^{iT}] = 0$$

$$iii. E[x_0 v_s^{iT}] = E[x_0 w_s^{iT}] = E[x_0 h_s^{iT}] = E[x_0 g_s^{iT}] = 0$$

$$iv. E[\{h_k^i - E(h_k^i)\} \{h_k^i - E(h_k^i)\}^T] = H_k^i \geq 0$$

$$E[\{g_k^i - E(g_k^i)\} \{g_k^i - E(g_k^i)\}^T] = G_k^i \geq 0$$

仮定 3

$$i. (A, W^{\frac{1}{2}}) \text{ は可到達}$$

$$ii. (C, A) \text{ は可検出}$$

次に本稿で扱う、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節では、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。

$$\hat{x}_{k+1|k}^i = A^i \hat{x}_{k|k}^i + B^i u_k^i \quad (15)$$

$$\hat{x}_{k|k}^i = \hat{x}_{k|k-1}^i + K_k^i \{y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i\} \quad (16)$$

$$S_k^i = \text{cov}(y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i) \quad (17)$$

$$K_k^i = P_{k|k-1}^i C_k^{iT} \{S_k^i\}^{-1} \quad (18)$$

$$P_{k+1|k}^i = A^i P_{k|k}^i A^{iT} + W_k^i \quad (19)$$

$$P_{k|k}^i = P_{k|k-1}^i - K_k^i C_k^i P_{k|k-1}^i \quad (20)$$

このとき、 $\eta_k^i = x_k^i - \hat{x}_{k|k-1}^i$, $\eta_k^{i'} = x_k^i - \hat{x}_{k|k}^i$ 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 $P_{k|k-1}^i$ は次式のように表す事ができる.

$$\begin{aligned} P_{k|k-1}^i &= \text{cov}(\eta_k^i) \\ &= A^i P_{k-1|k-1}^i A^{iT} + W_{k-1}^i + E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \\ &\quad + E \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} (h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - E [h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT}]) \right. \\ &\quad \left. - E [A^i \eta_{k-1}^{i'}] (h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - E [h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT}]) \right] \\ &\quad + E \left[E_{k-1}^i h_{k-1}^i (\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - E [\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT}]) \right. \\ &\quad \left. - E [E_{k-1}^i h_{k-1}^i] (\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - E [\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT}]) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

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.

$$\begin{aligned} N_k^i &:= P_{k|k-1}^i - A^i P_{k-1|k-1}^i A^{iT} - \hat{W}_{k-1}^i \\ &= W_{k-1}^i - \hat{W}_{k-1}^i + E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \\ &\quad + E \left[A^i \eta_{k-1}^{i'} (h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - E [h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT}]) \right. \\ &\quad \left. - E [A^i \eta_{k-1}^{i'}] (h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT} - E [h_{k-1}^{iT} E_{k-1}^{iT}]) \right] \\ &\quad + E \left[E_{k-1}^i h_{k-1}^i (\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - E [\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT}]) \right. \\ &\quad \left. - E [E_{k-1}^i h_{k-1}^i] (\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT} - E [\eta_{k-1}^{i'T} A^{iT}]) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

ただし, \hat{W}_k^i はプロセス雑音 w_k^i と同様, 平均 0 の白色雑音過程を持つ推定雑音 \hat{w}_k^i の共分散 $E [\hat{w}_k^i \hat{w}_k^{iT}]$ 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他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 $E_{k-1}^i h_{k-1}^i$ 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.

特性 1

仮定 2 および仮定 3 が成り立ち, エリア i の状態と推定値 x_k^i と $\hat{x}_{k|k}^i$ がそれぞれ故障信号 h_k^i と無相関であるとする. このとき, $E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \leq E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT}$ であれば $N_k^1 \leq N_k^2$ となる.

証明 1

x_k^i と $\hat{x}_{k|k}^i$ が故障信号 h_k^i と無相関であると仮定できるとき, (22) 式は次式のように簡略化される.

$$N_k^i = W_{k-1}^i - \hat{W}_{k-1}^i + E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT} \quad (23)$$

したがって, 故障に関する項は $E_{k-1}^i H_{k-1}^i E_{k-1}^{iT}$ だけになり, 状態故障評価行列と故障信号の大小関係は一致する.

3.2 出力故障評価行列

次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.

$$\begin{aligned} S_k^i &= \text{cov}(y_k^i - C_k^i \hat{x}_{k|k-1}^i) \\ &= C_k^i P_{k|k-1}^i C_k^{iT} + V_k^i + F_k^i G_k^i F_k^{iT} \\ &= + E [C_k^i \eta_k^i (g_k^{iT} F_k^{iT} - E [g_k^{iT} F_k^{iT}]) \\ &\quad - E [C_k^i \eta_k^i] (g_k^{iT} F_k^{iT} - E [g_k^{iT} F_k^{iT}])] \\ &\quad + E [g_k^i F_k^i (\eta_k^{iT} C_k^{iT} - E [\eta_k^{iT} C_k^{iT}]) \\ &\quad - E [g_k^i F_k^i] (\eta_k^{iT} C_k^{iT} - E [\eta_k^{iT} C_k^{iT}])] \end{aligned} \quad (24)$$

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.

$$\begin{aligned} M_k^i &:= S_k^i - C_k^i P_{k|k-1}^i C_k^{iT} - \hat{V}_k^i \\ &= V_k^i - \hat{V}_k^i + F_k^i G_k^i F_k^{iT} \\ &\quad + E [C_k^i \eta_k^i (g_k^{iT} F_k^{iT} - E [g_k^{iT} F_k^{iT}]) \\ &\quad - E [C_k^i \eta_k^i] (g_k^{iT} F_k^{iT} - E [g_k^{iT} F_k^{iT}])] \\ &\quad + E [g_k^i F_k^i (\eta_k^{iT} C_k^{iT} - E [\eta_k^{iT} C_k^{iT}]) \\ &\quad - E [g_k^i F_k^i] (\eta_k^{iT} C_k^{iT} - E [\eta_k^{iT} C_k^{iT}])] \end{aligned} \quad (25)$$

ただし, \hat{V}_k^i は平均 0 の白色雑音過程を持つ推定雑音 \hat{v}_k^i の共分散 $E [\hat{v}_k^i \hat{v}_k^{iT}]$ 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他のパラメータの相関項から成る. また特性 1 と同様に, x_k^i と $\hat{x}_{k|k-1}^i$ が故障信号 g_k^i と無相関と仮定できる場合, $F_k^i G_k^i F_k^{iT} \leq F_k^i G_k^i F_k^{iT}$ であれば $M_k^1 \leq M_k^2$ となる.

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. まずは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, 行列

$$Z^i \text{ に対し, } Z^{ij} \text{ を } Z^{ij} = \begin{bmatrix} Z_{(2i-1, 2i-1)}^i & Z_{(2i-1, 2i)}^i \\ Z_{(2i, 2i-1)}^i & Z_{(2i, 2i)}^i \end{bmatrix} \text{ と}$$

定義する. 故障評価行列 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れる部分をそれぞれ抜粋して扱う事で, ノード単位の診断が可能となる. 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.

$$R_k^j := \begin{cases} 0 & \text{if } \mathcal{M}^{\min} \leq \text{trace} M_k^{ij} \leq \mathcal{M}^{\max} \\ & \text{かつ } \mathcal{N}_k^{\min} \leq \text{trace} N_k^{ij} \leq \mathcal{N}_k^{\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

上式において, 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, これはオフラインで決定する. 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オンラインで決定する. 決定方法は次の通りである.

$$\mathcal{N}_{k+1}^{\max} = \begin{cases} \mathcal{N}_k^{\max} - \mathcal{N} & \text{if } P_{k+1|k} < C1 \text{ かつ} \\ & |P_{k+1|k} - P_{k|k-1}| < C2 \\ \mathcal{N}_k^{\max} + \mathcal{N} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$$\mathcal{N}_{k+1}^{\min} = \begin{cases} \mathcal{N}_k^{\min} + \mathcal{N} & \text{if } P_{k+1|k} < C1 \text{ かつ} \\ & |P_{k+1|k} - P_{k|k-1}| < C2 \\ \mathcal{N}_k^{\min} - \mathcal{N} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

ここで, $C1$ および $C2$ 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} は誤差共分散の値および変動が小さい時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. ただし全ての \mathcal{N} が同一の値である必要はない. また, 閾値は上下動を繰り返すが, 最大値および最小値は設ける.

4 シミュレーションによる有効性の検証

本章では Fig.2 に示す電力システムにおいて手案法の有効性を検証する。

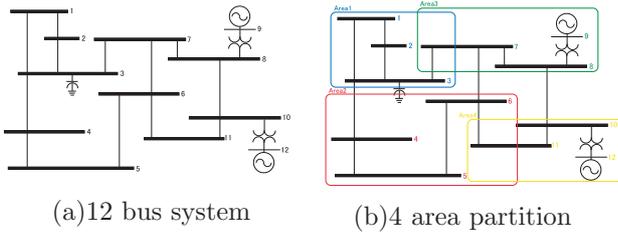


Fig. 2: Power Grid

ここで、出力故障評価行列の閾値は $M^{\max} = 0.5$, $M^{\min} = -0.5$, 状態故障評価行列の上限値に関してはそれぞれ $N_0^{\max} = 0.5$, $0.1 \leq N_k^{\max} \leq 0.5$, $N^+ = 0.04$, $N^- = 3.0$, 故障評価行列の下限値に関してはそれぞれ $N_0^{\min} = -0.5$, $-0.5 \leq N^{\min} \leq -0.1$, $N^+ = 0.04$, $N^- = 1.0$, $C1 = 0.005$, $C2 = 0.3$ とした。また、サンプリング時間は $T_s = 0.1[s]$ である。

・シミュレーション 1

ここでは、閾値の動的決定によって診断精度を劣化させる事なく診断速度を向上する事が可能か検証する。Fig.3, 4 が与えた故障信号である。このとき、閾値をオンラインで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.5, 6 であり、出力故障評価行列の推移が Fig.7 である。また、診断信号を Fig.8 に示す。

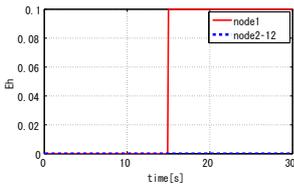


Fig. 3: state attack

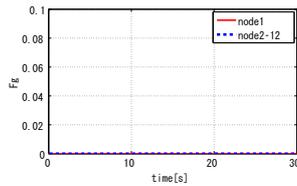


Fig. 4: output attack

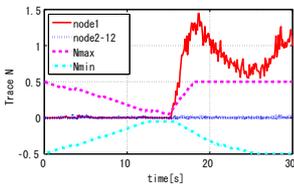


Fig. 5: state diagnosis

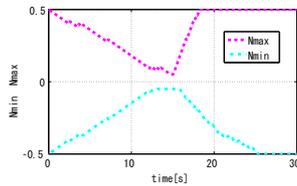


Fig. 6: threshold value

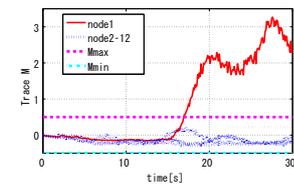


Fig. 7: output diagnosis

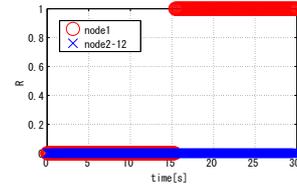


Fig. 8: diagnosis signal

Fig.3, 8 から異常が付加されると即座に検出・診断できている事が確認できる。また、Fig.5,7 から閾値をオンラインで決定する事で、異常信号の付加と同時にある勾配を持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事がわかる。

・シミュレーション 2

ここでは、出力に対する異常信号の診断に関する検証を行うため、Fig.9, 10 に示すような故障信号を与えた。このときの故障評価行列および閾値の推移を示しているのが Fig.11, 12, 13 であり、診断信号は Fig.14 のようになった。

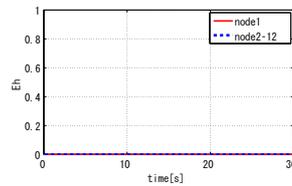


Fig. 9: state attack

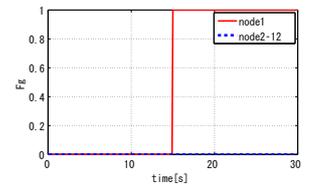


Fig. 10: output attack

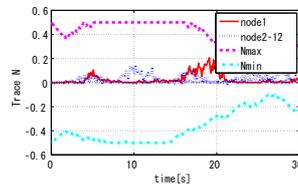


Fig. 11: state diagnosis

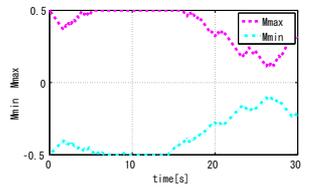


Fig. 12: threshold value

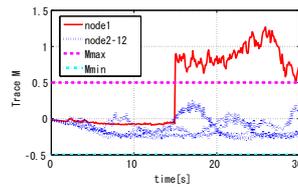


Fig. 13: output diagnosis

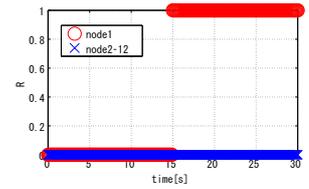


Fig. 14: diagnosis signal

Fig.10, 14 から出力に対する異常信号も即座に診断できている事がわかる。また出力異常診断においては特に遅延が生じないため、 M に対して閾値を動的に決める必要性はない。そして Fig.11 から、 N では出力異常を診断できない事がわかるため、状態および出力故障評価行列 N, M はどちらか一方のみあれば良いものではなく、両方存在して初めて精度・速度共に良好な診断が可能になる事も確認できる。

5 おわりに

本稿では電力網を幾つかのエリアに分割して KF 用いた。そして得られた推定値から故障評価行列を構成する手法を提案した。またこれらを用いて電力システムにおけるサイバー攻撃・故障の診断手法も提案し、シミュレーションにてそ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) F. Pasqualetti, F. Dörfler and F. Bullo, Cyber-Physical Attacks in Power Networks: Models, Fundamental Limitations and Monitor Design, *In proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2195/2201 (2011)
- 4) A. Domínguez-García and S. Trenn, Detection of impulsive effects in switched DAEs with applications to power electronics reliability analysis, *in IEEE Conference on Decision and Control*, 5662/5667 (2010)
- 5) 小杉和也, 滑川徹, 故障評価行列と観測値欠落補償に基づく耐故障性を考慮したセンサネットワークの構成, 計測自動制御学会論文集, (2012) (掲載決定)
- 6) 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)
- 7) D. J. Klein and W. Xiao, Resistance distance, *Mathematical Chemistry*, 12-1, 81/95 (1993)