GPSによる同時刻データを用いたオンライン系統パラメータ推定

学生員 臼井 正洋* 正員 岩本 伸一 (早稲田大学)

On-line Network Parameter Estimations using Global Positioning System (GPS)

Masahiro Usui, Student Member Shinichi Iwamoto, Member (Waseda University)

Network parameters in power systems are necessary to calculate bus voltages, currents, and powers. Therefore accuracy of network parameters is very important to get hold of the condition of power systems exactly. However generally, we regard them as constant. Thus accuracy of network parameters and calculated state values may be deteriorated. Recently, studies on Global Positioning System (GPS) for power system monitoring are being carried out in many fields. Because of high accuracy of GPS's time signals, we can calculate phase angles simultaneously from waveform of bus voltages or currents. By using this information, we can estimate more accurate network parameters and consequently state values.

In this paper, we propose a new method of on-line network parameter and state estimations using phase angles which can be calculated by GPS and power system information (bus voltages, power flows, line flows). By doing the estimation, improvement in accuracy of network parameters and all sorts of calculations in power systems is expected.

キーワード：GPS，系統パラメータ推定，状態推定，オンライン系統監視

1. まえがき

電力系統における状態推定は1970年にF. C. Schweppe氏等によって提案され^[1]、以来様々な研究がなされ、その技術も発展してきた。実系統に適用するにおいては、その膨大な計算量による多大な計算時間がオンラインでの状態推定を困難なものとしてきた。しかし、コンピュータの発達に伴って計算時間は飛躍的に短縮され、現在では5分程度おきに全系統の状態推定を行うことが可能になった。各電力会社では実際の系統に状態推定器を導入し、運用を始めている。それらは、セキュリティコントロールにおいて重要な役割を果たすようになってきている。

一方、状態推定をはじめとする電力系統の解析計算には各種系統パラメータが必要不可欠である。系統パラメータには線路インピーダンス、対地充電容量などの定数と、変圧器タップ比、電力用コンデンサ、SVCなどの変数があるが、解析計算の精度向上のためには、これら系統パラメータの正確さが重要な要素となる。特に、線路インピーダンス、対地充電容量は定数とされているが、現実には潮流状態、系統構成、気象条件などにより変動することが予想される。

より正確な系統パラメータを知るために、これまで幾つかの研究がなされ、報告されている。Debs氏はカルマンフィルタを用いた線路パラメータ推定手法を提案し^{[2][3]}、

*平成8年4月より三菱電機株式会社に勤務

Quintana氏等は同様に変圧器タップ比の推定手法を提案している^[4]。最近では、Liu氏等が状態推定を基にした線路パラメータ推定手法を提案している^[5]。しかし、これらの研究においては系統パラメータ推定は状態推定と同時に行うため、計算量・計算時間の増大が問題となるとともに、系統パラメータと状態量（電圧ベクトル）のどちらにも信頼性を置くかが問題となる。

近年、GPS (Global Positioning System) を電力系統の監視に利用する研究が始められている。GPSは高精度の同時刻性を与える機能を持つため、各母線の電圧波形を測定すれば位相角がリアルタイムで算出可能になることが報告されている^{[6]-[8]}。また、このリアルタイムで算出される位相角を利用する研究も進んでおり、系統の動揺監視^{[9][10]}や二端子間の送電線路定数の測定^{[11][12]}などが既に発表されている。

このシステムの利点は大きく二つ挙げられる。一点目は、高精度の同時刻性を与える機能を持っているため、各観測データの同時刻性が保証され、これまでの観測データに比べ精度が向上することである。二点目は、この同時刻性を保証された観測データを用いて、Ybus行列、即ち線路定数を用いずに母線間の位相角が求められることである。

この電圧ベクトルを用いて系統パラメータ推定を行えば、状態推定により電圧ベクトルを算出していた従来法に比べ、より信頼度が高い系統パラメータをオンラインで算出することが可能となり、安定度計算などの各種解析計算

において精度が向上すると考えられる。

そこで本論文では、GPS によるリアルタイム位相角測定システムが導入されると仮定した上で、状態推定方程式を利用した系統パラメータ（線路パラメータ、変圧器タップ比、SVC パラメータ）のオンライン推定手法を提案する。また、電力系統の各種解析計算の精度向上を目的として、系統パラメータ推定と従来の状態推定とを組み合わせた新しいオンライン系統監視手法についても提案する。それぞれにおいてコンピュータによるシミュレーションを行い、その結果を考察する。

2. GPS の概要

GPS (Global Positioning System) とは米国の人工衛星を利用した測位システムのことであり、車のナビゲーションシステムに使用されていることでよく知られている。この GPS は高精度（誤差 $1 \mu s$ 以下）の同時刻性を与える機能を有しており、これにより複数の遠隔地点における同期測定または同時測定が可能となる。電力系統分野においてもこの特長を利用した様々な研究が行われている。これらに共通するのは、リアルタイムで位相角を測定する技術の開発とその利用である。

具体的には、複数の遠隔電気所に GPS 受信装置と母線電圧の瞬時値測定装置を配置し、GPS による時刻信号と母線電圧波形を同時に測定、記録する。これにより得られた複数の電気所における情報は、中央給電指令所などにデジタル回線等を通して送られる。ここで、時刻信号を利用して各母線電圧波形を高速フーリエ変換し、ゼロクロス点の時間差を求めることにより、複数電気所間の位相差、すなわち位相角をリアルタイムで算出することができる [6]~[8]。このシステムの概略図を図 1 に示す。

文献 [10] によれば、母線電圧瞬時値データは 3200 Hz のサンプリング間隔で測定し、時刻信号とともに 200 ms 毎に中央給電指令所に伝送することが可能である。従って、ほぼ実時間で位相角を算出することが可能であるといえる。

これまで位相角は潮流計算や状態推定計算を行わなければ算出することができなかった。これには大規模になればなるほど膨大な計算時間を必要とした。GPS を利用したリアルタイム位相角算出システムは大変画期的なシステムであると言える。

3. GPS を用いたオンライン系統監視手法

GPS の導入により同時刻性を持った系統データが得られるので、従来潮流計算や状態推定計算をしなければ求めることができなかった位相角がリアルタイムで算出できる。これを電力系統のオンライン監視に利用することにより、数々の利点が生ずると考えられる。そこで、GPS による位相角測定システムが導入されたと仮定した上で、新たなオンライン系統監視手法について、以下に示す。

図1 GPSによる位相角測定システム

Fig. 1. Phase angle measurement system using GPS

< 3. 1 > 系統パラメータ推定手法 従来から観測することができる母線電圧の大きさ、母線電力、線路電力潮流に加え、位相角を観測値として利用することができれば、潮流計算や状態推定計算をあらかじめ行うことなく、変動する系統パラメータ（線路パラメータ、変圧器タップ比、SVC パラメータ等）を状態推定方程式を適用して求めることができる。これにより、計算量は大幅に削減され、オンラインで系統パラメータ推定が可能になると考えられる。また、ここで用いる電圧の大きさと位相角は、潮流計算や状態推定計算によって求めたものに比べ信頼性が高まると考えられるので、推定された系統パラメータの信頼性も向上していると予想される。

オンラインで系統パラメータが推定できるようになれば、電力系統の監視や安定度計算等の解析計算の精度向上に役立つと思われる。また、多くの SVC が系統に入っている現状を考えた場合、高速に SVC パラメータを推定することは重要と考えられる。

以下に GPS を用いた系統パラメータ推定手法を示す。系統パラメータベクトル $\mathbf{p}$ を次のように定義する。

$$\mathbf{p} = [\mathbf{L}, \mathbf{T}, \mathbf{S}]^T$$

但し

$\mathbf{L}$: 線路パラメータベクトル

$\mathbf{T}$: 変圧器タップ比ベクトル

$\mathbf{S}$: SVC アドミタンスベクトル

また、線路パラメータベクトル $\mathbf{L}$ を次のように定義する。

$$\mathbf{L} = [\mathbf{LG}, \mathbf{LB}, \mathbf{Y}]^T$$

$\mathbf{LG}$: 線路コンダクタンスベクトル

$\mathbf{LB}$: 線路サセプタンスベクトル

$\mathbf{Y}$: 対地充電容量ベクトル、

線路モデルは π 型集中定数回路とした。

変数を以下のように定義する。

$\mathbf{z}_i$: 観測値ベクトル、 $\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$: 計算値ベクトル

$\mathbf{R}$: 観測値の共分散行列

$\mathbf{x}$: 母線電圧ベクトル ($|\mathbf{V}|, \theta$)

$\mathbf{p}_e^{(r)}$: 推定値ベクトル (r 回目)

$\Delta \mathbf{p}$: 誤差ベクトル

$\mathbf{H}$: ヤコビ行列、 $\mathbf{v}$: 観測雑音ベクトル、
状態推定方程式は(1)式のように示される。

$$\mathbf{z}_r = \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) + \mathbf{v} \quad (1)$$

系統パラメータ推定における観測値ベクトル $\mathbf{z}_r$ は次のように定義できる。

$$\mathbf{z}_r = [\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{LP}, \mathbf{LQ}, \mathbf{SQ}]^T$$

但し、

$\mathbf{P}$: 母線有効電力ベクトル

$\mathbf{Q}$: 母線無効電力ベクトル

$\mathbf{LP}$: 線路有効電力潮流ベクトル

$\mathbf{LQ}$: 線路無効電力潮流ベクトル

$\mathbf{SQ}$: SVC無効電力ベクトル

計算値ベクトル $\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ の各要素は(2)～(6)式の様に表される。

$$P_i = V_i \sum_k V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (2)$$

$$Q_i = V_i \sum_k V_k [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad (3)$$

$$LP_{ij} = V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] - V_i^2 G_{ij} \quad (4)$$

$$LQ_{ij} = V_i V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] + V_i^2 (B_{ij} + Y_{ij}) \quad (5)$$

$$SQ_i = V_i^2 S_i \quad (6)$$

但し、

P_i : 母線 i における有効電力

Q_i : 母線 i における無効電力

LP_{ij} : 線路 ij 間の有効電力潮流

LQ_{ij} : 線路 ij 間の無効電力潮流

SQ_i : 母線 i における SVC の無効電力

G_{ij} 、 B_{ij} : 母線アドミタンス行列の ij 要素

Y_{ij} : 線路 ij 間の対地充電容量

S_i : 母線 i の SVC アドミタンス

V_i : 母線 i における電圧の大きさ

θ_i : 母線 i における位相角

母線アドミタンス行列は以下のように作成される。

$$G_{ij} = \begin{cases} \sum_k LG_{ik} & (i = j) \\ -LG_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \quad (7)$$

$$B_{ij} = \begin{cases} \sum_k \{ (LB_{ik} + Y_{ik} + (T_{ik}^2 - 1)LB_{ik}) \} + S_i & (i = j) \\ -T_{ij}LB_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \quad (8)$$

但し、

LG_{ij} : 線路 ij 間のコンダクタンス

LB_{ij} : 線路 ij 間のサセプタンス

Y_{ij} : 線路 ij 間の対地充電容量

T_{ij} : 線路 ij 間のタップ比

S_i : 母線 i の SVC アドミタンス

※変圧器のある線路は $LG_{ij} = 0$ と仮定

従来法においては、母線電圧の大きさ・位相角は状態推

定や潮流計算等により推定された値を用いていた。ここでは、母線電圧の大きさ・位相角は、GPSを用いて得られた値をそのまま用いることができると仮定する。

したがって、母線電圧ベクトル $\mathbf{x}$ は定数として扱うことができる。そのため、 $\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ は $\mathbf{z}(\mathbf{p})$ 、すなわち系統パラメータベクトル $\mathbf{p}$ のみの関数となり、最も確からしい系統パラメータベクトル $\mathbf{p}^*$ は、(9)式の評価関数を最小化することにより求められる。

$$J(\mathbf{p}) = [\mathbf{z}_r - \mathbf{z}(\mathbf{p})]^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z}_r - \mathbf{z}(\mathbf{p})] / 2 \quad (9)$$

$\mathbf{z}(\mathbf{p})$ を $\mathbf{p} = \mathbf{p}_e^{(r)}$ 近傍でテイラー展開すると、(10)式のよ

$$\mathbf{z}(\mathbf{p}) = \mathbf{z}(\mathbf{p}_e^{(r)}) + \mathbf{H} \Delta \mathbf{p} + \dots \quad (10)$$

$$\text{但し、} \mathbf{H} = \partial \mathbf{z}(\mathbf{p}) / \partial \mathbf{p} \big|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_e^{(r)}}$$

ここで、ヤコビ行列 $\mathbf{H}$ の各要素は(11)～(35)式の様に表せる。

$$\frac{\partial P_i}{\partial G_{jk}} = \begin{cases} V_i \{ V_i - V_k \cos(\theta_i - \theta_k) \} & (i = j) \\ V_i \{ V_i - V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \} & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial B_{jk}} = \begin{cases} -V_i V_k T_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) & (i = j) \\ -V_i V_j T_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Y_{jk}} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial G_{jk}} = \begin{cases} -V_i V_k LB_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) & (i = j) \\ -V_i V_j LB_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial B_{jk}} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial G_{jk}} = \begin{cases} -V_i V_k \sin(\theta_i - \theta_k) & (i = j) \\ -V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial B_{jk}} = \begin{cases} V_i \{ -V_i T_{ik}^2 + V_k T_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) \} & (i = j) \\ V_i \{ -V_i T_{ij}^2 + V_j T_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \} & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial Y_{jk}} = \begin{cases} -V_i^2 & (i = j) \\ -V_i^2 & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial T_{jk}} = \begin{cases} -2V_i^2 LB_{ik} T_{ik} + V_i V_k LB_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) & (i = j) \\ V_i V_j LB_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) & (i = k) \\ 0 & (i \neq j, i \neq k) \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial S_j} = \begin{cases} V_i^2 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (20)$$

$$\frac{\partial LP_{ij}}{\partial G_{kl}} = \begin{cases} -V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) + V_i^2 & (i = k, j = l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{\partial LP_{ij}}{\partial B_{kl}} = \begin{cases} -V_i V_j T_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) & (i = k, j = l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (22)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_k} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_k} = \begin{cases} -V_i V_j L B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) & (i=k, j=l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (24)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_k} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k} = \begin{cases} -V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) & (i=k, j=l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (26)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k} = \begin{cases} V_i V_j T_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i^2 T_{ij} & (i=k, j=l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (27)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k} = \begin{cases} V_i^2 & (i=k, j=l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k} = \begin{cases} V_i V_j L B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i^2 L B_{ij} & (i=k, j=l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (29)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_k} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial G_{jk}} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_{jk}} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_{jk}} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_{jk}} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = \begin{cases} V_i^2 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (35)$$

(10)式を(9)式に代入すると(36)式が得られる。

$$J(\mathbf{p}) = [\Delta \mathbf{z}^{(r)} - \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{p}]^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\Delta \mathbf{z}^{(r)} - \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{p}] / 2 \quad (36)$$

但し、 $\Delta \mathbf{z}^{(r)} = \mathbf{z}_i - \mathbf{z}(\mathbf{p}_i^{(r)})$

(36)式を $\Delta \mathbf{p}^{(r+1)}$ で微分して零とおくと、

$$\partial J(\mathbf{p}) / \partial (\Delta \mathbf{p}^{(r+1)}) = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \Delta \mathbf{p}^{(r+1)} - \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}^{(r)} = 0 \quad (37)$$

(37)式を変形して、

$$\Delta \mathbf{p}^{(r+1)} = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}^{(r)} \quad (38)$$

$$\mathbf{p}_i^{(r+1)} = \mathbf{p}_i^{(r)} + \Delta \mathbf{p}^{(r+1)} \quad (39)$$

これより、最適系統パラメータベクトル $\mathbf{p}^*$ は(38)、

(39)式を反復計算することにより求められる。

以上の手順を図2のフローチャートに示す。

< 3. 2 > オンライン系統監視への適用方法

系統パラメータを正確に知ることは、電力系統の各種運用・計画において重要なことである。電力系統における各種解析計算には系統パラメータが必要不可欠であり、特に系統運用・計画を行う上で重要と考えられる潮流計算、状態推定計算や、その結果を利用して行う安定度計算などにおいても系統パラメータがなければ計算は出来ない。系統パラメータを正確に知ることができなかったならば、その計算結果にはかなりの誤差が含まれることが予測される。

図2 系統パラメータ推定手法フローチャート

Fig. 2 Flowchart of proposed method of network parameter estimation

系統パラメータは天候・気温などの気象条件や潮流状態、その他の要因で、常に変化していると考えられる。しかし現状では、系統パラメータのうち線路パラメータは定数として扱っており、系統運用中であっても変動は考慮されていない。また、SVCパラメータについては、高速に変動しているためにその値を監視することは困難とされている。

上述のように変動を考慮しないで計算を行えば、計算結果の信頼性が低下することが予測される。したがって、オンラインで系統パラメータを推定し、その結果をこれらの計算に利用できれば、精度、信頼性が向上すると考えられる。

前述のように、GPSを利用したリアルタイム位相角測定システムが実系統に導入されたならば、母線電圧の位相角は潮流計算や状態推定計算を行うこと無しに算出可能となる。これにより、オンラインで系統パラメータが推定できるようになると考えられるので、系統パラメータの変動がリアルタイムで監視できると考えられる。

系統運用にこれらのシステムを適用して、系統パラメータの変動を考慮し、オンラインで電力系統を監視する際には、前述の系統パラメータ推定と従来の状態推定を組み合わせ、新しいオンラインによる電力系統の監視方法を考える必要があると思われる。

以上を踏まえ、提案したGPSを用いた系統パラメータ推定と状態推定を電力系統のオンライン監視に適用する場合、以下のような手順で系統監視を行うのが適切であると考えられる。

- (1) GPSから得られる母線電圧の位相角情報、通常の観測機器から得た母線電力、線路電力潮流などの系統情報を利用してオンラインで系統パラメータ推定を行い、より確かに変動を考慮した系統パラメータを算出する。
- (2) 推定した系統パラメータを利用し、GPSによる位相角を観測値として加えた状態推定を行う。
- (3) 算出された系統パラメータと電圧ベクトルを、安定度計算などの各種解析計算に利用する。

このような手順をとれば、次のような利点が生じると考えられる。まず、推定した系統パラメータにより状態推定を行えば、系統パラメータ変動を考慮し、また同時刻性の保証された観測データを用いることができるので、より精度の高い状態量の算出が可能となる。そして、推定した系統パラメータを想定事故計算などの安定度計算に利用すれば、その精度、信頼性を高めることができる。

以上のような、電力系統のオンライン監視にGPSを用いた状態推定・系統パラメータ推定を適用する場合の運用手順のフローチャートを図3に示す。

図3 GPSを用いたオンライン系統監視の運用手順
Fig. 3 The operating process of on-line monitoring in power system using GPS

4. 提案手法のシミュレーション

<4. 1> シミュレーション内容 シミュレーションに使用した系統はIEEE14母線系統^[13]である。系統図を図4に示す。但し、原系統にある電力用コンデンサはここではSVCとみなした。

この系統を用いて、以下①、②のシミュレーションをそれぞれ行い、結果を比較・考察する。

- ① GPSを用いた系統パラメータ推定
 - <3. 1>で示した理論を用い、すべての線路パラメータ、タップ比、SVCパラメータの推定を行う。
 - 通常機器による観測値には平均0.5%、GPSによる観測値には平均0.05%の正規乱数による誤差を加えた。
- ② オンライン系統監視への適用
 - 図4のフローチャートに従いGPSを用いた系統パラメータ推定と状態推定を組み合わせで行う。(提案法)
 - 通常機器による観測値には平均0.5%、GPSによる観測値には平均0.05%の正規乱数による誤差を加えた。
 - 系統パラメータの変動を模擬するため、系統パラメータに平均5%の正規乱数による誤差を与えた。
 - 比較のため、系統パラメータ推定を行わず、上述の誤差を与えた系統パラメータをそのまま使用し、状態推定を行う。(従来法)

図4 IEEE14母線系統

Fig. 4 Model system (IEEE 14 buses)

<4. 2> シミュレーション結果 シミュレーション①より得られた、GPSを用いた系統パラメータ推定の結果を表1～3に示す。

表1 変圧器タップ比推定結果

Table 1. Result of parameter estimation (tap ratio)

線路	変圧器タップ比 [pu]	
	真値	推定値
4-7	1.022495	1.025610
4-9	1.031992	1.024925
5-6	1.072961	1.073198

表2 SVCパラメータ推定結果

Table 2. Result of parameter estimation
(SVC parameter)

母線	SVCサセプタンス [pu]	
	真値	推定値
9	0.190000	0.190595

表3 線路パラメータ推定結果

Table 3. Result of parameter estimation
(line parameter)

線路	LG [pu]		LB [pu]		Y [pu]	
	真値	推定値	真値	推定値	真値	推定値
1-2	4.999132	4.989077	-15.263087	-15.258105	0.026400	0.025857
1-5	1.025897	1.029105	-4.234984	-4.209407	0.024600	0.024316
2-3	1.135019	1.192770	-4.781863	-4.766530	0.021900	0.022232
2-4	1.686033	1.711623	-5.115838	-5.111649	0.018700	0.018416
2-5	1.701140	1.724886	-5.193927	-5.152309	0.017000	0.017271
3-4	1.985976	2.116145	-5.068817	-5.007745	0.017300	0.016863
4-5	6.840981	6.805281	-21.578554	-21.693202	0.006400	0.006469
4-7	0.000000	0.000000	-4.889513	-4.710582	0.000000	0.000000
4-9	0.000000	0.000000	-1.797979	-1.809788	0.000000	0.000000
5-6	0.000000	0.000000	-3.967979	-3.969094	0.000000	0.000000
6-11	1.955029	1.975595	-4.094074	-4.009221	0.000000	0.000000
6-12	1.525967	1.617444	-3.175964	-2.952391	0.000000	0.000000
6-13	3.098927	3.086429	-6.102755	-5.890796	0.000000	0.000000
7-8	0.000000	0.000000	-5.676980	-6.152277	0.000000	0.000000
7-9	0.000000	0.000000	-9.090083	-9.102033	0.000000	0.000000
9-10	3.902050	3.988910	-10.365394	-9.421292	0.000000	0.000000
9-14	1.424005	1.376325	-3.029050	-3.062552	0.000000	0.000000
10-11	1.880885	2.061111	-4.402944	-3.809822	0.000000	0.000000
12-13	2.489025	2.594670	-2.251975	-2.968448	0.000000	0.000000
13-14	1.136994	1.122279	-2.314963	-2.352204	0.000000	0.000000

表1～表3の結果より、真値に対する各パラメータ推定値の誤差の平均を以下に示す。

線路コンダクタンス・・・5.92%
 線路サセプタンス・・・8.82%
 対地充電容量・・・・・・・・7.35%
 変圧器タップ比・・・・・・・・0.33%
 SVCサセプタンス・・・1.31%

これより、提案した推定手法が有効であることが確認できた。

次に、シミュレーション②より得られた、系統パラメータ推定と状態推定を組み合わせた場合のシミュレーション結果（提案法）と、系統パラメータ推定を行わず、状態推定のみを行った場合のシミュレーション結果（従来法）の比較を表4、表5に示す。

表4 オンライン系統監視における推定結果
(電圧の大きさ)Table 4. Result of estimation in on-line monitoring
(bus voltage magnitude)

母線	V [pu]			
	真値	観測値	推定値 (従来法)	推定値 (提案法)
1	1.06000	1.06474	1.05977	1.06042
2	1.02225	1.01488	1.02585	1.02276
3	1.00499	1.00150	1.00710	1.00385
4	0.99755	0.99565	0.99800	0.99762
5	0.99984	0.99785	1.00002	0.99985
6	1.03441	1.04116	1.03485	1.03499
7	1.02726	1.03377	1.02633	1.02772
8	1.04403	1.04548	1.04273	1.04298
9	1.02190	1.01659	1.02135	1.02168
10	1.01643	1.00980	1.01557	1.01567
11	1.02173	1.01296	1.02096	1.02200
12	1.01921	1.02119	1.02010	1.01826
13	1.01438	1.02275	1.01526	1.01429
14	0.99999	0.99687	0.99817	1.00040

表5 オンライン系統監視における推定結果
(位相角)Table 5. Result of estimation in on-line monitoring
(bus voltage phase angle)

母線	θ [deg]			
	真値	観測値	推定値 (従来法)	推定値 (提案法)
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000
2	-4.69954	-4.70003	-4.42600	-4.70079
3	-13.00743	-13.01653	-13.01413	-13.01910
4	-10.28009	-10.27096	-10.38150	-10.27199
5	-8.68958	-8.69367	-8.78894	-8.69489
6	-14.41158	-14.40264	-14.51612	-14.40964
7	-13.50291	-13.50696	-13.43494	-13.50981
8	-13.50291	-13.50141	-13.44326	-13.50727
9	-15.19449	-15.18476	-15.11800	-15.19320
10	-15.36258	-15.35285	-15.30077	-15.36432
11	-15.02897	-15.01670	-15.04662	-15.02675
12	-15.32651	-15.31131	-15.41003	-15.31869
13	-15.41593	-15.41793	-15.49084	-15.42613
14	-16.36258	-16.35835	-16.36929	-16.37083

表4、表5の結果より、真値に対する推定値（V および θ）の誤差の平均を以下に示す。

従来法・・・0.504%、提案法・・・0.045%

表4、表5より、系統パラメータが変動している場合、従来の状態推定では推定した状態量にかなりの誤差を含んでしまうが、提案法では誤差が抑制され、提案法の有効性が確認された。但し、位相角の推定値に関してはGPSによる測定データの観測誤差が他のパラメータ・状態量の誤差に比べ小さいと仮定したため、それらの誤差の影響を受け観測値より推定値の方が誤差が大きくなった。位相角については、観測値をそのまま用いた方が良いと思われる。

5. 考察

GPSを用いた系統パラメータ推定については、シミュレーション結果より、本手法の有効性が確認できた。従来と違ってGPSより得られる位相角をリアルタイムで利用できるため、オンラインでの推定が可能であると考えられる。そして、その結果も信頼性の高いものとなる。

ただし、GPSによる電圧ベクトルの観測値がある程度以上の精度を持たないと、適切な系統パラメータを求めることができないことが、シミュレーションよりわかった。今回のシミュレーションでは、GPSによる電圧ベクトルの測定誤差を0.05%と仮定した。しかし、GPSの誤差が $1\mu s$ 以下であり、50Hzの電力系統においては1サイクルが20msであることを考えると、今回の仮定は適当であると考えられる。

オンライン系統監視への適用方法については、シミュレーション結果より、系統パラメータの変動を仮定した場合、状態推定を単独で行うよりも、系統パラメータ推定を行った後に状態推定を行う方が推定誤差が減少した。すなわち、系統運用に利用する際に、提案した方法で推定することによってより確かな母線電圧の推定値が得られることが確認された。

前述のように、現実の系統では系統パラメータの変動があるものと考えられる。そのため、系統監視を行う際には、従来の状態推定を行う前に系統パラメータを推定する方が状態推定の信頼性がより高まると考えられる。さらには、両者を交互に行うことにより、測定誤差や欠損データに強い推定システムが構築できるであろう。

6. 結論

本論文では、GPSの同時刻性を利用したリアルタイム位相角測定システムの導入を仮定した上で、オンライン系統監視に適用できる系統パラメータ推定手法を提案してきた。上述のシミュレーション結果より以下の結論が得られたと考える。

- (1) GPSの同時刻性を利用して求められる電圧位相角を用いて、系統パラメータを推定することが可能である。
- (2) (1)の系統パラメータ推定と状態推定を組み合わせることにより、より信頼性の高いオンライン系統監視が行える。

これまで、系統パラメータ、特に線路パラメータは定数として考えられ、その変動については考慮されてこなかった。このことは状態推定計算はもちろん、各種安定度計算、解析計算に誤差を生じさせ、信頼性を落とす結果となってしまう。今回提案した系統パラメータ推定が状態推定と組

み合わせてオンラインで行えるようになれば、より精度・信頼性の高いオンライン系統監視が可能になるといえる。
(平成8年5月7日受付、同8年12月9日再受付)

文 献

- [1] F. C. Schweppe, J. Wildes : "Power System Static-State Estimation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 89, no. 1, pp. 120-135, 1970
- [2] A. S. Debs : "Parameter Estimation for Power Systems in the Steady State", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 19, no. 6, pp. 882-6, 1974
- [3] A. S. Debs : "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 93, no. 5, pp. 1260-8, 1974
- [4] V. H. Quintana, T. Van Cutsem : "Power System Network Parameter Estimation", Optimal Control Applications & Methods, vol. 9, no. 3, pp. 303-323, 1988
- [5] W. -H. E. Liu, F. F. Wu, S. -M. Lun : "Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, Feb. pp. 81-89, 1992
- [6] A. G. Phadke : "Synchronized Phasor Measurements in Power Systems", IEEE Computer Application in Power, pp. 10-15, April 1993
- [7] R. O. Burnett, Jr., M. M. Butts, P. S. Sterlina : "Power System Applications for Phasor Measurement Units", IEEE Computer Applications in Power, vol. 7, no. 1, pp. 8-13, 1994
- [8] 尾畑, 谷本, 小林, 内田 : "GPS同期による送電線相差角の測定装置の開発と検証", 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, no. 279
- [9] R. O. Burnett, Jr., M. M. Butts, T. W. Cease, V. Centeno, G. Michel, R. J. Murphy, A. G. Phadke : "Synchronized Phasor Measurements of a Power System Event", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1643-50, 1994
- [10] 高橋, 佐藤, 時田 : "系統動揺記録解析システムについて", 平成6年電気学会電力技術研究会, PE94-166
- [11] 鈴木, 中村, 関, 首藤, 中村, 笠井, 田中 : "GPSシステムを利用した送電線路定数測定装置の開発", 平成5年電気学会全国大会, no. 1177
- [12] 佐藤, 関, 工藤, 中村, 笠井, 田窪 : "実潮流を用いた500kV送電線路定数の実測結果について", 平成7年電気学会全国大会, no. 1310
- [13] L. L. Freeis, A. M. Sasson : "Investigation of the Load-Flow Problem", Proc. IEE, vol. 115, no. 10, pp. 1459-1470, Oct. 1968
- [14] 臼井, 岩本 : "電力系統における状態推定法を用いた線路パラメータ推定に関する考察", 平成7年電気学

会全国大会, no. 1311

- [15] 臼井, 岩本: “GPSを用いた状態推定及び系統パラメータ推定に関する考察”, 平成7年電気学会電力技術研究会, PE-95-7

臼井 正洋 (学生員) 昭和47年1月24日生。平成6年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。平成8年3月同大学院修士課程修了。電力系統のオンライン監視に関する研究に従事。平成8年4月より三菱電機(株)に勤務

岩本 伸一 (正員) 昭和23年1月25日生。46年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。49年アメリカ・クラークソン大学大学院修士課程修了。53年3月早稲田大学大学院博士課程修了。同年4月東海大学工学部専任講師、56年同助教授。57年早稲田大学理工学部助教授、61年同

教授、現在に至る。平成4年～5年アメリカ・ワシントン大学客員教授。工学博士。電力系統工学、特に電力潮流計算、過渡安定度、AI応用の研究に従事。