支配微分方程式の推定法に基づく電源脱落量推定

学生員 藤 田 吾 郎 (法 政 大)

正 員 白 井 五 郎 (法 政 大)

Estimation of Power Outage Amount Based on Estimation Method of Dominating Differential Equation.

Goro Fujita, Student Member, Goro Shirai, Member (Hosei University)

This paper describes an estimation method of the amount of power drop after severe generation outage. When a large amount of generation outage occurs, the system frequency goes down to unacceptable frequency level. Frequency drop affects not only customers but generation systems unfavorably. So adequate and quick load-shedding must be carried out to prevent spreads of accidents. In order to perform the load-shedding policy effectively, the amount of the generation outage must be precisely estimated in the short time. So far, several methods have been proposed to estimate the power outage amount by means of the measurement of the decaying frequency variations which are obtained at each local bus. These methods are easily to apply but can not be expected to bring a good result in real power system operations because of noises included in decaying frequency variations.

In order to cope with this problem, a new estimation method based on an estimation method of dominating differential equation is proposed in this paper. For the improvement of the precision of the estimation, the supplementary informations such as a sine wave included in the decaying frequency deviations are incorporated in the equation.

Simulation studies on a model power system consisting of five generating stations and four load points show that the methods is encouraging.

キーワード：電源脱落事故，負荷制限，支配微分方程式，逆問題，補助情報

1. はじめに

大電源脱落事故発生時には、迅速かつ適切な負荷制限の実施が重要である。周波数の低下は需要家に不利になるばかりではなく、発電機機器類の損傷、そして事故波及に至る。緊急時の負荷制限は、各母線に設けられた周波数リレーで実施されるが、適切な量の負荷を制限するためには、電源脱落量の把握が必要となる^{(1) (8)}。この電源脱落量は、電源脱落後の中心周波数の変動から推定することが可能である。しかしローカル母線では、中心周波数は直接得られず、振動を伴った周波数変動しか得られない。そこで何らかの数値処理を施すことで、中心周波数が求められれば、ローカル母線でも電源脱落量が判定できることとなる。

この電源脱落量推定法の代表的な方法として、まず周波数変動の直線近似による推定法^{(1) (1)}があり、また発展形としてカルマンフィルタ等の信号処理論を用いた例^{(1) (10)}も報告されている。さらに、実際の周波数変動は指数関数状であり、直線近似では無理があることから、2次曲線近似に

よる推定法^{(5) (6)}も提案されている。これらの方法は適用が簡単であるが、原理的には振動分の平均をとり平滑化しているだけであるため、推定精度の向上には限界がある。

本報告では、逆問題解析手法の1つとして提案されている、支配微分方程式の推定法^{(4) (7)}を用いた電源脱落量の推定法について述べる。この方法を電源脱落量推定に適用する際、実際の周波数変動には正弦波動揺が含まれているという予備情報をあらかじめ加えることが可能であり、従来の推定方法よりも精度の向上が期待できる。提案方法の有効性を示すために、数値例として、2次曲線近似による電源脱落量推定と比較した結果、提案方法が有望であることが判明した。

2. 電源脱落事故と負荷制限

〈2-1〉. 電源脱落事故の基礎方程式 電源脱落事故時の系統全体の周波数変動は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$M \frac{d\Delta\omega}{dt} = (P_{mo} + K_g \Delta\omega) - (P_{eo} - K_l \Delta\omega) - P_f \quad \text{----- (1)}$$

ここで

- M : 発電機の慣性定数 [p. u. (MV A · s²/rad)]
 $\Delta\omega$: 周波数偏差 [rad/s]
 Pm_0 : 機械的入力初期値 [p. u. (MW)]
 Kg : 発電機の周波数特性定数 [p. u. (MW · s/rad)]
 Pe_0 : 電氣的出力初期値 [p. u. (MW)] ($=Pm_0$)
 Kl : 負荷の周波数特性定数 [p. u. (MW · s/rad)]
 Pf : 電源脱落差 [p. u. (MW)]

この解は周波数偏差 $\Delta\omega$ 以外を定数と仮定すれば、次式の指数関数で与えられる。

$$\Delta\omega = \frac{Pf}{Kg + Kl} (1 - e^{-\frac{Kg + Kl}{M} t}) \quad (2)$$

ただし本稿では、各母線において、事故発生前の諸定数を収集可能であるとしている。ここで M は電源脱落差後の慣性定数であり、事故前の慣性定数 M_0 から減少することとなるが、直接知ることは不可能である。そこで

$$M = \frac{Pm_0 - Pf}{Pm_0} M_0 \quad (3)$$

によって考慮することとする。また Kg も同様であるが、後の数式展開には特に必要ないため省略する。

(2)(3)より、中心角周波数 $\Delta\omega$ が測定されれば、電源脱落差 Pf が得られる。しかし、個々の母線で観測される周波数は図1に示すように、発電機間の共振による振動分や、各定数の変動による誤差が含まれている。このため、電源脱落差 Pf を推定することは容易ではない。

以下では周波数変動の基礎方程式(1)において発電機の周波数特性 Kg および負荷の周波数特性 Kl は一定値であると仮定して、電源脱落差推定式(18)(24)の導出を行っている。しかしこれらは実際には変動することが考えられるため、(18)(24)には、直接含まないようにしている。また数値シミュレーションの際には発電機の周波数特性はブロック線図で示されたガバナとして、また負荷の周波数特性は特性定数(0.01[p. u. (MW/Hz)])として考慮している。

図1 周波数降下の例

Fig.1. An example of frequency deviations.

表1 周波数リレーの設定例⁽⁹⁾

周波数	Hz	負荷制限量	%
60.0		基準値	
59.5		3.33	
59.4		6.67	
59.3		10.0	
59.1		15.0	
59.0		20.0	
58.9		25.0	

整定時間 0.1 s

制限が実施されている。

表1は周波数リレーの設定の例である。各母線に設置された周波数リレーは、系統周波数を常時監視しており、電源脱落差が発生し、周波数が基準値からはずれて降下すると、周波数降下量に応じた負荷制限が実施される。例えば59.5Hz以下で整定時間の0.1s間継続した場合、その母線で受け持っている負荷量の1/30にあたる3.33%が負荷制限の対象となる。周波数低下は本来の指数関数のほか、振動分を伴っているため、整定時間が設けられており、過度の負荷制限が実施されないようになっている。しかし、この方式は確実である反面、周波数の回復に至る程の十分な負荷制限量が設定できないという欠点がある。

3. 推定逆問題解析手法⁽⁴⁾

(3-1) 局所微係数を用いた支配微分方程式の推定

システムの支配方程式推定を取り扱うための方法として、局所微係数を用いた支配方程式の推定方法が提案されている⁽⁴⁾。これはシステムの観測結果を元に、それを構成する線形・非線形の常微分・偏微分方程式を導く方法である。

まず、支配方程式が次式の線形常微分方程式で構成されていることを想定する。

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + a_{r-1} \frac{d\phi}{dx} + a_{r-2} \frac{d^2\phi}{dx^2} + \cdots + a_1 \frac{d\phi}{dx} + a_0\phi + b = 0 \quad (4)$$

すると支配方程式推定問題は、観測ベクトル ϕ およびその微係数が与えられた時、係数 a_i と b を求める問題に置き換えられる。よって上記の方程式を観測回数分連立して解くことで、その最適係数 a_i と b が得られ、支配式が求まる。

支配微分方程式が非線形である場合は、微係数の項を非線形式に置き換えられれば、やはり線形の係数決定問題として解ける。例えば次式のような非線形微分方程式でも、係数項部分が線形になっていることで、適用が可能である。

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + a_2 \left(\frac{d^2\phi}{dx^2} \right)^2 + a_1 \frac{d\phi}{dx} + a_0\phi + b = 0 \quad (5)$$

ただし離散系の観測量 ϕ_i の微係数が直接得られることは少ないため、この場合は h をサンプリング間隔として次の中央差分で近似する。

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=x_i} = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2h} \quad (6)$$

(2-2) 負荷制限の現状 図1の周波数変動から中心周波数 $\Delta\omega$ と電源脱落差 Pf を求めるのは難しい。そこで現状では、シーケンス制御を用いた周波数リレーによる負荷

$$\frac{d^2\phi}{dx^2}\bigg|_{x=x_k} = \frac{(\phi_{k+1} + \phi_{k-1}) - 2\phi_k}{h^2} \quad (7)$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2}\bigg|_{x=x_k} = \frac{(\phi_{k+2} - \phi_{k-2}) - 2(\phi_{k+1} - \phi_{k-1})}{2h^2} \quad (8)$$

測定点は3か所以上を考え、最小2乗法の適用を行う。 $x=x_1, x_2, \dots, x_n$ における測定周波数を $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 、またその m 階微分値を $\phi_1^{(m)}, \phi_2^{(m)}, \dots, \phi_n^{(m)}$ とすれば、連立方程式

$$AX=B \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} \phi_1^{(m-1)} & \dots & \phi_1^{(1)} & \phi_1 & 1 \\ \phi_2^{(m-1)} & \dots & \phi_2^{(1)} & \phi_2 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_n^{(m-1)} & \dots & \phi_n^{(1)} & \phi_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_{m-1} \\ \vdots \\ a_0 \\ b \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \phi_1^{(m)} \\ \phi_2^{(m)} \\ \vdots \\ \phi_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

が成り立ち、 X の最小2乗解は次式で与えられる。

$$X=(A^T A)^{-1} A^T B \quad (11)$$

通常の問題では支配方程式はあらかじめ得られていることが多く、逆問題として扱われることが少なかったため、適用例は少ないが、この方法は簡単であり汎用性が広く、今後注目されるべき方法である。

(3-2) 補助情報に基づく逆問題の解析 本論文で扱う問題は、変動する周波数変動から電源脱落量を推定するという、一種の逆問題に位置づけられる。一般に逆問題解析では、順問題解析に比較して情報が不足しているため、そのままでは適切な解が得られないことが多い。そこで結果から原因を推定する際に、本来用いている結果情報のほか、補助情報を加えることが必要となる。

この補助情報には、解の組み合わせや制約条件などがある。多くの場合には、未知パラメータの物理的な制約条件や、経験を元にして得られる先験情報などがあり、原因を推定する際にこれらを考慮することで、適切な解が得られることがある。

ここでは(4-1)の冒頭でふれるとおり、「母線周波数変動は指数関数と正弦波の和に近似できる」という、補助情報を加えている。

4. 電源脱落量推定方法

(4-1) 支配微分方程式の推定法に基づく推定 母線で観測される周波数変動には、図1に示すとおり、指数関数の他にいくつかのモードの振動分が加わっている。しかし同時に、代表的なモードは1つであると見なすこともできる。そこで「母線周波数変動は、指数関数と正弦波の和に近似ができる」という、補助情報を加えることとする。

まず、中心周波数の支配式(2)の微分形は次式となる。

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} - \frac{Kg+Kl}{M}\Delta\omega + \frac{Pf}{M} = 0 \quad (12)$$

これに対して、補助情報を考慮し、正弦波の外力項が加わった次式で、母線周波数変動の近似を行うことを考える。

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} - \frac{Kg+Kl}{M}\Delta\omega + \frac{Pf}{M} + k \cdot \sin(\omega_s t + \theta) = 0 \quad (13)$$

このままでは左辺4項目の正弦波項の取り扱いが困難となるため、そこでこの式の2階微分式

$$\frac{d^2\Delta\omega}{dt^2} - \frac{Kg+Kl}{M}\frac{d^2\Delta\omega}{dt^2} - k \cdot \omega_s^2 \cdot \sin(\omega_s t + \theta) = 0 \quad (14)$$

を用いて正弦波項を消去し整理すると、線形3階微分方程式が導かれる。

$$\frac{d^3\Delta\omega}{dt^3} - \frac{Kg+Kl}{M}\frac{d^2\Delta\omega}{dt^2} + \omega_s^2 \frac{d\Delta\omega}{dt} + \frac{\omega_s^2(Kg+Kl)}{M}\Delta\omega + \frac{\omega_s^2 Pf}{M} = 0 \quad (15)$$

さらに係数項を整理すると次式となる。周波数変動の近似方法として、次の一般形3階微分方程式の係数を求める問題として解けば、電源脱落量 Pf が求まることとなる。

$$\frac{d^3\Delta\omega}{dt^3} + a_1 \frac{d^2\Delta\omega}{dt^2} + a_2 \frac{d\Delta\omega}{dt} + a_3 \Delta\omega + b = 0 \quad (16)$$

$$Pf = \frac{b}{a_2} M \quad (17)$$

ただし前式では、電源脱落後の慣性定数を用いているため、(3)で置き換える。

$$Pf = \frac{b \cdot Pm_0 \cdot M_0}{a_2 \cdot Pm_0 + b \cdot M_0} \quad (18)$$

時系列データによる連立方程式(9)から、最小2乗法を用いて解を得る際には、 $t=t_1, t_2, \dots, t_n$ における測定周波数を $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n$ とおき、またその m 階時間微分値を $\Delta\omega_1^{(m)}, \Delta\omega_2^{(m)}, \dots, \Delta\omega_n^{(m)}$ とすれば、(9)(11)における各ベクトルと行列は次式となる。

$$A = \begin{bmatrix} \Delta\omega_1^{(m-1)} & \Delta\omega_1^{(1)} & \Delta\omega_1 & 1 \\ \Delta\omega_2^{(m-1)} & \Delta\omega_2^{(1)} & \Delta\omega_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\omega_n^{(m-1)} & \Delta\omega_n^{(1)} & \Delta\omega_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta\omega_1^{(m)} \\ \Delta\omega_2^{(m)} \\ \vdots \\ \Delta\omega_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

(4-2) 2次曲線近似による推定方法

5章では今回提案する、支配微分方程式推定法による電源脱落量推定結果のほか、比較のために、2次曲線近似による推定の結果を示す。そこで後者を説明する。

事故時の周波数は指数関数状となるため、直接最小2乗法を適用して中心周波数を得ることは困難である。そこで周波数変動を2次曲線に近似し、電源脱落量 Pf を求める。まず $\Delta\omega$ を時刻 t の2次関数

$$\Delta\omega = a_1 t^2 + a_2 t + a_3 \quad (20)$$

に近似することを考える。この式の t による微分表現は

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = 2a_1 t + a_2 \quad (21)$$

であり、一方、中心周波数の式(2)の微分表現は

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{Pf}{M} e^{\frac{Kg+Kl}{M}t} \quad (22)$$

である。両式の左辺は等しいことから $t=0$ で整理すると、電源脱落量 Pf は次式で求められる。

$$Pf = -a_2 M \quad (23)$$

また(3)によって電源脱落事故前の慣性定数で表すと

$$Pf = \frac{a_2 \cdot M_0 \cdot Pm_0}{a_2 \cdot M_0 - Pm_0} \quad (24)$$

となる。〈4-1〉と同様に時系列データから(9)(11)を用いた最小2乗解を得るためには次の定義を用いる。

$$A = \begin{bmatrix} t_1^2 & t_1 & 1 \\ t_2^2 & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n^2 & t_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \vdots \\ \Delta\omega_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

5. 電源脱落量の推定シミュレーション

〈5-1〉シミュレーションモデル

図2の5機系統のモデル⁽⁸⁾を用いて、電源脱落事故をシミュレートし、負荷母線における周波数変動データを得る。図4は4か所の負荷母線で得られる周波数変動であり、これを用いて電源脱落量 Pf の推定を試みる。

事故はG5で発電容量の60%が電源脱落したことを想定し、これは系統全体の発電容量に対して15%に相当する。電源脱落事故発生後約2sで、周波数変動許容限界である-1.5Hzに達するため、この間に電源脱落量を推定し、適切な負荷制限を行うことが必要である。各発電所は図3に示すガバナを装備しており、各発電所のガバナ余裕分は各

図2 システムモデル

Fig.2. Power system model.

図3 ガバナモデル

Fig.3. Governor model.

図4 電源脱落後の周波数変動

Fig.4. Frequency deviations after generation drop.

発電容量の3%ずつである。また時系列データ収集のサンプリング間隔は0.1sとしている。なお系統モデルの詳細なデータは文献(8)を参照されたい。

〈5-2〉シミュレーション結果

図5は支配方程式の推定法に基づく電源脱落量推定結果である。図6には従来の推定方法である、2次曲線近似による推定の結果を示している。電源脱落事故発生から約1.5s以下では、残念ながらいずれの方法でも解は不安定である。したがって1.5s以降を両方法の比較の対象とする。

提案方法では1.5sで誤差0~20%の範囲内で推定が行われている。この誤差率は、系統全体から見ると3%以内となり、ガバナによる瞬動予備力の範囲内であることから、妥当であるといえよう。さらにその後も推定値が安定していることがわかる。特に母線8や母線9は、電源脱落事故発電所に至近であることから、振動分の多い周波数変動となるにもかかわらず、推定値が安定しているところが注目される。

一方、従来方法を用いて推定を行った場合、母線6と母線7の周波数変動は比較的安定しているため、1.5sで誤差20%程度となる。しかし、母線8や母線9では、電源脱落量推定値もかなりの変動を伴い、1.5sでは50%を下回り、2sを経過しても20%以下になる場合があることがわかる。

図5 支配微分方程式推定法による推定誤差

Fig.5. Errors of an estimation by the proposed method.

図6 2次曲線近似による推定誤差

Fig.6. Errors of an estimation by 2th-order curve approximation.

このように、支配微分方程式の推定法を用いた電源脱落量推定方法は、振動分を含んだ周波数変動を用いた場合でも、安定な推定値を得られることがわかる。今回の例では事故後2 s以内に電源脱落量の推定を行う必要があるが、提案方法は1.5 sで安定した推定値が得られ、またサンプリング周期も0.1 sであることから有用性があるといえよう。

6. 考察

(6-1) A行列の特性による誤差の発生 今回の電源脱落量の推定では、(16)を元として(19)の行列を構成することで安定した解が得られる。しかし(4)に最小2乗法を適用して解を得る方法は一意的ではない。具体的な例として、(15)を整理する際に係数の与え方を変えると、(16)(17)を得る代わりに次式が得られる。

$$a_1 \frac{d^2 \Delta \omega}{dt^2} + a_2 \frac{d \Delta \omega}{dt} + a_3 \Delta \omega + b = 0 \quad (26)$$

$$Pf = bM \quad (27)$$

(9)(11)における各ベクトルと行列は(19)の代わりに

$$A' = \begin{bmatrix} \Delta \omega_1^{(0)} & \Delta \omega_2^{(0)} & \Delta \omega_1 & 1 \\ \Delta \omega_2^{(0)} & \Delta \omega_2^{(0)} & \Delta \omega_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta \omega_n^{(0)} & \Delta \omega_n^{(0)} & \Delta \omega_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X' = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b \end{bmatrix}, \quad B' = \begin{bmatrix} \Delta \omega_1^{(0)} \\ \Delta \omega_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \omega_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

となる。

図7がこの時の推定結果である。図5と同一の結果が得られると思われるが、このように(15)の係数の整理の仕方により、誤差が発生しやすくなる。これは次項で述べるように、連立1次方程式(9)を構成するAの特性の違いが原因である。

(6-2) 行列の特異値と誤差発生との関係⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 連立1次方程式における誤差の範囲は、特異値分解定理により説明が可能である。

$A[m \times n]$, $X[n]$, $B[m]$ による連立1次方程式

$$AX=B \quad (29)$$

において、 $m \geq n$ とすれば、Aは特異値分解により、左特

異値行列 $U[m \times m]$, 右特異値行列 $V[n \times n]$, および特異値 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ からなる対角行列 $\Sigma[m \times n]$ に分解される。

$$A=U\Sigma V^T \quad (30)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \\ \vdots & & \vdots & \ddots & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

ここで条件数 $Cond$ を、最大特異値 λ_1 , および0でない最小特異値 λ_n から

$$Cond.\Sigma = \frac{\lambda_1}{\lambda_n} \quad (32)$$

と定義すると、測定値 B の誤差 ΔB と、解ベクトル X の誤差 ΔX の関係が特異値分解定理により次式で定義される。

$$\frac{|\Delta X|}{|X|} \leq \frac{|\Delta B|}{|B|} \cdot Cond.\Sigma \quad (33)$$

したがってAの特異値のバラツキが小さければ、解ベクトル X が安定することとなる。

図8は、推定誤差の少ない図5の条件数 $Cond$ の分布図である。いずれも1.5 sあたりで 10^1 オーダーに位置していることがわかる。一方、推定誤差の多い図7に対応する分布図が、図9である。こちらは 10^2 オーダーであることがわかる。このように、連立1次方程式の誤差要因は、Aの特性にあることが示されている。

図7 支配微分方程式推定法のA行列の特性による誤差例

Fig.7. Example of errors by the characteristic of A.

 図8 推定誤差が小さい時のA行列の条件数分布
Fig.8. $Cond.$ distributions of A for small estimation errors.

図9 推定誤差が大きい時のA行列の条件数分布

Fig.9. Cond. distributions of A for large estimation errors.

〈6-3〉誤差発生抑制方法 本推定方式は測定値の高次微分値を用いているため、解が不安定になりやすいという欠点がある。一般に推定問題では、測定値の高次微分値による誤差の発生について考慮する必要がある。これは、測定値が微分されていくほど、本来の信号源がノイズに埋もれて行くからである。そしてこのような推定問題が連立1次方程式に帰着された時、 A の条件数 $Cond.$ が大きくなる。

この解の不安定性を改善するひとつの方法として、特異値分解法により、特異値行列 $\Sigma[m \times n]$ の特異値の一部を修正することが考えられる。しかし、この方法は特異値が数十個のオーダーで存在する場合には非常に有効であるが、今回の電源脱落量推定の場合は特異値が3つしかなく、解が過度に平滑化されてしまう。

そこで先に述べた様に A の構成方法は複数考えられることに着目し、この構成方法を変えることで解を安定化させることを考えた。今回の推定では A の構成方法は4通り存在するため、これらについて条件数 $Cond.$ および推定結果の比較を行った。その結果、 A を(19)のとおり構成することにより $Cond.$ が小さくなるとともに、安定解が得られることが判明した。

これは A に $\Delta\omega$ の3階の微係数を用いることを避けていることに他ならない。支配微分方程式の推定方法では、 A に高次の微係数を含むことは避けがたいため、他の推定問題を扱う際も同様の考慮を行い、なるべく安定な A を用いる工夫が必要である。

7. まとめ

本論文では、緊急時における電源脱落量判定において、逆問題解析手法である支配微分方程式推定法に基づいた電源脱落量推定方法を提案した。シミュレーションの結果、従来の2次曲線近似推定法と比較して、精度がよく安定した推定が可能であることが示された。また、支配微分方程式の推定を行う際の誤差の発生要因にふれ、安定な解を得るための方針を示した。

今後は、提案手法を取り入れた、総合的な緊急時の負荷制限法の確立を計りたいと考えている。

文 献

- (1) 福田朋悟, 村元俊昭, 押田秀治, 合田忠弘, 中村正則, 成田利春, 「事故中の負荷脱落を考慮した新型SSCの開発と実用化」, 昭和62年電気学会電力技術研究会講演論文集, PE-87-152(1987-7)
- (2) 日本機械学会編, 「逆問題のコンピュータアナリシス」, コロナ社(1991-11)
- (3) 武者利光・岡本良夫, 「逆問題とその解き方」, オーム社(1992-3)
- (4) 久保司郎, 「逆問題」, 培風館(1992-5)
- (5) 針谷幸司・藤田吾郎・竹内茂・白井五郎, 「電源脱落量推定の一検討」, 平成6年電気学会全国大会講演論文集, No. 1259(1994-3)
- (6) 針谷幸司・藤田吾郎・竹内茂・白井五郎, 「電源脱落量推定の一検討(第2報)」, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, No. 203(1994-7)
- (7) 藤田吾郎・針谷幸司・竹内茂・白井五郎, 「支配微分方程式推定法による電源脱落量判定」, 電力技術研究会研究資料, PE-94-155(1994-10)
- (8) 藤田吾郎・白井五郎, 「ローカル情報を用いた最適な負荷制限」, 電気学会電力・エネルギー部門誌(B), vol. 115-B, No. 8 (1995-8)
- (9) R.M.Maliszewski, G.L.Wilson, "Frequency Actuated Load Shedding and Restoration", IEEE Trans. Power Syst. (1971-7,8)
- (10) A.A.Girgis, F.M.Ham, "A New FFT Based Digital Frequency Relay For Load Shedding", IEEE Trans. Power Syst. (1982-2)
- (11) S.Paul, S.K.Basu, U.S.Hazra, "Novel Frequency-factor method for power-frequency measurement and estimation of load shedding", IEE Proc., vol.134, Pt C, No.6 (1987-9)

藤田 吾 郎 (学生員) 1970年1月12日生。1992年3月法政大学工学部電気工学科卒業。同年同大学工学研究科電気工学専攻入学。現在博士課程在学。電力システムの緊急制御に関する研究に従事。

白 井 五 郎 (正員) 1941年6月21日生。1970年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年法政大学工学部研究助手。現在、同教授。工学博士。電力システムの安定化制御、需給運用制御、電圧安定性などの研究に従事。