

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05946

研究課題名(和文) 電気事業のリスクとエコバランスを考慮した新しい事業価値評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of new asset evaluation method considering risk and an ecology balance of electric power industry

研究代表者

宮内 肇 (MIYAUCHI, Hajime)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：20181977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：新しい事業価値評価法として、期待効用理論に基づくUNPV法を提案し、これまで火力発電事業に適用し検証を行っている。本研究では、自然環境に出力が左右されリスクの大きい太陽光発電や風力発電事業をUNPV法で効用関数を指数関数としたRSVM(リスク鋭感的価値尺度)により評価し、本手法の有効性を検証する。

一方で、供給信頼度は、一般に、故障等の確率分布に対する期待値で評価される。RSVMは、確率頻度分布に対する効用関数によるリスクの重みづけを行うところに本質がある。したがって、RSVMを供給信頼度指標として用いることで、新たな供給信頼度指標が提案できることに気付き、簡単な離島系統での検証を試みた。

研究成果の概要(英文)： UNPV method based on expectation utility theory is proposed as a new asset evaluation method of an investment. In this research, we estimate photovoltaic system and wind turbine generation project by UNPV method, which outputs are influenced by a natural environment. We compare the results of conventional Mean-Variance (MV) method and RSVM (Risk Sensitive Value Measurement) method, which uses the exponential function as the utility function in UNPV method. RSVM method can indicate the optimum scale and the maximum scale of the project.

On the other hand, the reliability of power system is generally estimated by the expectation value to the probability distributions such as failure period. The essence of RSVM method is the weighting for the risk of probabilistic distribution by the utility function. Therefore, we find that RSVM can be used as the reliability index. Then, we investigate a reliability of the power system in a small isolated island by RSVM.

研究分野：電力システム工学

キーワード：事業価値評価 リスク 最適投資規模 再生可能エネルギー リスク鋭感的価値尺度 供給信頼度指標

1. 研究開始当初の背景

かつて電気事業は公益産業として自然独占が認められていたが、1990年代以降、欧米を中心に電力自由化が進められてきた。我が国でも、1995年に発電部門への独立系発電事業者の参入から電力自由化がスタートし、2000年の小売り部分自由化を経て電力自由化が進められてきた。特に、2011年の東日本大震災以降、電力自由化が加速され、2016年には小売りが全面自由化され、2020年には発電分離が計画されている。

電気事業設備の建設には、長い歳月と巨額の資金を要する。規制環境下では、そのコストを長期間掛けて回収するスキームであった。しかし、電力自由化環境下では、例えば発電事業者は、コストとなる燃料費だけでなく、収入である電力価格の変動にも直面し、電気事業は極めてリスクの高い産業へと変貌する。それ故、電気事業においても、これらの種々のリスクが考慮できる事業価値評価手法の開発が必要である。

事業投資に関わる価値評価法としては、NPV法(Net Present Value法、純現在価値法)がよく知られている。NPV法は将来の収益が確実である場合には有効であるが、これからの電気事業のように収益が不確実な場合には、事業評価を正しく評価することが難しく、また、事業環境の変化に対応した投資を選択することができない。

以上のような背景から、リスクを考慮した電気事業の価値評価手法の開発が望まれている。そこで、流動性の低い市場で取引される財に対するリスク(不確実性)を含む収益評価手法である効用無差別価格(Utility Indifference Price)という概念を用いて、新たに電気事業の事業価値評価手法を開発し、その有用性などを検証する。

2. 研究の目的

本研究では、既に基礎的な研究を行っている効用無差別価格を用いたリスク価値評価手法(UNPV法:Utility indifference Net Present Value法)と、またそれを簡約化することで導かれるRNPVプロビットモデルについて精緻化することを目的とする。

これらUNPV法とRNPVプロビットモデルの現実化を進めるため、風力発電事業の事業価値を評価することで、本手法が実際に適用可能であることを示す。さらに、発電事業のライフサイクル評価と融合し、経済的リスクと社会適合性の両面を考慮した新しい事業価値評価手法を開発することを考えている。

本研究は、リスクを考慮した電気事業の事業価値評価を行うために、経済学の期待効用理論を電力システム工学に結び付ける点で独創的である。さらに経済的見地に留まらず電気事業のライフサイクル評価という社会適合性とも結び付けることまでを狙っている。得られた成果は、種々の電気事業に適切な投資シグナルを与えることができ、電力の

安定供給に貢献することができるものと期待される。

3. 研究の方法

これまで、UNPV法やRNPVプロビットモデルを火力発電事業に適用し検証を行ってきたが、火力発電事業以外の電気事業、すなわち、再生可能エネルギー電源などの発電事業や送電事業などへの適用も試みる。そこで、再生可能エネルギーで特に自然環境に出力が左右されリスクの大きい太陽光発電や風力発電事業を対象として、事業価値が正しく評価できるか検証する。

一方、我々は再生可能エネルギーを含む電力システムの信頼性に関する研究も行ってきた。供給信頼度は一般に、LOLP(電力量不足確率)などの指標を用いて、システムの信頼性を評価するが、これらの指標はシステムに起こる事故の確率分布に対する平均値(期待値)で表現するものである。重大事故であっても発生頻度が低ければ、これらの指標は期待値で評価するため、信頼性は余り低くないと評価されてしまう恐れがある。本研究を進めていく過程で、このような重大事故をリスクとして考えれば、本研究で扱っているUNPV法を適用できると気付いた。このことから、新しい供給信頼度の評価指標の開発にも取り組み始めている。

本研究の最終目標としては、UNPV法及びRNPVプロビットモデルにより事業価値を経済的側面から判断するのではなく、ライフサイクル評価(LCA:Life Cycle Assessment、エコバランス eco-balance)など社会適合性とも融合していくことであり、さまざまな観点からの事業価値評価手法の開発を進めていく。

4. 研究成果

4.1 UNPV法

不確実性のあるリターンの価値の考え方の一つに、期待効用理論に基づく定義として効用無差別価格(Utility Indifference Price)がある。効用無差別価格としてのXの価値は、効用関数を $u(x)$ とし、 $u(0)=x_0$ であるならば、

$$E[u(x_0 - v + X)] = 0 \quad (1)$$

を満たす x_0 で表される。なお x_0 は非確率変数である。この定義式の意味は、「Xなる不確実なリターンを受け取る権利を得るのみにだけ支払ったとき、期待効用収益は0」と言うことを示す。この意味でXとは釣り合っているとと言える。投資家(Xの買い手)はXの価格がこの式で決まる x_0 の値以下であれば買う価値を持つ。

ある事業を行うとして、将来得られるキャッシュフロー列が確率変数 $X = \{X_n; 1, 2, \dots, n\}$ で与えられた場合、多数の試行を行った結果得られるランダムな現在価値RPV(Random Present Value)は式(2)で表される。

$$RPV(X) = \sum \frac{X_n}{(1+r)^n} \quad (2)$$

ただし、 r は無リスク金利である。RPV(X)の効用無差別価格を、 X の効用無差別現在価値UPV (Utility indifference Present Value) と呼ぶ。UPV(X) は

$$E[u(-v + RPV(X))] = 0 \quad (3)$$

を満たす の値である。 の正負により事業価値の採否を決定する。なお、本研究では、効用関数として、

$$u(x) = 1 - \exp(-\beta x) \quad (4)$$

を用いる。ただし、 β はリスク回避度であり、 $\beta > 0$ とする。

4.2 RSVM

UNPV 法の内、効用関数として指数型の関数を採用したものを RSVM(Risk Sensitive Value Measure)といい、式(5)で表される。

$$RSVM(\beta, X) = -\frac{1}{\beta} \log(E(e^{-\beta X})) \quad (5)$$

RSVM はリスクに対して鋭敏であり、UNPV 法の場合と同様に、RSVM の値が正で大きいほど投資価値があると判断できる。

RSVM は規模のパラメータを導入することで、規模のリスクの評価もできる。価値付けしたいランダムな量に規模のパラメータを乗じることで、規模のリスクが評価できる。すなわち、

$$RSVM(\beta, \lambda, X) = -\frac{1}{\beta} \log(E(e^{-\beta \lambda X})) \quad (6)$$

4.3 太陽光発電事業の評価

本研究では、再生エネルギーの全量固定価格買取制度 (FIT) を用いた新設の太陽光発電施設について、事業価値評価を行う。

設備の投資期間を 20 年間と想定し、日々の日射量と機器の故障だけを不確実なもの、すなわちリスクと仮定する。その他自然災害などの不確実性は一切ないものとする。不確実な日々の日射量と機器の故障は、確率変数で表される。そのため、キャッシュフローも確率過程となる。収入は (FIT による価格 $EP[\text{yen/kWh}] \times$ 出力電力量 $PO[\text{kWh}]$) で表され、支出は太陽光発電なので燃料費はなく維持費 $OMC[\text{yen/kWh} \cdot \text{year}]$ のみであり、収益はその差で求められる。これより、太陽光発電事業の年間の収益 profit は、

$$\text{profit} = \sum_{i=1}^{365} (EP_i - PO_i) - OMC \quad (7)$$

i は年間のある時点を表わし、単位は day である。式(7)で得られる profit をキャッシュフロー列 $\{X_n; 1, 2, \dots, n\}$ の確率変数 X の値とする。

太陽光発電設備の 1 日の出力 Output は、

$$\text{Output} = \text{設備容量} \times \text{日射量} \times \text{設備係数}$$

で求めた。日射量は月間の平均日射量を基準として、平均日射量の 5% を標準偏差とする正規分布で平均日射量の周りを変動させ、不確実性を表現した。また、設備係数は 0.72 と

設定している。

本研究では、太陽光発電事業を行う場所として、日射量が異なる熊本・福岡・宮崎の 3 地点を選定し、比較を行った。各地点の年間の平均日射量を表 1 に示す。平均日射量は宮崎がやや多い程度であるが、各月の平均日射量を見ると、宮崎は年間を通して比較的変動が少ないが、福岡は冬季の月平均日射量が夏季の約半分にまで落ち込む。

表 1 各地点の平均日射量

地点	福岡	熊本	宮崎
平均日射量 [kWh/m ² /day]	4.10	4.31	4.59

機器の故障としては、簡単のため、太陽光パネルを交流系統に接続するパワーコンディショナーの故障のみを考慮している。経年劣化による出力の低下や太陽光パネルの破損等は考慮しない。パワーコンディショナーの故障の有無を 5 年毎に判定し、故障確率は、表 2 に示すように、使用年数が長くなるにつれて高くなるよう設定する。故障が発生した場合、1kW あたり 50,000yen の修理費がかかるものとする。なお、故障による太陽光発電施設の稼働停止による損失は、この修理費の中に含まれるものとする。

表 2 太陽光発電設備の故障確率

年数	5 年	10 年	15 年
故障確率	5%	10%	30%

本研究のシミュレーションで用いた定数をまとめる。FIT 価格は 30yen/kWh、維持費 OMC は 8,000yen./kW/year、無リスク金利 r は 3%、リスク回避度 β は 0.001 と設定した。20,000 回の試行を行う。

(1) 故障を考慮しない場合

故障を考慮しない場合、図 1 に示すように、各地点の RPV の分布は正規分布に近い形となる。また、基本統計量を表 3 に示す。

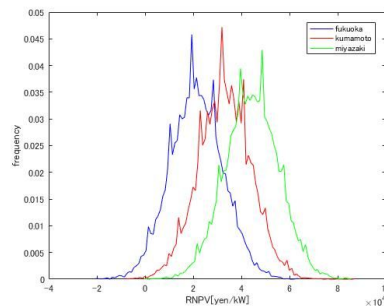


図 1 RPV の確率密度分布 (故障なし)

表 3 RPV 分布の基本統計量

地点	福岡	熊本	宮崎
平均値	21,331	32,961	44,463
分散	1.19×10^8	1.19×10^8	1.27×10^8
最大値	61,352	74,206	89,310
最小値	-18,665	-8,382	2,866

RSVMの結果を、従来から事業評価によく用いられている平均分散法(MV法)による評価結果と比較する。MV法は、収益の期待値である平均値に加え、その周りにどの程度分布するかを分散により評価するものである。RPVをXとにおいて、Xの平均値をE[X]、分散をV[X]、を投資規模の大きさ、を事業者のリスク回避度とすると、式(8)で評価される。

$$MV = \lambda \times E[X] - 0.5 \times \beta \times \lambda^2 \times V[X] \quad (8)$$

MV法はRPV分布が正規分布であると仮定したとき、正規分布が平均と分散の2つのパラメータによって完全に説明できるという便宜性による。したがって、MV法は直観的で分かりやすく、また、計算し易いため、広く事業評価に用いられている。

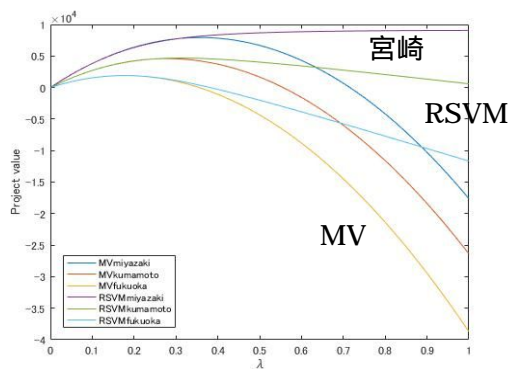


図2 太陽光発電事業に対するRSVMとMVの比較(故障なし)

図2に、故障のない場合について、RSVMとMVの値を比較した結果を示す。横軸は規模である。

表3に示すように、宮崎では20,000回試行を行っても一度も事業価値が負とならない。しかし、図2に示すように、MV法では、事業規模を大きくすると大きく負に評価され、事業を実行しないと決断される。これは事業を行っても損失が発生しないという現実と矛盾する。MV法では、分散の大きさをリスクとして評価するためであり、このことから、MV法は望ましい評価手法とは言えない。一方、RSVMは少しずつ増え続けていることから、正当に評価していると言える。

宮崎以外の熊本、福岡の2地点では、RSVMによる評価では上に凸の曲線となり、規模を大きくするとやがて評価が負となる。RSVMが0と交わる点が、投資できる最大規模であり、この規模までは投資家は満足できる形で事業価値を上げることができる。また、最大値が最適投資規模を示している。このように、RSVMでは、RPVの試行結果に負のものが含まれる場合、最適投資規模や最大許容投資規模を求めることができる。

(2) 故障を考慮する場合

故障を考慮すると3地点ともRPVが負となる試行が発生する。また、確率密度分布も図3に示すように、故障に応じて複数の正規分

布が重ね合わさったような分布を示している。これは、故障が発生した際に50,000yenの修理費が発生することによるものと考えられる。図4に、故障のある場合の、RSVMとMVの値を比較した結果を示す。

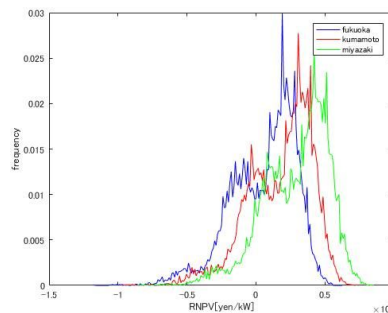


図3 RPVの確率密度分布(故障有)

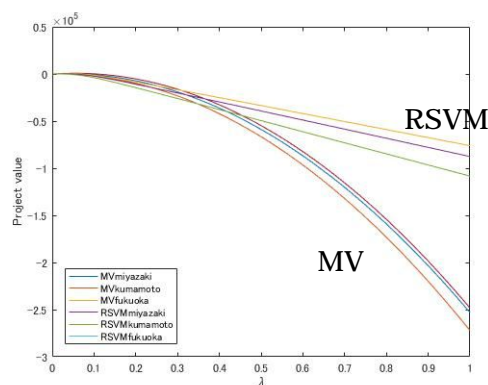


図4 太陽光発電事業に対するRSVMとMVの比較(故障有)

図4より、RSVMとMV法の両手法とも規模が増加するにつれて事業価値が減少している。また、両手法ともほぼすべての規模で値は負となり、投資は実行されないと判断される。これは故障なしの場合と比べて、RPVの分布で負の場合が多く、投資を実行した場合のリスクがより大きいと判断されるためである。また、RSVMとMV法を比較すると、規模が増加するにつれてRSVMは直線的に事業価値が減少するのに対し、MV法は規模が増加するにつれて傾きが大きくなり、事業価値がより減少する。これは、MV法が収益の分散をリスクとして見るからであり、RPV分布が正規分布からかけ離れた形状である場合、評価対象の分布と等しい平均と分散を持った正規分布を評価することになるため、本質的でない評価を下すことになる。

4.4 風力発電事業の評価

4.3節と同様に、本節では、風力発電事業についてRSVMによる評価を行う。

設備の投資期間を20年間と想定し、風力と機器の故障だけを不確実なもの、すなわちリスクと仮定する。その他自然災害などの不確実性は一切ないものとする。

風力発電機によるprofitは、太陽光発電と同じ式(7)で表されるものとする。ただし、FIT価格は21yen/kWh、維持費OMCは

6,000yen./kW/year とした。

風力発電機出力 Output は、カットイン風速 V_{in} (本研究では 3m/s) から定格風速 (同 12m/s) までは、式(9)で求められる。

$$\text{Output} = 0.5 \left(\frac{\pi R^2}{4} \right) d (V - V_{in})^3 \quad (9)$$

ここで、 R は風車の直径、 d は空気密度、 V は風速である。定格風速からカットアウト風速 (25m/s) までは、定格出力 2,000kW 一定と設定する。

年間の出力を求めるために、各地点の月間平均風速 \bar{V} を元に、風速 V が式(10)のレーレ分布に従うものとする。

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right) \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

風速分布が式(10)のレーレ分布に基づくものとし、それより、式(9)によりまず年間の総収益を求める。

本研究では、北海道宗谷岬、高知県室戸岬、熊本県阿蘇市のデータを用いて検討した。各地点の年間平均風速を表 4 に示す。

表 4 各地点の平均風速

地点	宗谷岬	室戸岬	阿蘇
平均風速 [m/s]	7.6	6.9	4.7

表 5 に示す故障を想定する。故障の大きさにより故障継続時間が異なる。なお、ここでは故障時の修理費は考慮していないが、故障期間の収益を年間収益から差し引く。

表 5 風力発電設備の故障確率

故障の程度	小	中	大		
故障継続時間 [day]	3	7	14	30	90
確率 [%]	20	25	20	20	15

図 5 に、RSVM による事業価値評価の結果を示す。無リスク金利やリスク回避度などのパラメータは、4.3 節の太陽光発電の場合と同じ値を用いて計算を行った。

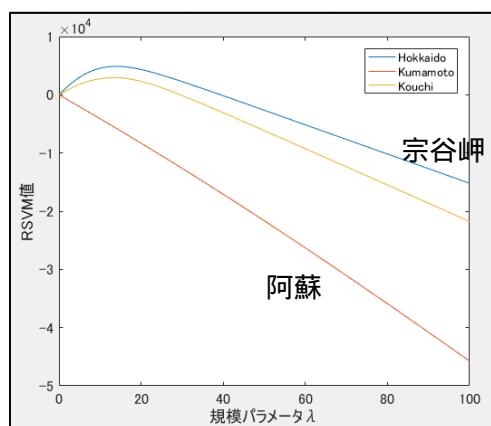


図 5 風力発電事業に対する RSVM
図 5 より、阿蘇の RSVM は単調減少であり、

事業としてはリスクが大きく、このリスク回避度を取る事業者の場合、事業を実行しないことを示している。これは、他の 2 地点に比べると平均風速が低いため、得られる収益に期待が持てないためである。他の 2 地点、すなわち、宗谷岬と室戸岬では、RSVM は規模を横軸にとると、上に凸の曲線を示し、最大点で最適投資規模を、縦軸の 0 と交わる点で最大投資規模を示している。この 2 地点において、最適投資規模にはほとんど差はなく、で 1、すなわち、1 機程度であるが、最大投資規模では 10 の違いがあり、宗谷岬の方が、より大きな事業の実行可能であることを示している。

4.5 RSVM を用いた信頼度評価指標

システムの供給信頼度も故障の発生や需要の変動を確率事象と捉え、その結果生じる停電時間などの分布の期待値を、供給信頼度指標として用いてきた。しかし、図 6 に示すように、ex4 のように頻度は少ないが非常に長い停電が起こる分布と、0.4hour/year を中心に停電が発生する分布とがあるが、停電時間の期待値は全て 4 つとも同じ 0.4hour/year である。需要家から見れば非常に長い停電はリスクが大きく、これらが全て同じに評価されるのは納得できない。また、本来分布が持っていた情報を失っていることも見過ごせない。

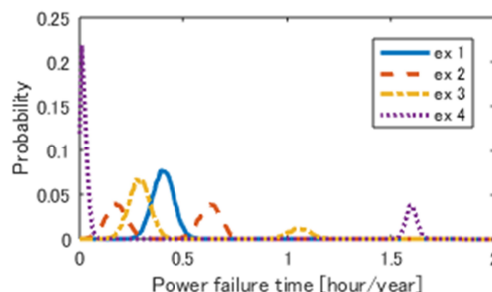


図 6 停電時間の分布例

一方、前節まで述べてきた RSVM の本質は、確率頻度分布に対する効用関数によるリスクの重みづけにある。このことから、供給信頼度指標に RSVM を適用することで、リスク評価の適正化を図れるものと考えた。

そこで、離島の孤立システムをモデルとして用いて検討を行った。夏季の最大需要が平均 50MW の離島を想定し、10MW のディーゼル発電機 7 機で電力を供給しているものとする。電力需要の変動を確率変数としてモデル化する。まず、最大電力需要は、季節ごとに変化するものとし、日々の電力需要は、最大それぞれの季節ごとの最大電力需要を平均とし、その周りで正規分布に従って変動するものと仮定した。

このシステムにおいて、ディーゼル発電機を 1 台取り除いたときに、太陽光発電と風力発電機で同等の信頼度を回復するのに必要なそれぞれの容量を求める。

まず、従来の LOLE (停電時間期待値) で信

信頼度評価を行う。ディーゼル発電機 7 機の時の LOLE は 18.1 hour/year であるので、これを満たす領域で、ディーゼル発電機を 1 機取り除いた 6 機に、太陽光発電 (PV) と風力発電機 (WTG) がどれ位の容量を持てばよいか調べる。図 7 に、PV と WTG の容量の選定例と、そのときの停電時間の確率分布を示す。

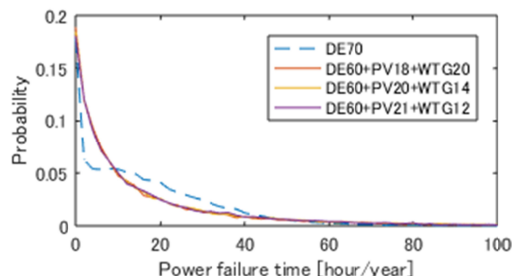


図 7 従来法 (LOLE) で基準を満たす太陽光発電と風力発電の組合せ

図 7 より、LOLE による評価はほぼ同じであっても、ディーゼルエンジン発電機 1 機の代わりに PV と WTG を用いた場合、停電リスクの性質が異なる。ディーゼル発電機だけの方が 20~40hour/year 付近の故障頻度は高いが、PV と WTG を用いた場合、ディーゼルエンジン発電機だけの場合より、長時間停電のリスクは高い。

図 8 に、RSVM による供給信頼度評価の結果を示す。図 7 で示した組み合わせは信頼度基準を満たさず、よりリスクの高い電源構成と判断される。これより、RSVM により、より長い停電の発生をリスクとして評価できる可能性が示されており、新しい供給信頼度へと繋がっていくものと期待している。

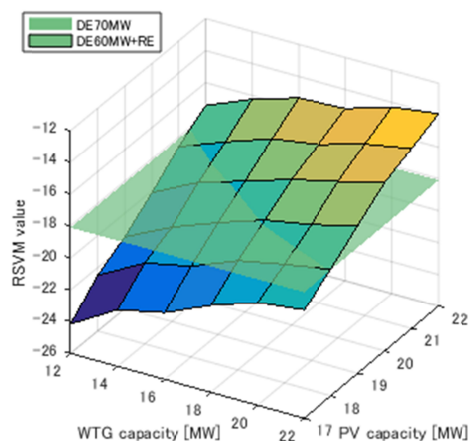


図 8 RSVM による供給信頼度評価例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ohn Zin Lin, H.Miyauchi, "Reliability Forecasting in Distribution System Considering Variable Failure Rate: Combination of Equipment Inspection Method and Weibull Analysis", 査読有, International Review of Electrical Engineering, Vol.12, No.1, pp.67-72(2017).

<https://doi.org/10.15866/iree.v12i1.11054>.

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) 古川義英, 宮内肇, 三澤哲也: 「リスク鋭感的価値尺度による新しい供給信頼度指標の一提案」, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018 年 3 月 14 日, 九州大学(福岡県福岡市)

(2) Y. Furukawa, H. Miyauchi, T. Misawa, "Consideration of Relation between the Smoothing Effect and Economics in Wind Power Generation Project Using RSVM", 第 70 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017 年 9 月 27 日, 琉球大学(沖縄県中頭郡)

(3) 古川義英, 宮内肇, 三澤哲也: 「ならし効果を考慮した風力発電事業の RSVM 評価」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2017 年 9 月 5 日, 明治大学(東京都中野区)

(4) Y. Furukawa, H. Miyauchi, T. Misawa, "Basic Study on Thermal Power Plant Investment Portfolio based on Risk-Sensitive Value Measure", 23rd International Conference on Electrical Engineering, 2017 年 7 月 4 日, Weihai(China)

(5) 古川義英, 宮内肇, 三澤哲也: 「発電事業投資ポートフォリオの RSVM 評価」, 平成 29 年電気学会全国大会, 2017 年 03 月 15 日, 富山大学(富山県富山市)

(6) 井手裕太, 宮内肇, 三澤哲也: 「期待効用理論に基づく事業価値評価に使用する効用関数のパラメータ推定」, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 03 月 16 日, 東北大学(宮城県仙台市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕出願なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮内 肇 (MIYAUCHI, Hajime)
熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・
准教授

研究者番号: 20181977

(2) 研究分担者

三澤 哲也 (MISAWA, Tetsuya)
名古屋市立大学・大学院経済学研究科・
教授

研究者番号: 10190620

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし