

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04087

研究課題名(和文)自動調整型Correntropyによる電力負荷予測手法の再構築

研究課題名(英文) Reconstruction of a forecasting method of electric power loads using auto-tuning type correntropy

研究代表者

福山 良和 (Fukuyama, Yoshikazu)

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：10710022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：新電力の需給運用に不可欠な翌日最大電力負荷予測に対し、スマートメータ通信の一時遅延等による異常値対応にMaximum Correntropy Criterion(MCC)をベースとしたニューラルネットワークを用いた高精度予測方式を世界初で開発した。カーネルサイズを自動調整し、学習データの何割を学習しないかというRmax値の調整をEarly Stopping適用により必要としない方式を確立した。ニューラルネットワークの学習率という課題に対し、Coin Betting手法を用いることにより、学習率を自動的に調整できる方式とした。これらにより、実運用者のエンジニアリングをほぼなくすことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新電力の需給運用に不可欠な翌日最大電力負荷予測に対し、スマートメータ通信の一時遅延等による異常値対応にMaximum Correntropy Criterionを用いた高精度予測方式を世界初で開発した。各種ハイパーパラメータ調整を最小限とし、実用性で学術的意義が大きい。

新電力の場合、スマートメータデータ受信遅れ等により需要値が一時的に低いデータも用いた学習への対応が実務上重要課題となっている。また、電力業界以外からの参入も多く、需要予測専門家を必要としない予測方式確立が切望されている。本研究成果により、我が国が進める新電力等による電力分野自由化進展を促進できると考えられ社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)： Peak electric load forecasting considering outliers from smart meters due to communication delays is a crucial operation in power producer and suppliers (PPSSs). To tackle this challenge, this research has developed a novel Maximum Correntropy Criterion based artificial neural network for peak load forecasting. The method can modify a kernel size of MCC automatically and Rmax (a ignoring rate in learning data) is also automatically tuned using early stopping. Moreover, using the Coin Betting, learning rate for the neural network is also automatically tuned during learning. Therefore, it is not required to tune various hyper parameters.

研究分野：理工系 工学 電気電子工学 制御・システム工学

キーワード：翌日最大電力負荷予測 異常値対応 コレントロピー エンジニアリングレス ロバスト推定

1. 研究開始当初の背景

電力負荷予測は、過去の実データをもとに未来の負荷を精度よく予測することを目的とする。この際、利用する過去の実データは、通常、不良データを含まない正常な状況下での計測データ(以下、正常計測データ)のみであり、この正常計測データを学習データとして、様々な手法により予測の精度向上を目指す。正常に計測できなかったデータ(以下、異常値)を含めないために、通常、計測データの上下限界を経験的に設定し、この範囲を逸脱したら異常値とする方法や、その他、問題に固有の知識を用いた前処理が長らく利用されてきた。予測に利用される重回帰分析や人工ニューラルネット(以下、ANN)は、学習データとの最小二乗誤差(以下、LMS)を評価基準とし、これを最小化することにより、線形あるいは非線形のモデルを構築する。しかし、LMSを用いると、異常値があった場合、このデータに合わせるためにモデルに誤差が入ってしまう。このため、全体として精度を向上することが困難となる課題があり、上述の前処理が必要であった。

近年のIoT技術の進展により、大量データを利用することが可能となり、これまで以上に、電力系統全体の負荷予測のみならず、配電フィーダ、工場・ビル・家庭群など様々な負荷予測が可能となる。配電フィーダの負荷予測は太陽光発電が大量導入された場合の実負荷予測として必要性が高まっており、工場・ビル・マンション・家庭群等の負荷予測は、各対象向けのエネルギーマネジメントシステム(Factory Energy Management System(FEMS), Building EMS(BEMS), Home EMS(HEMS))に必須となる。これらのシステムから入手できる実データは、計測遅れ、センサ設定間違い、通信障害など様々な要因から異常値を含む。例えば、新電力においては、ビジネスを新しく始めることもあり、経験者を前提とした上記前処理などの実施が困難である。また、工場・ビル・マンション・家庭等の負荷予測も、これまであまりやられておらず、経験者を前提とした上記前処理などの実施が困難である。また、電力会社においても、経験者による上記前処理のエンジニアリング業務の効率化が望まれている。

信号処理分野で開発され、データとモデルとの差をガウスカーネルで計算し最大化問題として扱う Maximum Correntropy Criterion(以下、MCC) (文献①)は、異常値が入っていたとしても、多くの正常計測データから適切なモデルを構築できる可能性がある方法として利用が始まっている。本研究の提案者も、LMSを評価基準として利用してきた負荷推定型の配電系統状態推定に世界で初めてMCCを適用し、不良データが入っていたとしても、適切なモデルが構築可能なことを確認している(文献②)。これまで、MCCは電力系統においては、送電系統状態推定と風力発電の出力予測に適用されているが(文献③～⑥)、負荷予測への適用はない。MCCを用いることにより、従来のLMSの課題を克服し、異常値があっても適切なモデルを構築できる可能性があるが、電力系統の従来研究のみならず、すべてのMCC適用論文で、ガウスカーネルの鋭利性を決定するカーネルサイズは、個々の問題に対して経験的に設定されていた。しかし、上述のように、今後、電力・エネルギー分野においては、負荷予測対象が膨大になることが予想され、システム構築の度に経験的にカーネルサイズを適切に設定することは困難である。また、ANNの各種ハイパーパラメータを問題に応じて適切に設定することは同様に困難である。

2. 研究の目的

本研究では、電力負荷予測を行う際に、大量の実データの中に、異常データがあったとしても、異常データを除くための前処理を行うことなく、正常データのみを用いた場合とほぼ同精度の予測精度を得られる高次ANNを用いた電力負荷予測方式の開発を目的とする。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下の研究目標を設定し、研究を実施した。

- (1) MCCを負荷予測に適用する際に、ANN学習時にカーネルサイズを自動調整する方法の確立
 - ・従来のカーネルサイズ自動調整方法の調査
 - ・異常値を無視したANN学習方式の確立
- (2) ANNの各種ハイパーパラメータの調整を必要としないロバストな推定方法の確立
 - ・ハイパーパラメータ調整を必要としない方法の調査
 - ・電力負荷予測に対して、ハイパーパラメータ調整を必要としない方法の確立

4. 研究成果

(1) MCCを負荷予測に適用する際に、ANN学習時にカーネルサイズを自動調整する方法の確立
異常値を無視したANN学習方式を確立した(文献⑦)。MCCのカーネルサイズは物理的な意味がないため、調整することが困難であったが、学習データの何%を最終的に無視して学習するかというパラメータであるRmaxのみを設定すれば、カーネルサイズを自動的に調整できる方式を確立した。Rmaxは、計測データにどの程度の異常値が入っているかの経験を積むだけで設定できるので、比較的容易に設定が可能である。表1に様々な異常値率に対する従来法と提案法の平均絶対誤差率(MAPE)の比較を示す。表1に示す様に、従来法1であるLMSに基づくANNは、

表1 様々な異常値率に対する従来法と提案法の平均 MAPE 値

データ	手法	異常値率		
		0	5	10
学習 データ	従来法 1	1.59	6.22	9.87
	従来法 2	2.76	7.98	12.51
	従来法 3	2.98	6.87	11.18
	提案法	3.09	6.83	13.31
検証 データ	従来法 1	2.25	6.26	8.53
	従来法 2	2.29	2.39	2.49
	従来法 3	2.27	3.42	4.16
	提案法	2.31	2.40	2.51

従来法 1：従来の LMS に基づいた確率的勾配法(SGD)による学習を用いた ANN 手法

従来法 2：固定値のカーネルサイズを利用した MCC に基づいた SGD による学習を用いた ANN 手法

従来法 3：従来のカーネルサイズ自動調整手法(文献⑧)を利用した MCC に基づいた SGD による学習を用いた ANN 手法

異常値率があがると急速に予測精度が下がってしまうが、提案法は手動でカーネルサイズを設定する従来法 2 とほぼ同じ精度を保つことが可能であることを確認した。

(2) ANN の各種ハイパーパラメータの調整を必要としないロバストな推定方法の確立

電力負荷予測に対して、ANN の各種ハイパーパラメータの調整を必要としないロバストな推定方法を確立した(文献⑨)。具体的には、Early Stopping(文献⑩)と重み減衰(文献⑪)を利用したカーネルサイズ自動調整方法を確立した。さらに、SGD などの確率的勾配法に基づく ANN の学習手法は、学習率を調整する必要があるが、これを自動調整する Coin Betting(文献⑫)を適用することにより、学習率の調整も不必要とした手法を確立した(文献⑬)。表 2 に様々な異常値率に対する文献⑨の手法と提案法の平均 MAPE 値と標準偏差(Std.)を示す。表 2 から、提案法が従来法よりも平均精度が高く、標準偏差が小さいこと(表中太字)

以上より、ハイパーパラメータの調整なしに、高精度の電力負荷予測が可能な手法が確立できたことが確認できた。

表2 様々な異常値に対する文献⑨の手法と提案法の平均 MAPE 値と標準偏差

手法	Outlier ratio			
	5[%]		10[%]	
	MAPE	Std.	MAPE	Std.
提案法	2.18	0.24	2.78	0.39
文献⑨の手法	2.25	0.40	3.00	0.66

<引用文献>

- ① W. Liu, P. P. Pokharel and J. C. Principe, "Correntropy: A Localized Similarity Measure," Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, July 2006.
- ② 岩田壮平, 福山良和, コレントロピーを用いた配電システムの負荷推定状態推定に対する Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization の適用, 電気学会論文誌 B, 138 巻 6 号, pp. 423-431, 2018
- ③ V. Miranda, et al., "State Estimation Based on Correntropy: A Proof of Concept," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp 1988-1989, November. 2009.
- ④ V. Miranda, et al., "Entropy and Correntropy Against Minimum Square Error in Offline and Online Three-Day Ahead Wind Power Forecasting," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1657-1666, November. 2009.
- ⑤ W. Wenhai and D. Jiandong, "Short-term Wind Power Forecasting Based on Maximum Correntropy Criterion," Proc. of POWERCON, Oct. 2014.
- ⑥ V. Freitas, V. Miranda, et al., "Robust State Estimation Based on Orthogonal Methods and Maximum Correntropy Criterion," Proc. of IEEE PowerTech2017, Jul. 2017.
- ⑦ 櫻井大士, 福山良和, 異常値を考慮したカーネルサイズ自動調整を用いた Correntropy に基づく ANN による翌日最大電力需要予測手法の提案, 電気学会論文誌 B, 141 巻 2 号, pp. 163-170, 2021
- ⑧ Leandro L. S. Linhares, Aluisio I. R. Fontes, Allan M. Martins, Fábio M. U. Araújo

and Luiz F. Q. Silveira, "Fuzzy Wavelet Neural Network Using a Correntropy Criterion for Nonlinear System Identification," Proc. of Mathematical Problems in Engineering, pp. 1-12, 2015.

- ⑨ 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂 達也, 松井哲郎, ロバスト性の高い Maximum Correntropy Criterion に基づく ANN による翌日最大電力負荷予測, 電気学会電力技術・電力系統技術・半導体合同研究会 PE-22-082, PSE-22-102, SPC-22-130, 2022
- ⑩ L. Prechelt, "Early Stopping - but when?", Neural Networks: Tricks of the trade, pp. 55-69, 1998.
- ⑪ A. Krogh, et al., "A Simple Weight Decay Can Improve Generalization," Proc. of Neural Information Processing Systems, vol. 4, pp.950-957, 1991.
- ⑫ F. Orabona, et. al, "Training Deep Networks without Learning Rates Through Coin Betting," Proc. of 31st Conference on Neural Information Processing Systems ,2017.
- ⑬ 五十嵐匡人, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎, Maximum Correntropy Criterion を用いた Coin Betting に基づく ANN による翌日最大電力負荷予測, 電気学会全国大会 3-092 2023 年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 櫻井大士, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎	4. 巻 141
2. 論文標題 異常値を考慮したカーネルサイズ自動調整を用いたCorrentropyに基づくANNによる翌日最大電力需要予測手法の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 163-170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.141.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 五十嵐匡人, 福山良和, 飯坂達也, 松井 哲郎
2. 発表標題 Maximum Correntropy Criterionを用いたCoin Bettingに基づくANNによる翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Sato, Yoshikazu Fukuyama, Tatsuya Iizaka, and Tetsuro Matsui
2. 発表標題 Hyperparameter Tuning of a Correntropy based ANN for Daily Electric Power Peak Load Forecasting by Modified Brain Storm Optimization
3. 学会等名 2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 Modified Brain Storm Optimizationによるハイパーパラメータ調整をコレントロピーベースのANNに用いた翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 2021年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 ロバスト性の高いMaximum Correntropy Criterionに基づくANNによる翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 令和4年電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 Early Stoppingベースのカーネルサイズ自動調整を用いたコレントロピーに基づくANN
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 コレントロピーと重み減衰を用いたArtificial Neural Network による翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Sato, Yoshikazu Fukuyama, Tatsuya Iizaka, and Tetsuro Matsui
2. 発表標題 A Correntropy Based Artificial Neural Network using Early Stopping for Daily Peak Load Forecasting
3. 学会等名 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 松井哲郎
2. 発表標題 異常値を考慮したカーネルサイズ自動調整を用いたコレントロピーと重み減衰に基づくANNによる翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 電気学会システム・スマートファシリティ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 異常値を考慮した改良型カーネルサイズ自動調整を用いたコレントロピーと重み減衰に基づく ANN による翌日最大電力負荷予測
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井大士, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 Daily Peak Load Forecasting by Artificial Neural Network using Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization Considering Outliers
3. 学会等名 IFAC CSGRES2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井大士, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日電力負荷予測における異常値を考慮したコレントロピーに基づく並列 DEEPSO を用いた Artificial Neural Networkの適用
3. 学会等名 電気学会電力・IT部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日最大電力負荷予測における異常値を考慮する ANN 損失関数の比較
3. 学会等名 電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日最大電力負荷予測における異常値を考慮するANN損失関数の比較検証
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井大士, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日電力負荷予測に対する異常値を考慮したコレントロピーを用いたArtificial Neural Networkのカーネルサイズ自動調整手法の基礎検討
3. 学会等名 電気学会システム・スマートシティ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 コレントロピーと最小二乗法に基づくANNによるJITモデリングベースのアンサンブル学習を適用した翌日最大電力負荷予測手法の提案
3. 学会等名 電気学会システム・スマートシティ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 Early Stoppingを用いたコレントロピーに基づくANNによる翌日最大電力負荷予測手法
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井大士, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日の最大電力負荷予測における異常値を含むデータに対するエンジニアリング削減のためのANNパラメータ学習へのコレントロピーに基づくDifferential Evolutionary Particle Swarm Optimizationの適用
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 櫻井大士, 佐藤尚輝, 福山良和, 飯坂達也, 松井哲郎
2. 発表標題 翌日最大電力負荷予測における異常値を考慮したコレントロピーに基づくDEEPSOを用いたANNの適用
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daiji Sakurai, Yoshikazu Fukuyama, Tatsuya Iizaka, Tetsuro Matsui
2. 発表標題 Daily Peak Load Forecasting by Artificial Neural Network using Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization Considering Outliers
3. 学会等名 IFAC Workshop on Control of Smart Grid and Renewable Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 情報処理装置、情報処理方法及び情報処理プログラム	発明者 島崎祐一，櫻井大士，松井哲郎，福山良和，佐藤尚輝，五	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、21P00673	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

明治大学 教員データベース https://gyoseki1.mind.meiji.ac.jp/mjuhp/KgApp?resId=S001494
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------