

Abstract

This thesis addresses the problem of extensive use of data storage and transmission by measurement systems in Internet of Things devices used in Smart Grids. The increased demand for efficient and effective operation of modern power grids requires precise control. The quality of control strategies depends on the quality and quantity of the input data. The cost and complexity of data acquisition systems in power grids and other systems is directly correlated with the infrastructure utilized, such as communication networks and memory. The improvement of the control system in the power grid can be achieved by increasing the efficiency of data handling processes. The way to optimize the use of storage and transmission is data compression. The research presented in this thesis focuses on the creation of a new way of Discrete Wavelet Transform parameterization that will improve present algorithms.

This work outlines the most important problems with the handling of measurement data in power grids. The signals observed in power grids are described in detail. The most important qualities of the Smart Grids signals are pointed out, along with the difference between power transmission signals and different domains, like communication or audio. The roots of the problem laying in the communication theory are also pinpointed. The most popular communication technologies used in Smart Grids are described, with the definitions of modern problems that are to be solved using extensive exchange of information between different nodes in the grid.

The thesis contains a detailed review of the data compression methods utilized in Smart Grids, pointing out trends in the field, challenges, and most popular use cases. The architecture of the proposed solution is based on the insights gained during this stage of research. The review focuses on the most relevant, innovative and impactful work in the field. The proposed method leverages wavelet compression and Bayesian optimization to achieve significant reductions in data size while maintaining signal integrity, crucial for the efficient operation of Smart Grids. Wavelet compression, with its ability to decompose signals into different frequency components, is particularly suited to handle the varied and complex nature of power grid signals. By applying Bayesian optimization, the parameters of the wavelet transform can be fine-tuned to maximize compression efficiency.

The architecture of the proposed system is designed to be scalable and adaptable, making it well suited for deployment in the heterogeneous environments typical of Internet of Things and Smart Grid applications. The system's adaptability allows it to handle various types of signals and data conditions, typical for power grids. Additionally, the use of neural network for compression parameterization further augments the system's capabilities, providing an intelligent layer that learns and adapts to the specific characteristics of the data.

The intention of the research was the creation of the new Discrete Wavelet Parameterization framework that would reach beyond proof-of-concept and be implementation ready. To achieve that, a part for embedded systems was created and documented. Embedded code is intended to be used by endpoint devices in data acquisition systems. It was designed to be reliable and efficient and to fulfill the constraints of popular embedded systems used in metrology. The embedded part of the project is compatible with the parameterization component, and can change the compression algorithm used in the runtime, to match the changes in the signal.

In terms of contributions, this thesis presents a comprehensive study of signal characteristics in power grids, identifying key challenges and opportunities for data compression. The integration of wavelet compression and Bayesian optimization represents a novel approach that advances the state-of-the-art in Smart Grid data management. The architecture and implementation of the system are thoroughly detailed, providing a blueprint for future research and development in this field.

The main contribution of this work is creation of the method for dynamic Discrete Wavelet Transform parameterization, that improves the performance of compression algorithms both in terms of compression ratio and compression loss. The parameterization can be done in parallel to the normal operation of the compression system, which permits implementation that will add zero timing overhead, which is beneficial for real time systems. The method is useful in particular in systems analyzing signals for Power Systems protection and Power Quality monitoring, since Discrete Wavelet Transform performs well for compression of local transients.

The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method, showing substantial improvements in compression ratios, on average providing 50% smaller data size. The use of a neural network resulted in a significant (over 3000 times) reduction of the computational effort needed for the parameterization. These results highlight the potential for significant cost savings and performance enhancements in Smart Grid operations through optimized data handling.

Finally, the thesis outlines several directions for further research, including the exploration of advanced neural network architectures for compression, the integration of real-time data analytics, and the application of the proposed methods to other domains within the Internet of Things. These future research directions aim to build on the foundation laid by this work, pushing the boundaries of what is possible in data compression and Smart Grid technology.

This thesis not only addresses a critical need in the field of Smart Grids but also provides a solid framework for ongoing innovation and improvement in data compression and transmission. Through detailed analysis, innovative methodology, and practical application, this work contributes to the advancement of efficient, effective, and intelligent Smart Grid systems.

Streszczenie

Niniejsza praca podejmuje problem rozległego wykorzystania pamięci masowej i transmisji danych przez systemy pomiarowe w urządzeniach Internetu Rzeczy stosowanych w inteligentnych sieciach elektroenergetycznych. Rosnące zapotrzebowanie na wydajne i efektywne działanie nowoczesnych sieci elektroenergetycznych wymaga precyzyjnej kontroli. Jakość strategii sterowania zależy od jakości i ilości danych wejściowych. Koszt i złożoność systemów akwizycji danych w sieciach elektroenergetycznych i innych systemach jest bezpośrednio skorelowana z wykorzystywaną infrastrukturą, taką jak sieci komunikacyjne i pamięć. Poprawę systemu sterowania w sieci elektroenergetycznej można osiągnąć poprzez zwiększenie wydajności procesów przetwarzania danych. Sposobem na optymalizację wykorzystania pamięci masowej i transmisji jest kompresja danych. Badania przedstawione w niniejszej pracy koncentrują się na stworzeniu nowego sposobu parametryzacji dyskretnej transformacji falkowej, który ulepszy obecne algorytmy.

Niniejsza praca przedstawia najważniejsze problemy związane z przetwarzaniem danych pomiarowych w sieciach elektroenergetycznych. Szczegółowo opisano sygnały obserwowane w sieciach elektroenergetycznych. Wskazano najważniejsze cechy sygnałów inteligentnych sieci elektroenergetycznych, a także różnice między sygnałami transmisji mocy a różnymi domenami, takimi jak komunikacja lub dźwięk. Wskazano również źródła problemu leżące w teorii komunikacji. Opisano najpopularniejsze technologie komunikacyjne stosowane w inteligentnych sieciach energetycznych, a także zdefiniowano współczesne problemy, które mają zostać rozwiązane przy użyciu szerokiej wymiany informacji między różnymi węzłami w sieci.

Rozprawa zawiera szczegółowy przegląd metod kompresji danych stosowanych w inteligentnych sieciach energetycznych, wskazując trendy w tej dziedzinie, wyzwania i najpopularniejsze przypadki użycia. Architektura proponowanego rozwiązania opiera się na spostrzeżeniach uzyskanych na tym etapie badań. Przegląd koncentruje się na najbardziej istotnych, innowacyjnych i wpływowych pracach w tej dziedzinie.

Proponowana metoda wykorzystuje kompresję falkową i optymalizację bayesowską w celu osiągnięcia znacznej redukcji rozmiaru danych przy jednoczesnym zachowaniu integralności sygnału, co jest kluczowe dla wydajnej pracy inteligentnych sieci energetycznych. Kompresja falkowa, dzięki swojej zdolności do rozkładania sygnałów na różne składowe częstotliwości, jest szczególnie odpowiednia do obsługi zróżnicowanej i złożonej natury sygnałów sieci energetycznych. Poprzez zastosowanie optymalizacji bayesowskiej parametry transformacji falkowej można precyzyjnie dostroić w celu maksymalizacji wydajności kompresji.

Architektura proponowanego systemu została zaprojektowana tak, aby była skalowalna i adaptowalna, dzięki czemu dobrze nadaje się do wdrażania w heterogenicznych środowiskach typowych dla aplikacji

Internetu Rzeczy i Smart Grid. Adaptowalność systemu pozwala mu obsługiwać różne typy sygnałów i warunki danych, typowe dla sieci energetycznych. Ponadto wykorzystanie sieci neuronowej do parametryzacji kompresji dodatkowo zwiększa możliwości systemu, zapewniając inteligentną warstwę, która uczy się i dostosowuje do specyficznych cech danych.

Intencją badań było stworzenie nowego frameworka parametryzacji falki dyskretnej, który wykraczałby poza proof-of-concept i byłby gotowy do wdrożenia. Aby to osiągnąć, stworzono i udokumentowano część dla systemów wbudowanych. Kod wbudowany ma być używany przez urządzenia końcowe w systemach akwizycji danych. Został zaprojektowany tak, aby był niezawodny i wydajny oraz spełniał ograniczenia popularnych systemów wbudowanych stosowanych w metrologii. Wbudowana część projektu jest zgodna ze składnikiem parametryzacji i może zmieniać algorytm kompresji używany w czasie wykonywania, aby dopasować zmiany w sygnale.

W zakresie wkładu, ta rozprawa przedstawia kompleksowe badanie charakterystyk sygnału w sieciach energetycznych, identyfikując kluczowe wyzwania i możliwości kompresji danych. Integracja kompresji falkowej i optymalizacji bayesowskiej stanowi nowatorskie podejście, które rozwija najnowocześniejsze rozwiązania w zakresie zarządzania danymi Smart Grid. Architektura i implementacja systemu są szczegółowo opisane, zapewniając plan przyszłych badań i rozwoju w tej dziedzinie.

Głównym wkładem tej pracy jest stworzenie metody dynamicznej parametryzacji dyskretnej transformacji falkowej, która poprawia wydajność algorytmów kompresji zarówno pod względem współczynnika kompresji, jak i strat kompresji. Parametryzacja może być wykonywana równolegle do normalnej pracy systemu kompresji, co umożliwia implementację, która doda zerowy narzut czasowy, co jest korzystne dla systemów czasu rzeczywistego. Metoda jest przydatna w szczególności w systemach analizujących sygnały w celu ochrony systemów energetycznych i monitorowania jakości energii, ponieważ dyskretna transformacja falkowa dobrze sprawdza się w kompresji lokalnych stanów przejściowych.

Wyniki eksperymentów dowodzą skuteczności proponowanej metody, wykazując znaczną poprawę współczynników kompresji, zapewniając średnio o 50% mniejszy współczynnik kompresji. Zastosowanie sieci neuronowej spowodowało znaczną (ponad 3000-krotną) redukcję wysiłku obliczeniowego potrzebnego do parametryzacji. Wyniki te podkreślają potencjał znacznych oszczędności kosztów i ulepszeń wydajności w operacjach Smart Grid dzięki zoptymalizowanej obsłudze danych.

Na koniec rozprawa przedstawia kilka kierunków dalszych badań, w tym eksplorację zaawansowanych architektur sieci neuronowych do kompresji, integrację analizy danych w czasie rzeczywistym i zastosowanie proponowanych metod w innych domenach w ramach Internetu rzeczy. Te przyszłe kierunki badań mają na celu budowanie na fundamencie położonym przez tę pracę, przesuwać granice tego, co jest możliwe w kompresji danych i technologii Smart Grid.

Ta rozprawa nie tylko odpowiada na krytyczną potrzebę w dziedzinie Smart Grids, ale także zapewnia solidne ramy dla ciągłych innowacji i ulepszeń w kompresji i transmisji danych. Dzięki szczegółowej analizie, innowacyjnej metodologii i praktycznemu zastosowaniu, praca ta przyczynia się do rozwoju wydajnych, efektywnych i inteligentnych systemów Smart Grid.