



Ph.D. COURSE IN INDUSTRIAL ENGINEERING – XXX_ CYCLE

Ph.D. Student: Antonella Rosalia Finamore
Tutor – supervisor: Prof. Vincenzo Galdi
Ph.D. Course Coordinator: Prof. Francesco Donsì

Abstract of the thesis (English version)

Energy is essential to society for ensuring good quality of life by modern standards. Nowadays, fossil fuels are still the most used energy source, but, due to their depletion and contribution to climate change, the pursuit of a sustainable development has promoted an ever-growing trend to use new and pollution-free energy sources. Such a trend is impacting the energy scenario with massive transformations on a world scale.

From the Kyoto protocol in 1997 to the COP 21 Paris agreement in 2015, great challenges have been introduced in terms of both emissions' reduction and development of new energy sources, which are cleaner than the fossil ones. As a result, renewable energy sources (RESs) have seen a great development, favoured by a strong interest from governments, private companies, universities and public and private research centres. In fact, estimates suggest a RES penetration of over 55% in the next few years. Obviously, such a process is not likely to occur in the same fashion in all countries. As a matter of fact, RESs are not uniformly distributed, and incentive policies differ very much according to the single countries.

Among RESs, wind power is the most widespread in the world after hydropower: over the last few decades, the global wind installed capacity has grown rapidly, particularly in Europe, Asia, and North America. However, the unpredictable and intermittent nature of wind is the main obstacle to its integration on a large scale: grid operators have difficulties keeping the grid in a safe state when large volumes of this energy are injected into the power system. Hence, in order to manage wind capacity, accurate wind power forecasting is necessary. However, forecasting the wind power production is quite challenging as wind is extremely variable and depends on weather conditions, terrain factors, and height above ground level. Furthermore, wind power strongly depends on wind speed, thus for a successful integration of this type of energy into any power system, it is important to design a wind speed prediction model with a forecasting error which is as low as possible. Unfortunately, wind is the most difficult meteorological phenomenon to predict: wind forecasting thus represents a great challenge for researchers, meteorologist, and wind power producers.

In the literature, several forecasting models have been proposed, traditionally based on physical and statistical methods. In addition to those, a number of more advanced methods based on artificial intelligence have been investigated in recent years, in the attempt to attain more reliable wind-power forecasts.

The aim of this thesis is to develop a forecasting model for estimating the generated power from the predicted wind speed on a given wind farm.

In this PhD dissertation, after introducing the problems connected to the integration of wind power on a large scale, a two-stage forecasting model is proposed. The wind power forecasting problem is divided into two sub-problems: wind speed forecasting and wind power forecasting. Unlike many models presented in the literature or by commercial tools, in the proposed approach weather information and wind production data are used separately. In order to solve the first sub-problem, two models for the daily and hourly wind speed prediction were developed.

The main difference between the models here proposed and those from the literature or commercial tools is the analysis of the weather fronts and their spatio-temporal evolution. In detail, in order to characterize the evolution of the meteorological fronts, a mesoscale study of a number of meteorological data was conducted. According to mesoscale theory, the weather phenomena occurring in a given area are connected to the evolution of the meteorological factors in the surrounding areas. Therefore, in the proposed approaches, instead of considering only the data relating to the site where the forecast is to be made, the prediction is carried out on the basis of the historical data of the area around the site, on a scale of a few hundred kilometres. To this regard, a simple nesting grid was built, similar to those used in the advanced global numerical weather prediction (NWP) models and adopted by the European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). However, unlike the mesoscale approaches, the nesting grid constructed in the proposed models is made up of a very limited number of points (16 + 1) instead of several hundred.

The first model, for the daily prediction, is based on a Multi-Layer Perceptron neural network (MLP) and dynamic clustering process. The model's inputs are the historical and current meteorological data, including pressure, temperature and wind intensity. These data, time-shifted by a proper delay related to spatial distance, are useful to describe the spatio-temporal evolution of the weather fronts at the point with respect to which the forecast is to be made. The forecasting results of a case study were compared with real-world data registered at the test site (located in southern Italy) and with the results obtained from the persistence model, the traditional benchmark for prediction models. The comparison and performance evaluation demonstrate the high effectiveness of the proposed strategy. The second model proposed, for the hourly prediction, is based on an optimized artificial neural network (ANN), data correlation analysis, and clustering process. Again, the input data consist of pressure, temperature, and wind intensity (both historical and current values). As in the daily model, the training set is constructed by a time-shifting τ of the meteorological data, which are then clustered into four groups, through the k-means algorithm. The model's effectiveness was verified by comparing the obtained forecasted values with the real-world registered values and with the results from the persistence model. Furthermore, the model's effectiveness was confirmed by performance evaluation, with respect to the main figures of merit proposed in the literature.

The last part of the work deals with the wind power forecasting problem, proposing a forecasting approach based on Betz's theory and historical wind production curves. The proposed forecasting model is fed by the outcome of the wind speed forecast from the previous stage, wind production curves and the structural characteristics of the particular wind farm to estimate the generated power. The method was tested with data from representative periods around the year: spring and fall equinoxes, summer and winter solstices, and the first week of spring. Once again, performance analysis and the comparison between the forecasted results, along with the recorded values and the persistence model, have all confirmed the effectiveness of the proposed approach.

In summary, performance analysis and comparisons have validated the proposed forecasting approaches, both for wind speed and wind power, showing a better performance when compared to well-known commercial tools and alternative models from the literature.

Throughout the entire work of the thesis, the real-world data of the case study were provided by the National Air Force Meteorological Service - C.O.Met. (Centro Operativo per la Meteorologia) and IVPC (Italian Vento Power Corporation) to which the author is grateful for the contribution offered.



Ph.D. COURSE IN INDUSTRIAL ENGINEERING – XXX_ CYCLE

Ph.D. Student: Antonella Rosalia Finamore
Tutor – supervisor: Prof. Vincenzo Galdi
Ph.D. Course Coordinator: Prof. Francesco Donsì

Abstract of the thesis (Italian version)

L'energia è essenziale per garantire una buona qualità della vita secondo gli standard moderni. Al giorno d'oggi, i combustibili fossili sono ancora la fonte di energia più utilizzata, ma, a causa del loro esaurimento e della loro influenza sul cambiamento climatico, la ricerca di uno sviluppo sostenibile ha favorito la tendenza sempre più crescente ad utilizzare fonti di energia nuove e pulite. Negli ultimi decenni, tale tendenza sta influenzando lo scenario energetico con enormi trasformazioni su scala mondiale.

Dal protocollo di Kyoto del 1997 all'accordo COP 21 di Parigi del 2015, sono state introdotte grandi sfide sia in termini di riduzione delle emissioni che di sviluppo di nuove fonti energetiche più pulite di quelle fossili. Di conseguenza, si è assistito ad un grande sviluppo delle fonti di energia rinnovabile (FER), favorite da un forte interesse da parte di governi, aziende private, università e centri di ricerca pubblici e privati. Infatti, le stime suggeriscono una penetrazione delle FER di oltre il 55% nei prossimi anni. Ovviamente, è improbabile che un simile processo avvenga nello stesso modo in tutti i paesi. Le FER, infatti, non sono distribuite uniformemente e le politiche di incentivazione differiscono molto a seconda dei singoli paesi.

Tra le FER, dopo quella idroelettrica, l'energia eolica è la più diffusa al mondo: negli ultimi decenni la capacità eolica installata a livello mondiale è cresciuta rapidamente, in particolare in Europa, Asia e Nord America. Tuttavia, la natura imprevedibile e intermittente del vento è il principale ostacolo alla sua integrazione su larga scala: i gestori di rete hanno difficoltà a garantire il servizio in sicurezza della rete quando grandi volumi di energia eolica sono immessi nel sistema elettrico. Quindi, per gestire tale energia, è necessaria una previsione accurata della potenza eolica. Tuttavia, la previsione della produzione di energia eolica è piuttosto impegnativa poiché il vento, maggiore fattore di aleatorietà dell'energia, è estremamente variabile e fortemente dipendente dalle condizioni meteorologiche, dai fattori del terreno e dall'altezza dal livello del suolo. Quindi, poiché l'energia eolica dipende fortemente dalla velocità del vento, per una corretta integrazione su larga scala di questo tipo di energia, è importante progettare un modello di previsione della velocità del vento con un errore di previsione il più basso possibile. Sfortunatamente, il vento è il fenomeno meteorologico più difficile da prevedere: le previsioni del vento rappresentano una grande sfida non solo per ricercatori, meteorologi ma anche per produttori di energia eolica.

In letteratura sono proposti diversi modelli di previsione, tradizionalmente basati su metodi fisici e statistici. Oltre a questi, negli ultimi anni sono stati studiati numerosi metodi più avanzati basati sull'intelligenza artificiale, nel tentativo di ottenere previsioni di energia eolica sempre più affidabili. Lo scopo di questo lavoro di ricerca è sviluppare un modello di previsione al fine di stimare la potenza generata dalla velocità del vento prevista in un parco eolico.

Dopo una breve introduzione riguardo le problematiche connesse all'integrazione dell'energia eolica su larga scala, il lavoro procede con lo sviluppo di un originale modello previsionale a due fasi. Il problema della previsione dell'energia eolica è stato diviso in due sotto-problemi: previsione della velocità del vento e previsione dell'energia eolica. A differenza di molti modelli presentati in letteratura o da strumenti commerciali, nell'approccio proposto le informazioni meteorologiche e i dati sulla produzione del vento sono usati separatamente. Per risolvere il primo sotto-problema, sono stati sviluppati due modelli per la previsione della velocità del vento (giornaliera e oraria).

La principale differenza tra i modelli proposti ed implementati e quelli della letteratura o degli strumenti commerciali è l'analisi dei fronti meteorologici e la loro evoluzione spazio-temporale. In dettaglio, al fine di caratterizzare l'evoluzione dei fronti meteorologici, è stato condotto uno studio su *mesoscala* di una serie di dati meteorologici. Secondo la teoria della *mesoscala*, i fenomeni meteorologici che si verificano in una data area sono collegati all'evoluzione dei fattori meteorologici nelle aree circostanti. Pertanto, negli approcci proposti, per la previsione invece di considerare solo i dati locali relativi al sito dove si vuole effettuare la previsione, sono stati considerati anche i dati storici relativi all'area intorno al sito, su una scala di poche centinaia di chilometri. A tal proposito è stata realizzata una versione semplificata della griglia di nidificazione, molto utilizzata nei modelli avanzati di previsione numerica del tempo (NWP) e adottati dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Raggio (ECMWF). Nel dettaglio, a differenza degli approcci *mesoscala*, la griglia di nidificazione costruita nei modelli proposti è composta da un numero molto limitato di punti (16 + 1) invece di diverse centinaia.

Il primo modello, per la previsione giornaliera, si basa su una rete neurale (MLP) Multi-Layer Perceptron e su un processo di clustering dinamico. Gli input del modello sono i dati meteorologici storici e attuali di pressione, temperatura e intensità del vento. Tali dati, shiftati nel tempo di un opportuno ritardo correlato alla distanza spaziale, sono utili per descrivere l'evoluzione spazio-temporale dei fronti meteorologici nel punto rispetto al quale si vuole fare la previsione. I risultati di previsione di un caso studio sono stati confrontati con i dati del mondo reale registrati presso il sito di test (situato nel sud Italia) e con i risultati ottenuti dal modello di persistenza, il classico benchmark per i modelli di previsione. Il confronto e la valutazione delle prestazioni dimostrano l'elevata efficacia della strategia proposta.

Il secondo modello proposto, per la previsione oraria, si basa su una rete neurale artificiale (ANN) ottimizzata, analisi di correlazione dei dati e processo di clustering. Anche in questo caso, i dati di input sono pressione, temperatura e intensità del vento (valori sia storici che correnti). Come nel modello giornaliero, i dati sono shiftati secondo un fattore di ritardo temporale τ , poi tali dati sono raggruppati in quattro gruppi, mediante l'algoritmo k-mean. L'efficacia del modello è stata verificata confrontando i valori previsti ottenuti con i valori registrati nel mondo reale e con i risultati del modello di persistenza. Inoltre, l'efficacia del modello è stata confermata dalla valutazione della performance, rispetto alle principali figure di merito proposte in letteratura.

L'ultima parte del lavoro affronta il secondo sotto-problema, la previsione dell'energia eolica, proponendo un approccio previsionale basato sulla teoria di Betz e sulle curve storiche di produzione del vento. Il modello di previsione proposto per stimare la potenza generata sfrutta la velocità del vento ottenuta nella fase precedente, le curve di produzione eolica e le caratteristiche strutturali del parco eolico. L'approccio è stato testato in periodi specifici dell'anno: equinozio di primavera e autunno, solstizio estivo e invernale e prima settimana di primavera. Ancora una volta, l'analisi delle prestazioni e il confronto tra i risultati previsti e i valori reali e quelli ottenuti con il modello di persistenza, hanno confermato l'efficacia dell'approccio proposto.

In sintesi, l'analisi e il confronto delle prestazioni hanno convalidato gli approcci di previsione proposti, sia per la velocità del vento che per l'energia eolica, mostrando una performance migliore rispetto ai noti strumenti commerciali e ai modelli alternativi della letteratura.

Durante l'intero lavoro di ricerca, i dati reali del caso di studio sono stati forniti dal Servizio Nazionale di Meteorologia dell'Aeronautica Militare - C.O.Met. (*Centro Operativo per la Meteorologia*) e IVPC (*Italian Vento Power Corporation*).