



Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021

Titolo del progetto: Ottimizzazione e controllo distribuito nelle reti energetiche rinnovabili mediante tecniche di intelligenza artificiale

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:
TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE E DELLE COMUNICAZIONI (ICT)

Responsabile scientifico: Prof. Massimo Panella

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 6

Azienda: Machine Learning Solutions S.r.l. Startup Innovativa, P.I./C.F.: 14739211002 Startup Sapienza che opera nei settori del machine learning e dell'intelligenza artificiale Sede legale: Via IV Novembre 107, 00187 Roma Sito web: www.mlsolutions.it

Progetto di ricerca:

Con l'avvento delle smart grid, i recenti sviluppi nell'ambito energetico richiedono flessibilità e interoperabilità dei sistemi con una perfetta integrazione di tecnologie e funzionalità. In questo scenario, il progetto di ricerca del dottorato apre la strada a nuove prospettive per la transizione verde, attraverso uno studio innovativo incentrato su sistemi e infrastrutture per la gestione dinamica dell'energia da fonti rinnovabili, spesso interconnesse attraverso le moderne tecnologie di comunicazione ed elaborazione delle informazioni associate alla gestione ottima delle risorse energetiche.

L'intelligenza artificiale (AI) gioca un ruolo fondamentale nelle Energy Community e nella produzione, distribuzione e dispacciamento delle energie rinnovabili, sebbene l'impatto dell'AI nell'ambito green non sia ancora apprezzabile su grande scala. Pertanto, nell'ambito delle recenti politiche energetiche, la ricerca affronterà le problematiche di sviluppo e maturazione di tecnologie quali BMS, BESS, EV, microgenerazione privata e interfacciamento intelligente con la rete di dispacciamento e distribuzione. Attraverso lo studio di modelli scalabili, modulari e generalizzabili si vogliono proporre nuove applicazioni legate alle fonti rinnovabili, sfruttando tecnologie digitali e di comunicazione all'avanguardia quali IoT, IoE e blockchain.

Stando alle linee guida europee sul Green New Deal, tra gli obiettivi più importanti delle politiche attuali e future sul clima vi sono la decarbonizzazione e la maggiore efficienza energetica degli edifici attraverso l'uso di fonti rinnovabili decentralizzate. La produzione elettrica si sta quindi spostando verso soggetti che sono contemporaneamente produttori e consumatori, i cosiddetti prosumer. La ricerca proporrà sistemi intelligenti integrabili nelle smart grid e nei positive energy district in grado di combinare generazione, consumo e storage con l'obiettivo generale di riduzione degli impatti del cambiamento climatico.

Obiettivo orizzontale del dottorato è dunque la produzione di nuove conoscenze scientifiche e tecnologiche, a livello di dottorato di ricerca, per finalizzare la competitività dei succitati strumenti nel mercato energetico verde. Del resto lo sviluppo di algoritmi AI aiuta anche il controllo proattivo, sia a livello del singolo utente sia a livello di sistema, sbloccando efficacemente la gestione intelligente dei sistemi energetici integrati.

Lo studio conseguente delle applicazioni verticali nel campo dell'efficientamento energetico riguarderà l'ottimizzazione del consumo energetico e del controllo dell'emissione di gas serra nella fase di utilizzo di impianti ed edifici. Facilitare la profilazione energetica degli utenti finali e assistere anche i distributori è infatti il contributo principale dell'AI applicata al settore energetico. Inoltre, è possibile utilizzare l'AI per l'identificazione di consumi anomali, comportamenti fraudolenti e guasti, aumentando le capacità di controllo e gestione efficiente dell'energia.

Nella produzione solare ed eolica, le fluttuazioni dovute a queste energie rinnovabili necessitano di un sistema intelligente di controllo che non può prescindere dallo sviluppo di tecniche di predizione e logiche di decisione basate sull'AI. La movimentazione di pannelli solari e il posizionamento di turbine eoliche sono solo alcuni esempi in cui l'utilizzo del machine learning può essere dirimente per l'ottimizzazione produttiva, come anche il monitoraggio attivo degli impianti.

Dal punto di vista scientifico, il progetto di ricerca del dottorato verterà su studio, validazione e implementazione di algoritmi innovativi basati su tecniche di machine learning e deep learning per risolvere il problema della gestione e integrazione delle risorse rinnovabili nelle comunità energetiche future. L'attenzione verrà posta su reti neurali ricorrenti e convolutive, algoritmi generativi e tecniche di "Explainable AI" in sinergia con modelli di predizione/ottimizzazione/decisione federati e distribuiti, a loro volta basati su tecnologie di comunicazione ed elaborazione sincrone e asincrone dei dati. Le interdipendenze spazio-temporali delle fonti rinnovabili (RESs), in particolare solari ed eoliche, e dei sistemi di accumulo di energia a batteria (BESS) saranno gestite da una rete di monitoraggio e controllo intelligente che terrà conto anche degli aspetti economici legati a smart contract e blockchain e che potrà essere utilizzata sia su scala geografica, sia nelle microgrid in cui operano prosumer domestici e utenti nel contesto della mobilità elettrica.

Nel primo anno, lo studente di dottorato si concentrerà sulle tecniche di predizione per stimare sia la produzione futura di energia rinnovabile sia la domanda di energia nei carichi di piccole smart grid, al fine di ottimizzare la gestione di un BESS centralizzato necessario per massimizzare la penetrazione delle RESs nella rete di media tensione esistente. La predizione verrà effettuata utilizzando reti neurali e neurofuzzy di tipo ricorrente, in particolare il paradigma Echo State Network, le Long Short-Term Memory networks e i sistemi di inferenza neurofuzzy di ordine superiore a uno.

Nel secondo anno verranno proposti i metodi per l'ottimizzazione e il controllo distribuito basandosi sulle conoscenze di partenza relative alle tecniche di machine learning distribuito e alla soluzione di problemi di predizione in cui sono coinvolte serie temporali del mondo reale, spesso rumorose e caotiche. I modelli neurali possono ottenere buoni risultati se applicati a serie temporali con molti valori anomali e campioni mancanti. Tuttavia questi modelli presentano alcuni problemi di stima e di apprendimento. Le reti neurali trovano qualche difficoltà di fronte alla presenza di minimi locali e di ridondanza nei dati di addestramento (overfitting), altri modelli potrebbero avere un'eccessiva sensibilità agli iperparametri di configurazione. Per superare questi problemi e realizzare un avanzamento delle conoscenze rispetto allo stato dell'arte, questo progetto proporrà una metodologia innovativa in cui le tecniche di previsione saranno applicate anche nel caso di assenza di dati e in un quadro più ampio in cui il predittore viene utilizzato all'interno di un BESS e in combinazione con altre RESs.

Durante il terzo anno saranno realizzati gli obiettivi principali di questo progetto di dottorato. Questi ultimi possono essere riassunti in: (i) costruzione di modelli adeguati al modellamento dinamico e alla predizione delle RESs; (ii) raccolta dati da impianti RES; (iii) gestione intelligente dei BESSs e degli impianti di energia rinnovabile nel quadro delle smart grid. La predizione può essere suddivisa in quattro categorie principali, in base al suo orizzonte temporale: lungo (anni), medio (mesi), breve (giorni), brevissimo (minuti). Per la predizione da impianti fotovoltaici è possibile applicare tecniche di machine learning e deep learning direttamente alla potenza o energia in uscita (metodi diretti), oppure all'irraggiamento solare per calcolare successivamente la potenza in uscita (metodi indiretti). Entrambi i metodi possono essere opportunamente combinati generando approcci misti detti "gray-box".

Infine, il lavoro dello studente si concluderà con la tesi di dottorato, nella quale verranno riassunte tutte le esperienze vissute in questi tre anni. Il lavoro beneficerà anche delle opportunità offerte da un gruppo di ricerca multidisciplinare, in grado di proporre nuove idee con l'aiuto di persone con maggiore esperienza provenienti da diverse aree dell'Intelligenza Computazionale, dell'Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (ICT).

BIBLIOGRAFIA

[1] P. del Rio, G. Resch, A. Ortner, L. Liebmann, S. Busch e C. Panzer, A techno-economic analysis of EU renewable electricity policy pathways in 2030, *Energy Policy*, 104, pp. 484-493, 2017.

- [2] A. Mellit e S. A. Kalogirou, Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (5), pp. 574-632, 2008.
- [3] Cartea, A., Figueroa, M.G., Pricing in electricity markets: A mean reverting jump-diffusion model with seasonality. *App. Mathematical Finance*, 12, 313-335, 2005.
- [4] Mellit, A.; Pavan, A.M. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84, pp. 807-821, 2010.
- [5] Sfetsos, A.; Coonick, A. Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Solar Energy*, 68, 169-178, 2000.
- [6] Voyant, C.; Muselli, M.; Paoli, C.; Nivet, M.L. Optimization of an artificial neural network dedicated to the multivariate forecasting of daily global radiation. *Energy*, 36, 348-359, 2011.
- [7] Mellit, A.; Kalogirou, S.A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34, 574-632, 2008.
- [8] Pierro, M.; Bucci, F.; Felice, M.D.; Maggioni, et al. Multi-Model Ensemble for day ahead prediction of photovoltaic power generation. *Solar Energy*, 134, 132-146, 2016.
- [9] A. Rosato, M. Panella e R. Araneo. A Distributed Algorithm for the Cooperative Prediction of Power Production in PV Plants. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(1) pp. 497-508, 2019.
- [10] A. Rosato, M. Panella, R. Araneo e A. Andreotti. A Neural Network Based Prediction System of Distributed Generation for the Management of Microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), pp. 7092-7102, 2019.
- [11] F. Succetti, A. Rosato, R. Araneo e M. Panella. Deep Neural Networks for Multivariate Prediction of Photovoltaic Power Time Series. *IEEE Access*, 8, pp. 211490-211505, 2020.
- [12] A. Rosato, M. Panella, A. Andreotti, O.A. Mohammed e R. Araneo. Two-stage dynamic management in energy communities using a decision system based on elastic net regularization. *Applied Energy*, 291, pp. 1-12, 2021.

Titolo del progetto (inglese): Optimization and distributed control in renewable energy networks using artificial intelligence techniques

Progetto di ricerca (inglese):

With the advent of smart grids, recent developments in the energy field require flexibility and interoperability of systems with a perfect integration of technologies and functionalities. In this scenario, the Ph.D. research project opens the way to new perspectives for the green transition, through an innovative study focused on systems and infrastructures for the dynamic management of energy from renewable sources, often interconnected through modern technologies for communication and information processing associated with the optimal management of energy sources.

Artificial intelligence (AI) plays a fundamental role in Energy Communities and in the production, distribution and dispatching of renewable energy, although the impact of AI in the green field is not yet appreciable on a large scale. Therefore, in the context of recent energy policies, the research will address the issues of development and maturation of technologies such as BMS, BESS, EV, private micro-generation and intelligent interfacing with the dispatching and distribution network. Through the study of scalable, modular and generalizable models, one wants to propose new applications related to renewable sources, exploiting cutting-edge digital and communication technologies such as IoT, IoE and blockchain.

According to the European guidelines on the Green New Deal, among the most important goals of current and future climate policies there are decarbonisation and an increased energy efficiency of buildings through the use of decentralized renewable sources. Electricity production is therefore moving towards subjects who are producers and consumers at the same time, the so-called prosumers. The research will propose intelligent systems that can be integrated into smart grids and positive energy districts, which are capable of combining generation, consumption and storage with the general objective of reducing the impacts of climate change.

The horizontal goal of the doctorate is therefore the production of new scientific and technological knowledge, at the Ph.D. level, in order to finalize the competitiveness of the aforementioned instruments in the green energy market. Actually, the development of AI algorithms also helps proactive control, both at the individual user level and at the system level, effectively unlocking the intelligent management of integrated energy systems.

The consequent study of vertical applications in the field of energy efficiency will concern the optimization of energy consumption and the control of greenhouse gas emissions in the use phase of plants and buildings. Facilitating the energy profiling of end users and also assisting distributors is in fact the main contribution of AI applied to the energy sector. In addition, it is possible to use AI to identify abnormal consumption, fraudulent behaviour and failures, increasing the ability to control and manage energy efficiently.

In solar and wind production, the fluctuations due to these renewable energies require an intelligent control system that cannot ignore the development of AI-based prediction techniques and decision logics. The handling of solar panels and the positioning of wind turbines are just a few examples in which the use of machine learning can be decisive for production optimization, as well as for active monitoring of the plants.

From a scientific point of view, the Ph.D. research project will focus on the study, validation and implementation of innovative algorithms based on machine learning and deep learning techniques to solve the problem of managing and integrating renewable resources in future energy communities. The focus will be on recurrent and convolutive neural networks, generative algorithms and "Explainable AI" techniques in synergy with federated and distributed prediction/optimization/decision models, in turn based on synchronous and asynchronous data communication and processing technologies. The space-time interdependencies of renewable sources (RESs), in particular solar and wind power, and of battery energy storage systems (BESS) will be managed by an intelligent monitoring and control network that will also consider the economic aspects related to smart contract and blockchain and that can be used both on a geographical scale and in the microgrids in which domestic prosumers and users operate in the context of electric mobility.

In the first year, the Ph.D. student will focus on forecasting techniques to predict both renewable energy production and load energy demand in the small smart grids, in order to optimize the management of a centralized BESS necessary to maximize the penetration of RESs into the existing medium voltage grid. The prediction itself is carried on using neural and fuzzy neural networks and fuzzy logic, specifically the Echo State Network paradigm, the Long Short-Term Memory networks and neurofuzzy inference systems having order greater than one.

In the second year, the methods for distributed optimization and control will be proposed by relying on the starting knowledge regarding distributed machine learning techniques and the solution for prediction problems in which real-world, often chaotic, time series are involved. Very useful models can be found in the framework of neural network techniques. Most of them can achieve good results when applied to time series with many outliers and missing samples. These models however present some issues of estimation and learning. Neural Networks might find some difficulties when facing the presence of local minima and redundancy in training data (overfitting), other models could have excessive sensitivity to the configuration hyperparameters. To overcome these problems and achieve an advancement of knowledge with respect to the state of the art, this project will propose an innovative methodology where the prediction techniques could be applied also when data could be missing, and in a broader framework where the predictor is put in use within a BESS and jointly with other RESs.

During the third year, the main goals of this Ph.D. project will be achieved. They can be summarized as: (i) construction of adequate models for dynamic description and prediction of RESs; (ii) data collection from RES plants; (iii) intelligent management of BESSs and renewable energy plants, in a smart grid framework. Prediction can be divided into four main categories, based on its time horizon: long-time (years), medium-time (months), short-time (days), very short time (minutes). For the prediction of photovoltaic plants, it is possible to apply forecasting techniques directly to the output power or output energy (direct methods), or to the solar irradiation in order to compute the output power subsequently (indirect methods). Both methods can be appropriately combined by generating mixed approaches called "gray-boxes".

Finally, the student's work will end with the Ph.D. thesis in which all the experiences lived in these three years will be summarized. The work will also benefit from the opportunities offered by a multidisciplinary research group, able to

propose new ideas with the help of people with greater experience from different areas of Computational Intelligence, Electrical Engineering and Information and Communication Technologies (ICT).

REFERENCES

- [1] P. del Rio, G. Resch, A. Ortner, L. Liebmann, S. Busch, and C. Panzer, A techno-economic analysis of EU renewable electricity policy pathways in 2030, *Energy Policy*, 104, pp. 484-493, 2017.
- [2] A. Mellit and S. A. Kalogirou, Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (5), pp. 574-632, 2008.
- [3] Cartea, A., Figueroa, M.G., Pricing in electricity markets: A mean reverting jump-diffusion model with seasonality. *App. Mathematical Finance*, 12, 313-335, 2005.
- [4] Mellit, A.; Pavan, A.M. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84, pp. 807-821, 2010.
- [5] Sfetsos, A.; Coonick, A. Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Solar Energy*, 68, 169-178, 2000.
- [6] Voyant, C.; Muselli, M.; Paoli, C.; Nivet, M.L. Optimization of an artificial neural network dedicated to the multivariate forecasting of daily global radiation. *Energy*, 36, 348-359, 2011.
- [7] Mellit, A.; Kalogirou, S.A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34, 574-632, 2008.
- [8] Pierro, M.; Bucci, F.; Felice, M.D.; Maggioni, et al. Multi-Model Ensemble for day ahead prediction of photovoltaic power generation. *Solar Energy*, 134, 132-146, 2016.
- [9] A. Rosato, M. Panella, and R. Araneo. A Distributed Algorithm for the Cooperative Prediction of Power Production in PV Plants. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(1) pp. 497-508, 2019.
- [10] A. Rosato, M. Panella, R. Araneo, and A. Andreotti. A Neural Network Based Prediction System of Distributed Generation for the Management of Microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), pp. 7092-7102, 2019.
- [11] F. Succetti, A. Rosato, R. Araneo, and M. Panella. Deep Neural Networks for Multivariate Prediction of Photovoltaic Power Time Series. *IEEE Access*, 8, pp. 211490-211505, 2020.
- [12] A. Rosato, M. Panella, A. Andreotti, O.A. Mohammed, and R. Araneo. Two-stage dynamic management in energy communities using a decision system based on elastic net regularization. *Applied Energy*, 291, pp. 1-12, 2021.