

# **ANALISI E SVILUPPO DI TECNICHE DI MACHINE LEARNING MULTI-VARIATE PER IL MONITORAGGIO PREDITTIVO DELLA RETE DI TRASMISSIONE NAZIONALE**

*Carlo Olivieri, Lino Di Leonardo, Francesco de Paulis, Antonio Orlandi*

Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e di Economia (D.I.I.E.),  
Università degli Studi de L'Aquila, Via G. Gronchi 18, 67100, L'Aquila;  
e-mails: carlo.olivieri@univaq.it, antonio.orlandi@univaq.it

Questa memoria riassume le più recenti attività di ricerca svolte dall'Unità di L'Aquila nel campo dell'applicazione delle tecniche di Machine Learning e Intelligenza Artificiale all'analisi del monitoraggio delle linee di trasmissione dell'energia elettrica ad alta tensione, con particolare riferimento alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) e al fenomeno delle oscillazioni inter-area a bassissima frequenza (Low Frequency Oscillations, LFO).

Lo scopo del presente studio è quello di sfruttare le potenzialità delle tecniche di Machine Learning per lo sviluppo di metodologie di monitoraggio intelligente della rete di trasmissione stessa, anche in termini di monitoraggio previsionale. In questo ultimo caso, da un punto di vista applicativo, l'importante funzione svolta dal monitoraggio previsionale è quella di coadiuvare gli operatori di sala controllo nell'individuazione dei fenomeni di instabilità della RTN e di fornire il giusto anticipo temporale per implementare le logiche di controllo (spesso manuali) utili al contenimento degli effetti del fenomeno di LFO e al suo smorzamento.

Nella fattispecie, il presente studio è stato articolato in quattro azioni principali (targets):

- T1. sviluppo di tecniche di stima basate su reti neurali di tipo Feed-Forward (FF-NN) per la stima dei parametri modali dei fenomeni di LFO
- T2. sviluppo di tecniche di predizione basate su reti neurali di tipo ricorrente (RNN)
- T3. estensione delle strategie di monitoraggio previsionale basate su RNN verso tecniche per l'apprendimento incrementale (Incremental Training), utilizzando gli strumenti messi a disposizione dalla teoria dei cosiddetti Metodi Ensemble.
- T4. Estensione a tecniche previsionali Multi-Variate.

Con riferimento al primo target dell'attività di ricerca (T1), sono stati ottenuti interessanti risultati per quel che riguarda l'utilizzo delle reti FF-NN nella stima dei parametri modali delle LFO a partire dalla conoscenza delle sole misure di frequenza ottenute mediante alcune PMU collocate all'interno della RTN (Fig.1), i risultati ottenuti sono stati raccolti nel contributo [1].

Come evidenziato in [1], le stime dei parametri modali delle oscillazioni inter-area, in particolare Frequenza, Ampiezza e Smorzamento dei primi due modi elettromeccanici, effettuate mediante FF-NN, sono paragonabili ai valori che è possibile estrarre invece mediante la tecnica di stima DMD (Dynamic Mode Decomposition), che in questo caso viene presa come riferimento. In [1] sono analizzati due scenari con LFO (primo e secondo modo elettromeccanico), ovvero: condizioni di ringing e "ambient". Il risultato di maggiore rilievo risiede nel fatto che con i metodi di stima basati su reti neurali, è possibile ottenere valori stimati corretti anche nel caso in cui ci siano dati mancanti provenienti dalle PMU (i.e. NaN values). Gli sviluppi ulteriori e più interessanti sono stati quelli relativi alle azioni T2, T3 e T4 in cui la strategia viene estesa a modelli previsionali e con la possibilità di effettuare training incrementali (on-line). Le attività svolte in tali direzioni della ricerca sono contenute nei riferimenti [3] e [4]. In questa fase della attività caso sono state utilizzate reti di tipo Long-Short Term Memory (LSTM) abbinate ai cosiddetti Metodi Ensemble per l'ottenimento di previsioni dei parametri modali all'interno di range temporali estesi a qualche unità di minuto.

Alcuni dettagli dell'approccio proposto e dei risultati ottenuti sono riportati in Fig. 2. Il miglioramento dei risultati delle attività T2 e T3 è stato affrontato andando a customizzare l'unità di base del metodo Ensemble con soluzioni che prevedono con tecniche previsionali Multi-Variate (T4). Come riportato in [4], la strategia di stima complessivamente realizzata, è schematizzabile mediante quanto riportato in Fig. 2 a e con i risultati di Fig 2 b.

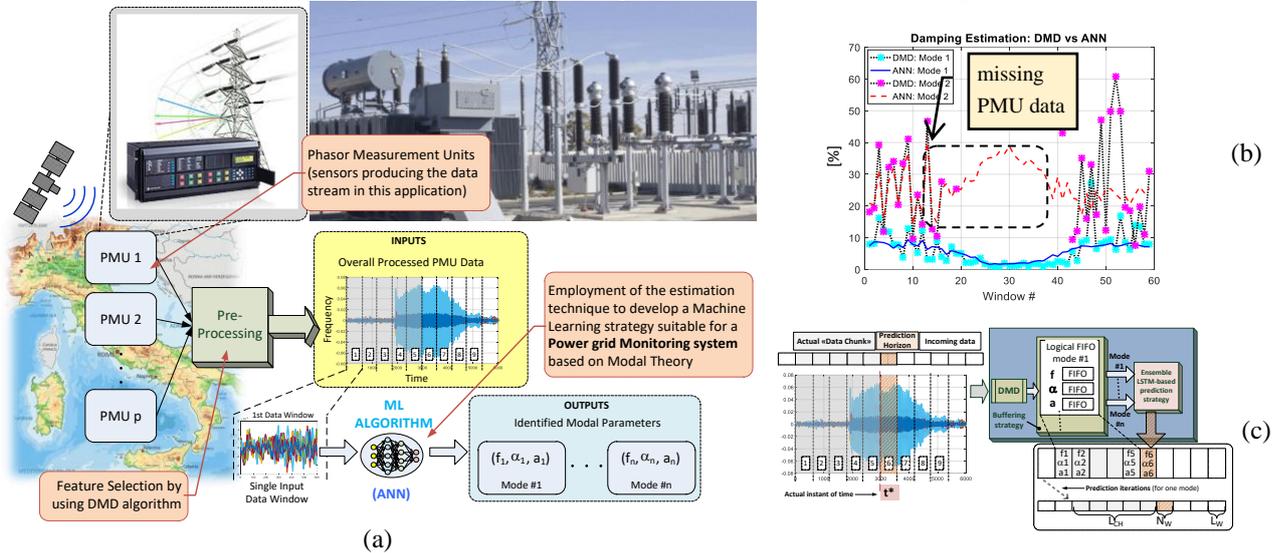


Fig. 1: Schematizzazione ad alto livello della strategia di stima proposta, (a). Risultati ottenuti per la stima dei parametri modali tramite FF-NN rispetto al metodo con DMD dei primi 2 modi; andamenti di smorzamento con finestre di dati di lunghezza temporale pari a 30 secondi (b) e struttura del metodo proposto (c).

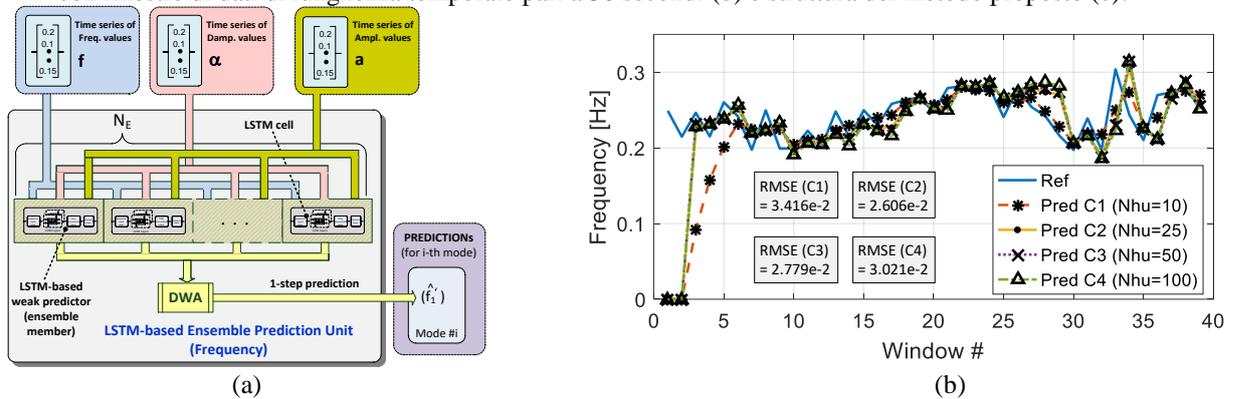


Fig. 2: Approccio previsionale con metodo Ensemble: a) strutturale generale, b) risultato della previsione della frequenza con previsioni multi-variate ad un passo (1-Step), ovvero 30 secondi nel futuro.

- [1] C. Olivieri, F. de Paulis, A. Orlandi, C. Pisani, G. Giannuzzi, R. Salvati, R. Zaottini. 2020. "Estimation of Modal Parameters for Inter-Area Oscillations Analysis by a Machine Learning Approach with Offline Training" *Energies* 13, no. 23: 6410.
- [2] C. Olivieri, G. Giannuzzi and F. de Paulis, "Comparison of LSTM-Based Prediction Strategies for Grid Modal Parameters Forecast," 2023 11th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Paris, France, 2023, pp. 1-6
- [3] C. Olivieri, F. de Paulis, A. Orlandi, C. Pisani, S. Tessitore, A. Restelli, G. Giannuzzi, "Application of an integrated RNN - ensemble method for the short-term forecast of inter-area oscillations modal parameters, Electric Power Systems Research, 2023
- [4] C. Olivieri, F. de Paulis, L. Di Leonardo, A. Orlandi, C. Pisani, G. Giannuzzi, "Enhancement of short-term prediction capabilities of inter-area grid oscillations with a multi-variate ensemble-based method", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 41, 2025