

MODELLAZIONE NEURALE LSTM E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI UNA MOLLA MAGNETICA

Grazia Lo Sciuto, Giacomo Capizzi, Salvatore Coco

Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e Informatica (DIEEI)
Università degli Studi di Catania
Viale Andrea Doria 6, Catania

Il crescente consumo di energia e l'inquinamento ambientale dovuto all'estrazione di combustibili fossili hanno portato alla ricerca e ottimizzazione di nuove soluzioni e nuovi dispositivi di raccolta di energia [1], [2]. Di recente, i magnetic springs (molle magnetiche) sono considerati dispositivi promettenti per sistemi di raccolta di energia basati sulle loro proprietà magnetiche e meccaniche. Nel sistema considerato per la nostra modellazione il magnetic spring è costituito da tre magneti cilindrici in neodimio (NdFeB) che sono assemblati in un involucro cilindrico realizzato in poliammide. I magneti sono allineati assialmente e collocati per respingersi magneticamente a vicenda. Il magnete centrale interposto tra i magneti fissi può levitare liberamente tra loro. La molla magnetica è dunque formata dall'involucro, dal magnete levitante e da due magneti fissi (Figura 1).

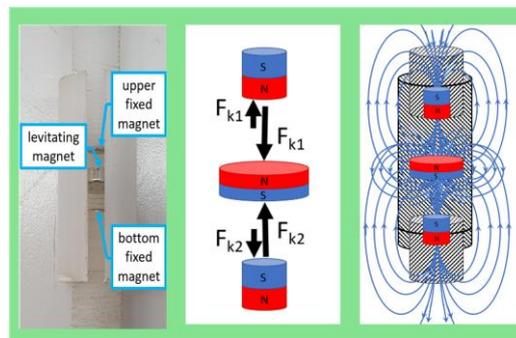


Figura 1 Prototype of magnetic spring (force distribution and configuration)

I magneti fissi sono magneti permanenti di forma cilindrica aventi altezza di 5 mm e diametro di 5 mm. Il magnete interposto è un magnete permanente di forma cilindrica con altezza di 3 mm e un diametro di 10 mm. I magneti hanno una permeabilità relativa di 1,0535 e una coercitività magnetica di 937,4 kA/m. La forza repulsiva che agisce sul magnete interposto è considerata forza elastica, perché consente di immagazzinare l'energia quando il magnete viene respinto o attratto. L'energia immagazzinata può essere quindi recuperata quando i magneti si allontanano e la molla viene allungata [3]. La forza elastica della molla magnetica

è non lineare e dipende fortemente dalle proprietà magnetiche dei suoi componenti e dalla loro configurazione [4], [5]. Per caratterizzare il comportamento del sistema la molla magnetica è collocata sulla parte superiore di un generatore di vibrazioni e viene mossa dalle vibrazioni da esso generate. La disposizione ottimale delle bobine in relazione alla raccolta di energia dipende dalla distribuzione del campo magnetico durante il movimento del magnete [6], [7]. Le distribuzioni del campo magnetico sono solitamente determinate utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM), tuttavia nel sistema di raccolta di energia basato sulla molla magnetica la smagnetizzazione dei magneti non può essere stimata con l'accuratezza richiesta. Inoltre, la simulazione dinamica della distribuzione del campo magnetico e del movimento della molla magnetica indotto dalla vibrazione esterna richiede calcoli complessi e dispendiosi in termini di tempo, rendendo quindi problematico lo sviluppo del modello del sistema inerziale. Per un'analisi rapida della distribuzione del campo magnetico viene pertanto adoperata una rete neurale che fornisce rapidamente i risultati necessari per l'ottimizzazione della molla magnetica. In particolare per le previsioni della distribuzione del campo magnetico della molla magnetica collocata sul generatore di vibrazioni è stata utilizzata una rete neurale Long Short-Term Memory (LSTM). Per la valutazione dei risultati del modello neurale sono stati condotti diversi test di misurazione sperimentale del campo magnetico presso il laboratorio del Department of Mechatronics, Silesian University of Technology, Gliwice. Il confronto con i dati sperimentali ha permesso di stabilire che il modello predittivo basato su LSTM garantisce risultati di buona accuratezza in tempi rapidi. Infatti nella previsione LSTM, gli RMSE medi riscontrati su tutte le misure sperimentali di campo magnetico sono stati del 4,6%. Pertanto la rete neurale LSTM può essere considerata una buona soluzione con basso errore, rapido addestramento del set di dati e prestazioni superiori in relazione al processo di ottimizzazione del dispositivo. Inoltre la rete LSTM può superare efficacemente i problemi di memoria a breve termine, la non linearità e la smagnetizzazione e la distribuzione del campo magnetico può essere stimata senza la definizione dei parametri meccanici della molla magnetica e del generatore di vibrazioni. In definitiva il modello neurale predisposto si è rivelato utilizzabile con successo per la caratterizzazione e l'ottimizzazione della molla magnetica nelle applicazioni di raccolta di energia e costituisce uno strumento molto duttile per ottimizzare la potenza generata dalla molla e l'efficienza complessiva del sistema di raccolta.

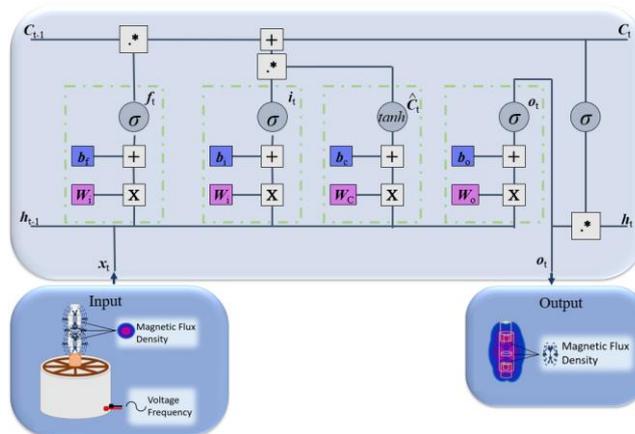


Figura 2 Modello deep learning per la previsione del campo magnetico nella molla magnetica alimentata dal generatore di vibrazioni

BIBLIOGRAFIA

1. J. Mohtasham, "Renewable energies", *Energy Proc.*, vol. 74, pp. 1289-1297, Jan. 2015.
2. D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation", *Energy Strategy Rev.*, vol. 24, pp. 38-50, Apr. 2019.
3. M. Li, A. Luo, W. Luo and F. Wang, "Recent progress on mechanical optimization of MEMS electret-based electrostatic vibration energy harvesters", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 726-740, Oct. 2022.
4. Lo Sciuto, G., Bijak, J., Kowalik, Z., & Kowol, P. Magnetorheological fluid magnetic spring harvester design and characterization. *Advances in Science and Technology. Research Journal*.
5. Bijak, J., Lo Sciuto, G., Kowalik, Z., Lasek, P., Szczygieł, M., & Trawiński, T. (2023). Magnetic flux density analysis of magnetic spring in energy harvester by hall-effect sensors and 2d magnetostatic fe model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 579, 170796.
6. Lo Sciuto, G., Bijak, J., Kowalik, Z., Trawinski, T., Omer, N., & Sallah, M. (2025). Nonlinear Autoregressive Neural Network with Exogenous Input Model Approach for Magnetic Flux Density Measured by Hall-Effect Sensor in Magnetic Spring. *Appl. Math*, 19(1), 87-99.
7. Lo Sciuto, G., Bijak, J., Kowalik, Z., Szczygieł, M., & Trawiński, T. (2024). Displacement and magnetic induction measurements of energy harvester system based on magnetic spring integrated in the electromagnetic vibration generator. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(3), 3305-3320.
8. Lo Sciuto, G., Bijak, J., Kowalik, Z., Kowol, P., Brociek, R., & Capizzi, G. (2024). Deep learning model for magnetic flux density prediction in magnetic spring on the vibration generator. *IEEE Access*.
9. A. Alihodzic, A. Mujezinovic and E. Turajlic, "Electric and magnetic field estimation under overhead transmission lines using artificial neural networks", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 105876-105891, 2021.

10. V. Mateev and I. Marinova, "Machine learning in magnetic field calculations", Proc. 19th Int. Symp. Electromagn. Fields Mechatronics Electr. Electron. Eng. (ISEF), pp. 1-2, Aug. 2019.
11. H. Wu, Y. Zhang, W. Fu, C. Zhang and S. Niu, "A novel pre-processing method for neural network-based magnetic field approximation", IEEE Trans. Magn., vol. 57, no. 10, pp. 1-9, Oct. 2021.