

PIECEWISE-LINEAR MODELING OF A BI-LAYER MAGNETOSTRICTIVE CANTILEVER

C. S. Clemente¹, D. Davino², V. P. Loschiavo², C. Visone³

¹Dipartimento di Medicina e Scienze della Salute “Vincenzo Tiberio”, Università degli Studi del Molise, Via Francesco De Sanctis 1, 86100 Campobasso, Italia

²Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio, P.zza Roma, 21, 82100 Benevento, Italia

³Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell’Informazione, Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Claudio, 21, 80125 Napoli, Italia

L’energy harvesting (EH) rappresenta l’insieme delle tecnologie in grado di captare e convertire piccole quantità di energia dispersa nell’ambiente – proveniente da fonti naturali (es. vibrazioni, gradienti termici) o antropiche (es. rumore meccanico industriale) – in forme di energia direttamente utilizzabili, come l’elettricità. Questa tecnologia riveste un ruolo critico nell’alimentazione di dispositivi a basso consumo, quali sensori wireless, wearable devices, impianti medici e nodi IoT in contesti remoti o privi di infrastrutture elettriche convenzionali [1].

I sistemi di EH si basano spesso su materiali smart con proprietà multifunzionali, in grado di rispondere in modo controllato a stimoli ambientali. Tra i materiali più studiati per la conversione di energia meccanica da vibrazioni, i composti magnetostrittivi (MS), come Terfenol-D o Galfenol, emergono per le loro prestazioni superiori rispetto ai tradizionali piezoelettrici (PZT). Questi materiali combinano un’elevata densità di energia ad una robustezza meccanica intrinseca e una stabilità termica superiore, riducendo fenomeni critici come la depolarizzazione elettrica o la propagazione di microfratture [2]. Tuttavia, nonostante la loro ampia applicazione negli ultimi decenni, anche in dispositivi con configurazioni multi-risonanti [3], non è presente in letteratura un modello analitico completo che integri le loro caratteristiche meccaniche ed elettromagnetiche.

Diverse sono le configurazioni con le quali un materiale magnetostrittivo può essere efficacemente impiegato in un harvester. Un vibration energy harvester (VEH) del tipo “velocity-driven” è tipicamente realizzato come un cantilever multi-layer ed è rigidamente collegato a un telaio vibrante. A causa delle oscillazioni indotte, il materiale magnetostrittivo è soggetto ad uno stress longitudinale che produce una magnetizzazione variabile nel tempo. Per mezzo di una bobina avvolta attorno al cantilever è di conseguenza possibile ottenere, in accordo con la legge di Faraday-Neumann, una tensione elettrica.

L’interazione mecano-magnetica in un cantilever magnetostrittivo può essere descritta correttamente attraverso la nota equazione di Eulero-Bernoulli (E-B). Tale equazione è in grado di tenere conto anche dei fenomeni di smorzamento (sia viscosi che di Kelvin-Voigt) e deve essere combinata con un opportuno modello per la magnetostrizione. Per fornire una modellazione fenomenologica del VEH magnetostrittivo, ci siamo concentrati su cantilever bi-layer composto da uno strato di Galfenol (Fe-Ga) – il materiale magnetoelastico – incollato su un substrato di alluminio (Figura 1). Gli spessori individuali dei due strati sono stati scelti per garantire che l’asse neutro si trovi all’interno dello strato di alluminio, consentendo a tutte le fibre di Fe-Ga di subire simultaneamente sollecitazioni di trazione o compressione.

La soluzione di regime, in termini di spostamento dell'asse neutro, per un moto sinusoidale della base vibrante può essere ottenuta mediante una trasformazione complessa. Diversi approcci possono, invece, essere adottati per modellare il comportamento magnetoelastico del materiale. In passato sono stati messi a punto diversi modelli, tra i quali un modello non lineare “fully-coupled”, capace di tenere in conto anche del cosiddetto “ ΔE -effect” [4], che ha fornito ottimi risultati. Per ridurre l'onere computazionale e fornire un modello adeguato anche per i casi in cui lo stress totale è di trazione –cosa non tenuta in conto correttamente dai modelli di norma utilizzati-, è stata esplorata, ed è ancora in fase di analisi, la possibilità di introdurre nell'algoritmo una modellazione lineare a tratti (Figura 2).

La Figura 3 confronta i risultati delle simulazioni ottenuti utilizzando il modello lineare a tratti con quelli ottenuti mediante un modello lineare ed uno non lineare. Sono state incluse anche misure sperimentali, principalmente per convalidare l'approccio proposto piuttosto che per ottimizzare le prestazioni di recupero energetico. Il modello lineare a tratti impiegato per modellare il materiale MS (Fe-Ga) dimostra un'elevata accuratezza sia in condizioni di trazione che di compressione, una proprietà fondamentale dal momento che il materiale magnetostrittivo è soggetto alternativamente a trazione e compressione in ogni ciclo sotto eccitazione sinusoidale variabile nel tempo (come quella utilizzata nelle simulazioni e nei test sperimentali). Tale modello, impiegato opportunamente, consentirebbe anche di ottenere una soluzione in forma chiusa del problema, svincolandosi dalle approssimazioni intrinseche dei metodi numerici sin qui utilizzati.

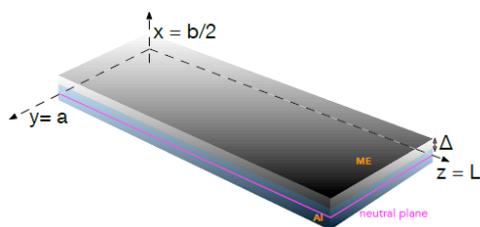


Figure 1: Schematizzazione del cantilever bi-layer compost da Fe-Ga ed Al (incollati tra loro).

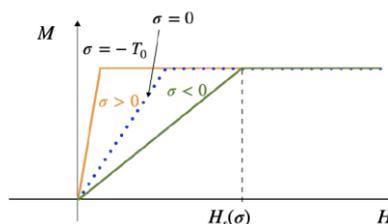


Figura 2: Sketch concettuale del modello piecewise-linear per la caratteristica $M - H$ per il Fe-Ga (σ è un parametro di curva).

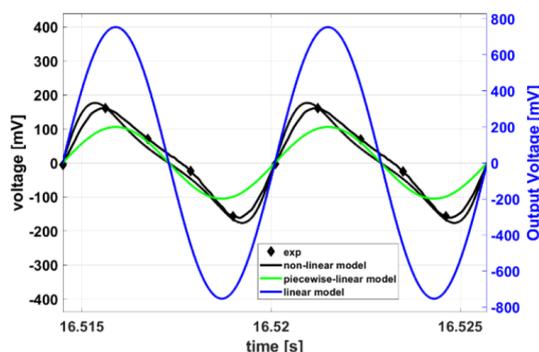


Figura 3: Confronto tra la tensione di uscita in circuito aperto del cantilever, sperimentale (in nero con rombi) e simulata (modello non lineare in nero, lineare a tratti in verde, lineare in blu). Sono state adottate scale diverse per i modelli, non lineare e lineare a tratti da un lato (sinistra) e lineare dall'altro (destra).

Bibliografia

- [1] Mitcheson et al., Proceedings of the IEEE, 96 (2008).
- [2] Atulasimha and Flatau, Smart Materials and Structures, 20 (2011).
- [3] Gao et al., J. Magn. Magn. Mater., 547 (2022).
- [4] Clemente et al., J. Magn. Magn. Mater. 592 (2024).