



Ricerca di Sistema elettrico

Dry-run test di un sistema PTO per ReWEC basato su elastomeri elettroattivi

Giacomo Moretti, Francesco Damiani, Marco Fontana



Sant'Anna
Scuola Universitaria Superiore Pisa

DRY-RUN TEST DI UN SISTEMA PTO PER REWEC BASATO SU ELASTOMERI ELETTROATTIVI

Marco Fontana, Giacomo Moretti, Francesco Damiani (Scuola Superiore S. Anna di Pisa)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Studio di un sistema PTO per REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Dry-run test di un sistema PTO per REWEC basato su elastomeri elettroattivi"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Scuola Superiore S. Anna di Pisa: Marco Fontana

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	8
2.1 SVILUPPO DI UN BANCO DI PROVA.....	8
2.2 TEST SPERIMENTALI ED ANALISI DEI RISULTATI	12
2.3 DIMENSIONAMENTO DEL PTO A ELASTOMERO DIELETTRICO PER SISTEMA ReWEC.....	16
3 CONCLUSIONI.....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	22

Sommario

Il presente report descrive in modo sintetico le principali attività svolte in collaborazione tra ENEA e Istituto TeCIP della Scuola Sant'Anna (PI) che riguardano lo sviluppo di test su un banco di prova in scala ridotta di un Power Take Off (PTO) innovativo per un sistema di estrazione di energia dal moto ondoso.

Tale PTO è basato su una nuova tecnologia che fa uso di materiali polimerici (Elastomeri Dielettrici, DE) utilizzati per realizzare generatori elettrostatici deformabili che sfruttano variazioni di capacità elettrica per convertire l'energia meccanica in energia elettrica.

Il convertitore di energia dalle onde (WEC) cui la presente ricerca fa riferimento è il dispositivo di tipo Oscillating Water Column (OWC) ReWEC sviluppato dall'Università Mediterranea (RC). Scopo del presente lavoro è quello di verificare la fattibilità preliminare dell'installazione di un PTO basato su DE (nello specifico, un generatore di tipo a diaframma circolare, CD-DEG) nell'impianto pilota ReWEC di Reggio Calabria.

Il presente lavoro è stato svolto in parallelo e come parte complementare di un progetto di collaborazione tra ENEA e Università di Bologna, nell'ambito del quale sono stati approfonditi temi inerenti la modellazione di sistemi accoppiati OWC – PTO polimerico.

Nel corso del progetto, sono stati sviluppati gli algoritmi di controllo per un sistema di simulazione di tipo Hardware-in-the-Loop (HIL), che sfrutta un prototipo fisico di PTO in piccola scala (approssimativamente 1:5 rispetto al PTO richiesto per l'OWC di Reggio Calabria) ottenuto attraverso una customizzazione di un banco prova esistente e disponibile presso i laboratori della Scuola Sant'Anna.

Il controllo sfrutta un software che simula in real-time l'idrodinamica del ReWEC (il cui modello è stato sviluppato dall'Università di Bologna) al fine di studiare la risposta accoppiata dei due sottosistemi (OWC e PTO polimerico).

Lo scopo principale degli esperimenti è stato quello di verificare l'implementabilità delle strategie di controllo precedentemente teorizzate.

Nel corso del progetto, è stato sviluppato un circuito elettronico che, con l'espedito dell'inserimento di una capacità ausiliaria in parallelo al CD-DEG, consente di effettuare cicli di controllo ad elevata energia convertita, pur mantenendo logiche e architetture di controllo piuttosto semplici.

Gli esperimenti hanno dimostrato l'effettiva efficacia del circuito e delle strategie di controllo studiate, che si sono rivelate implementabili anche in presenza di onde (simulate) irregolari pancromatiche.

Sulla base di tale riscontro e dei dati di simulazione forniti dall'Università di Bologna, è stato possibile procedere ad un dimensionamento di massima dell'architettura elettronica di un PTO polimerico per l'impianto ReWEC di Reggio Calabria.

Il presente report è strutturato come segue. La Sezione 1 fornisce una breve introduzione alla tecnologia dei DEGs e della loro applicazione come PTO per sistemi di conversione di tipo OWC. La Sezione 2 descrive le principali attività svolte nell'ambito del progetto in termini di: sviluppo hardware del banco di prova, svolgimento dei test e dimensionamento del sistema PTO. La Sezione 4 riporta le conclusioni e le prospettive future di sviluppo del progetto.

1 Introduzione

I generatori ad elastomero dielettrico (Dielectric Elastomer Generators, DEGs) sono sistemi deformabili, basati su materiali polimerici, in grado di convertire energia meccanica in energia elettrica in modo diretto [1]. In termini funzionali, un DEG è un condensatore elettrico deformabile, costituito da una o più membrane di elastomero dielettrico rivestite con elettrodi cedevoli (entrambi in grado di subire deformazioni oltre il 500 % della propria lunghezza iniziale).

Il meccanismo di conversione dell'energia è fondato sui principi dell'elettrostatica (non vi è infatti contributo rilevante o funzionale da parte di fenomeni elettromagnetici o elettrodinamici). Un esempio semplificato di ciclo di funzionamento di un DEG è schematizzato in Figura 1. Partendo da una configurazione iniziale (A), il DEG viene deformato (per effetto del lavoro meccanico fornito da una sorgente esterna) fino ad una configurazione (B). In (B), il DEG viene attivato imponendo un voltaggio ai suoi elettrodi. Durante la fase successiva, il DEG (carico) viene lasciato libero di tornare alla configurazione iniziale (C): in questo passaggio, la riduzione di capacità provoca un incremento dell'energia potenziale delle cariche presenti sugli elettrodi (parte del lavoro meccanico precedentemente fatto sul sistema viene cioè convertito in energia elettrica). Infine, in (D) il DEG viene completamente scaricato, recuperando così una quantità di energia elettrica maggiore di quella spesa in (A) per attivare il sistema.

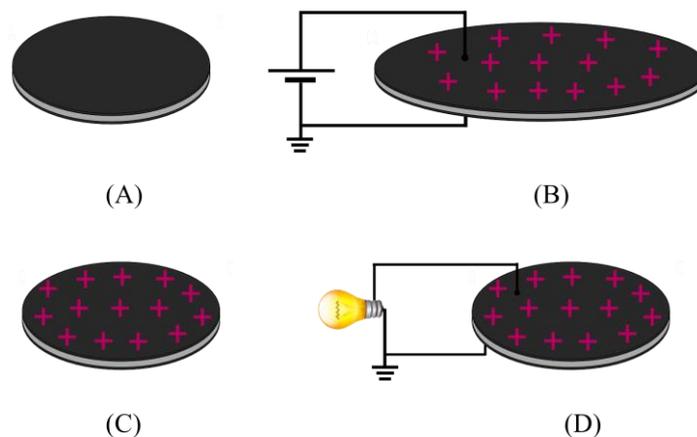


Figura 1. Principio di funzionamento di un DEG.

I materiali tipicamente utilizzati come elastomeri dielettrici (Dielectric Elastomers, DE) sono siliconi, acrilici e gomma (naturale o sintetica), mentre gli elettrodi deformabili sono generalmente realizzati con polvere di grafite/carbonio, polimeri conduttivi, film metallici sottili o grasso conduttivo.

Recentemente, è stato osservato che l'applicazione dei DEG alla conversione di energia dal moto ondoso è potenzialmente promettente e futuribile [2-5]. I DEG presentano infatti una serie di caratteristiche che ben si accoppiano con i requisiti dei generatori di elettricità dalle onde:

- I materiali che costituiscono i DEG sono leggeri, resilienti, resistenti alla corrosione (tipica invece dei componenti metallici operanti in ambiente marino).
- I polimeri impiegati come DE sono estremamente economici (il prezzo di mercato della gomma naturale, ad es., è di pochi \$/kg).
- I DEG consentono di convertire l'energia delle onde direttamente in energia elettrica ad alto voltaggio pronta per essere distribuita in rete, senza necessità di riduzioni meccaniche o ulteriori macchine elettriche.
- I DEG presentano alta efficienza di conversione, indipendentemente dalla frequenza di lavoro, e sono pertanto adatti ad operare alle basse frequenze tipiche delle onde.

L'implementazione pratica dei DE nel settore delle energie marine richiede tuttavia uno sforzo di ricerca indirizzato a risolvere questioni attinenti il controllo e l'architettura elettrica dei generatori, l'ottimizzazione dinamica di sistemi accoppiati WEC + DEG, l'ottimizzazione del ciclo di vita sul lungo periodo.

Lo studio di soluzioni per i WEC basate sui DE è pertanto oggetto di vari progetti di ricerca. Tra essi si ricordano, tra gli altri, lo sviluppo del prototipo Standing Wave Tube da parte della compagnia olandese SBM [3]; il progetto PolyWEC (www.polywec.org) coordinato dalla Scuola Sant'Anna e indirizzato alla ricerca di base sulla fattibilità di WEC polimerici; il progetto WetFeet, coordinato dal centro portoghese WavEC e che coinvolge la Scuola Sant'Anna come partner italiano.

Tra le soluzioni indagate fino ad oggi trova spazio l'applicazione dei DEG in accoppiamento coi WEC a colonna d'acqua oscillante (Oscillating Water Column, OWC). Questi ultimi sono dispositivi basati su un collettore cavo (che può essere fisso o galleggiante) con una apertura sommersa. Il collettore racchiude una colonna d'acqua che, per azione delle onde incidenti, oscilla all'interno della camera, andando a comprimere e decomprimere ciclicamente un volume d'aria soprastante la colonna d'acqua stessa. Uno schema concettuale di una OWC con collettore fisso è mostrato in Figura 2(a).

Nelle implementazioni convenzionali, l'energia trasferita dalla colonna d'acqua all'aria viene raccolta per mezzo di una turbina (PTO convenzionale) ad aria a doppia azione (in grado cioè di elaborare portate fluenti nei 2 versi) in comunicazione con l'atmosfera [6].

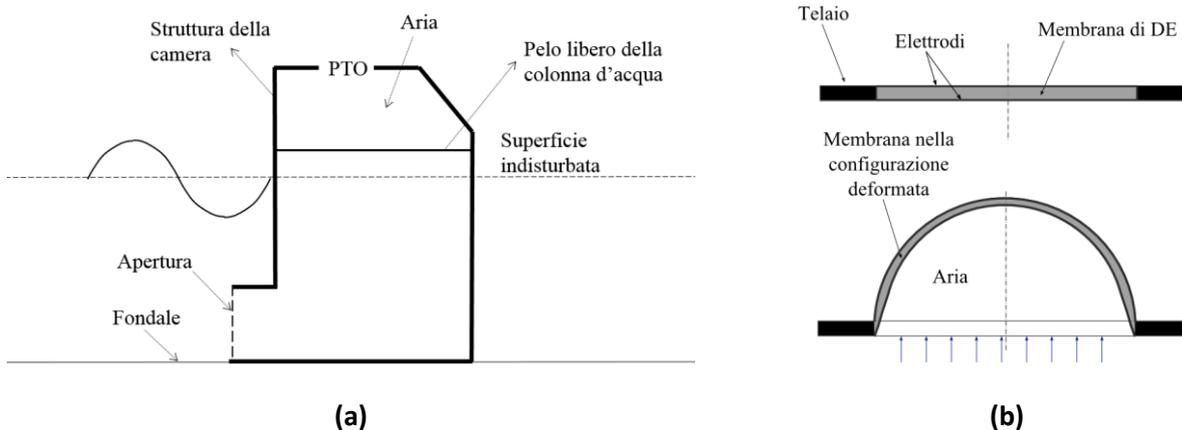


Figura 2. (a) Rappresentazione schematica di una OWC; (b) Schema di un CD-DEG

L'architettura non-convenzionale di PTO che viene proposta è basata sui DE e prevede invece una camera chiusa superiormente per mezzo di un DEG a diaframma circolare (Circular Diaphragm DEG, CD-DEG), che rimpiazza la turbina ad aria.

Uno schema di CD-DEG è riportato in Figura 2(b): il generatore è costituito da uno o più strati circolari di DE assemblati a formare uno stack. Il polimero è pre-caricato con un carico equibiassiale (di trazione) uniforme e fissato ad un frame lungo il suo perimetro. Tale pre-carico è introdotto al fine di evitare la perdita di tensione membranale durante l'operatività.

Il principio di funzionamento si basa sulla variazione di pressione differenziale tra le facce opposte del DEG che induce la deformazione ciclica "fuori dal piano" della membrana (e quindi una variazione di capacità), rendendo possibile l'implementazione del meccanismo di conversione dell'energia descritto in Figura 1. Nello specifico, la capacità del CD-DEG è minima quando la membrana è piatta in posizione orizzontale (Figura 2(b) in alto) ed è massima quando la sua deformazione fuori dal piano (verso l'alto o verso il basso) è massima, come in Figura 2(b) in basso.

Una descrizione di dettaglio dell'architettura, funzionamento, controllo e modellazione del CD-DEG è presente in [7-8]. Il principio di funzionamento del convertitore OWC basato su DEG è stato analizzato e attraverso modelli di simulazione e verificato sperimentalmente [REF] nell'ambito di test in vasca. I lavori

svolti considerando però una architettura del collettore esemplificativa difficilmente replicabile in scala reale.

Nel presente lavoro, lo studio viene invece condotto in modo da adattare il sistema PTO e il relativo controllore allo specifico collettore del ReWEC, attualmente installato presso il Laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria (www.noel.unirc.it).

ReWEC è un'OWC a struttura fissa che fa uso di un particolare layout per il collettore che consente di ottimizzarne la risposta dinamica. Nello specifico, la camera di ReWEC è dotata di una peculiare forma ad U che consente di aumentare l'inerzia della massa d'acqua in movimento, così da portare la colonna d'acqua in risonanza con onde aventi le frequenze tipiche delle onde marine [9-10]. Attualmente è equipaggiato con una turbina ad aria per la conversione dell'energia pneumatica accumulata in energia elettrica.

Uno schema di impianto ReWEC equipaggiato col nuovo concept di PTO polimerico è mostrato in Figura 3.

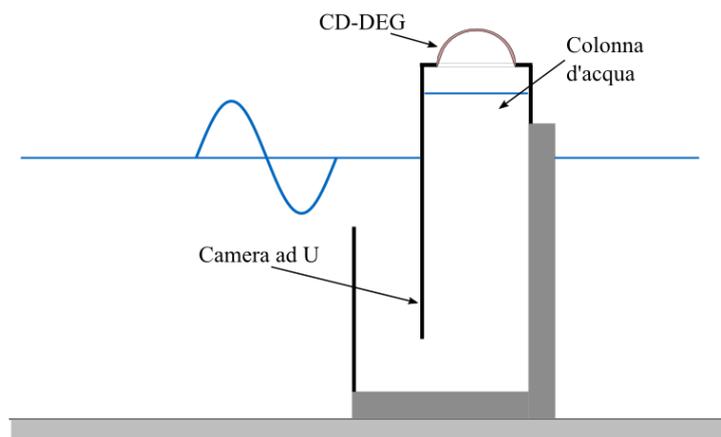


Figura 3. Rappresentazione schematica di un impianto ReWEC (con la peculiare camera ad U) equipaggiato con un CD-DEG come PTO.

Allo scopo di verificare la fattibilità dell'installazione di un CD-DEG su ReWEC, è stato realizzato un prototipo in piccola scala di CD-DEG che è stato testato in laboratorio in modalità "dry". I test sperimentali hanno cioè riguardato il solo PTO, mentre l'idrodinamica della colonna d'acqua è stata simulata via software.

Il setup sperimentale è stato allestito a partire da un test bench esistente e disponibile presso i laboratori della Scuola Sant'Anna [11]. Tale test bench consente di imporre profili tempo-varianti di pressione al CD-DEG per mezzo di un pistone rigido collocato alla base della camera d'aria, così da replicare le condizioni presenti nella camera di un'OWC con PTO dielettrico.

Il test bench è stato opportunamente sensorizzato ed equipaggiato con un CD-DEG di opportune dimensioni al fine di adattare il setup al caso studio in esame (con collettore ReWEC).

Al fine di verificare la mutua influenza tra l'idrodinamica (simulata) della colonna d'acqua oscillante e la risposta (fisica) del CD-DEG, sono stati effettuati test di tipo Hardware-in-the-Loop (HIL), nei quali i segnali di pressione misurata nel prototipo sono stati utilizzati come input di un modello software di idrodinamica del ReWEC, utilizzato a sua volta per calcolare la dinamica del pelo libero dell'acqua e controllare conseguentemente lo spostamento del pistone.

Gli esperimenti HIL hanno consentito di:

- Verificare l'effetto della membrana sulla dinamica del WEC: sia l'attivazione elettrica che la rigidità meccanica del CD-DEG contribuiscono alla dinamica dell'OWC con un contributo di rigidità-smorzamento che influenza la legge di moto della colonna d'acqua.
- Verificare l'efficacia delle strategie di controllo teorizzate: è stato testato un controllore in grado di gestire l'attivazione elettrica del CD-DEG in funzione dei segnali misurati real-time. L'efficacia del controllore è stata testata anche in presenza di onde irregolari simulate.

I risultati dei test HIL e la descrizione del setup sono state oggetto di una pubblicazione recentemente presentata alla conferenza OCEANS'2015 (Genova) [12].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questa sezione viene presentato il setup sperimentale basato su un prototipo in piccola scala di CD-DEG. Il PTO considerato ha una scala di circa 1:5 rispetto alle dimensioni che avrebbe se fosse installato sul prototipo di ReWEC/3 presente presso il sito di test di Reggio Calabria, che ha a sua volta una scala di 1:10 rispetto alle dimensioni full-scale e rispetto al prototipo installato a Civitavecchia. Grazie alla scalabilità dei PTO basati su elastomero dielettrico, è possibile ottenere, anche da test in piccola scala, risultati altamente correlabili (in termini di efficienza e risposta dinamica) con quelli attesi in scala reale.

Dopo una descrizione del test bench presente nei laboratori della Scuola Sant’Anna, verrà discussa l’architettura dei test HIL effettuati

Successivamente verranno riportati dei risultati relativi a test nei quali il sistema è operato in onde regolari (monocromatiche) e irregolari (pancromatiche) simulate e comandato utilizzando una strategia di controllo che utilizza i dati real-time dello spostamento del pelo libero dell’acqua come unica variabile di controllo (senza far uso di previsioni o stime della dinamica futura).

2.1 Sviluppo di un banco di prova

Il test bench disponibile presso l’istituto TeCIP (Sant’Anna) per lo studio dei CD-DEG è mostrato in Figura 4. Il setup comprende i seguenti componenti: il sottosistema meccanico costituito da un cilindro + pistone; il sottosistema elettronico ad alto voltaggio (HV); il sottosistema del controllore real-time.

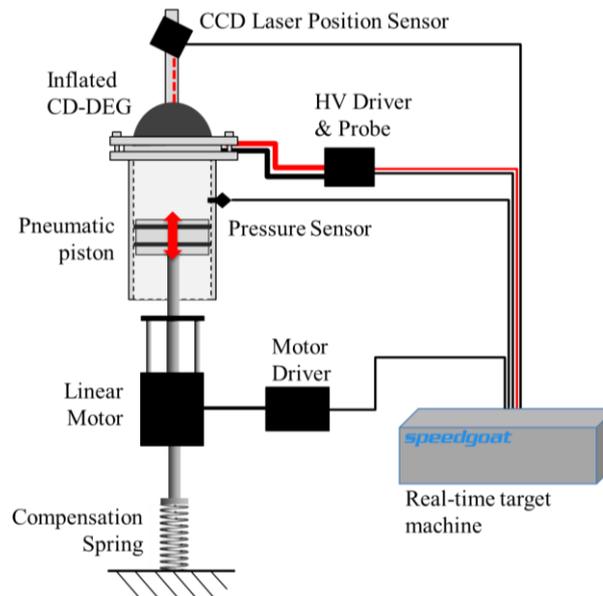


Figura 4. Schema del setup sperimentale

Sottosistema meccanico: per simulare la camera d’aria di una generica OWC, è costituito da un cilindro pneumatico che comprende: un tubo di polycarbonato (con diametro interno di 130 mm); un pistone rigido; il CD-DEG fissato in testa alla camera d’aria. Le perdite d’aria sono state minimizzate utilizzando una guarnizione anulare in gomma in corrispondenza delle flange tra le quali è serrato il supporto del CD-DEG, e apposite guarnizioni a labbro sul pistone.

Il pistone è attuato tramite un motore brushless lineare (P01-37x120F/200x280-HP LinMot) equipaggiato con un encoder integrato per misurare lo spostamento, z , del pistone. Un sensore di pressione (MPX12 Freescale Semiconductor) montato nella parte superiore del cilindro è utilizzato per misurare la pressione

relativa, p , nella camera. Il cilindro è montato verticalmente ed una molla di richiamo è stata introdotta per compensare il peso del pistone e del traslatore del motore.

Sottosistema elettronico HV: un'elettronica di controllo HV custom è stata sviluppata per controllare l'attivazione elettrica del CD-DEG. Come mostrato in Figura 5, l'elettronica di controllo considerata comprende un alimentatore HV (10C24-P125 UltraVolt), tre relè reed HV (HM12-1A69-150 MEDER electronic) e due condensatori ausiliari HV. In particolare, C_2 è un condensatore che risulta connesso in parallelo al DEG (indicato con C_d in Figura 5) in ogni istante del ciclo di controllo ed è introdotto per assorbire ed accumulare parte della carica, limitando l'aumento di voltaggio ai capi del DEG, durante la fase di generazione. Come spiegato più avanti (nella sezione relativa al controllo) una scelta appropriata del valore di C_2 permette di ottimizzare l'energia convertita ad ogni ciclo [13].

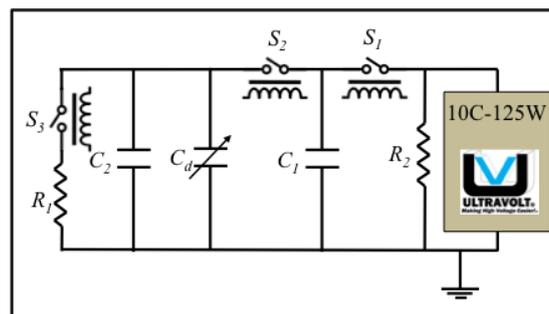


Figura 5. Rappresentazione schematica del circuito di controllo HV.

La capacità C_1 è molto maggiore di C_2 e C_d ed è utilizzata per caricare il parallelo C_2 - C_d . Nello specifico, la carica del CD-DEG (e di C_2) ha luogo quando il relè S_2 è chiuso (ed S_1 è aperto). Nel circuito, la resistenza R_2 ($R_2 = 20 \text{ M}\Omega$) è utilizzata come carico resistivo per l'alimentatore, mentre R_1 ($R_1 = 20 \text{ M}\Omega$) è usata per limitare i picchi di corrente che si verificano durante la scarica del DEG (cioè, quando S_3 è chiuso) e per dissipare l'energia generata (avendo questo setup scopo puramente dimostrativo, l'energia ottenuta in fase di generazione è stata interamente dissipata sul carico).

Per misurare la differenza di potenziale, V_d , ai capi del CD-DEG è stata implementata una sonda HV custom (non mostrata in Figura 5) ad altissima impedenza (circa $50 \text{ G}\Omega$, al fine di limitare drasticamente la sua la dissipazione della carica presente sul CD-DEG) e ampia banda di risposta in frequenza, ottenuta grazie ad un rete di compensazione capacitiva.

Al fine di minimizzare le correnti parassite nell'elettronica di potenza, i vari cavi e componenti HV sono stati isolati tramite rivestimenti spessi di gel silicico (Magic gel Raytech) e adesivo acrilico (VHB 4905).

Una seconda sonda, uguale alla prima, è utilizzata per misurare il voltaggio V_1 sul capacitore C_1 . Tramite la lettura di questo valore di voltaggio (durante la fasi di carica del parallelo C_2 - C_d) è possibile valutare con una certa accuratezza il valore iniziale di C_d .

Prototipo di CD-DEG: il CD-DEG dimensionato per il caso studio in esame è costituito da uno stack di strati deformabili, come mostrato in Figura 6. Il prototipo è costituito da uno strato attivo di DE ottenuto incollando due fogli di polimero acrilico (VHB 4905 della 3M, venduto commercialmente come adesivo). Lo strato dielettrico è montato con un certo livello di pre-tiraggio su un anello di policarbonato e dipinto su entrambe le facce con elettrodi deformabili fatti di grasso conduttivo silicico a base di particelle carboniose (MG-Chemicals 846).

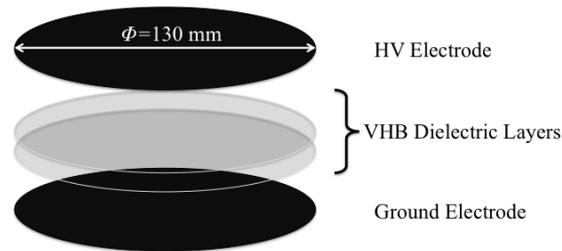


Figura 6. Schema dell'architettura a stack del prototipo di CD-DEG.

Il diametro interno dell'anello in policarbonato è 130 mm (ovvero, 65 cm riportati in scala 1:10, 6.5 m in scala 1:1); il materiale acrilico è pre-deformato con carico membranale equibiaassiale in modo da assumere un pre-stretch $\lambda_p = 3$; lo spessore a riposo dello strato dielettrico (prima del montaggio sul frame e della deposizione degli elettrodi) è $t_0 = 1$ mm.

Per gli scopi specifici di questo lavoro, il setup è stato equipaggiato con un sensore laser di spostamento ad alta velocità ed alta risoluzione di tipo CCD (LK-G152 Keyence) che è stato montato al di sopra del CD-DEG ed è stato utilizzato per misurare lo spostamento, h , del punto centrale (TIP) della membrana. Nell'allestimento qui presentato il sensore CCD è in grado di misurare l'altezza del tip solo in corrispondenza di deformazioni della membrana verso l'alto ($h > 0$).

Grazie alla sensorizzazione di cui è stato equipaggiato il setup, il sistema hardware può rendere disponibili al controllore le seguenti possibili variabili di input:

- La pressione relativa, p , nella camera, misurata tramite il sensore di pressione;
- Lo spostamento, z , del pistone, monitorato tramite l'encoder del motore lineare;
- Lo spostamento del centro (TIP) della membrana, h , misurato tramite sensore laser CCD. Dato l'attuale layout, tuttavia, quest'ultima soluzione permette di controllare il CD-DEG solo durante la deformazione dello stesso verso l'alto.

Controllore

Un sistema real-time (Performance real-time target machine SpeedGoat®) che esegue i comandi dell'ambiente software MatLab® xPC Target® è utilizzato per controllare il movimento del pistone e lo stato di attivazione elettrica del DEG. Tale sistema permette di ottenere profili arbitrari di spostamento, z , del pistone e voltaggio, V_d , del CD-DEG, che possono essere generati via software sulla base delle misure rilevate e dei modelli dinamici accoppiati con l'hardware (ovvero, il modello della colonna d'acqua oscillante).

In termini di variabili elettriche, lo stato di attivazione del CD-DEG può essere descritto istantaneamente facendo riferimento alle variabili carica (Q_d) e voltaggio (V_d) ai capi del DEG. I cicli di controllo di un DEG possono essere convenientemente rappresentati su un piano Q_d - V_d , nel quale le rette passanti per l'origine degli assi (curve iso-capacitive) rappresentano le diverse configurazioni geometriche del DEG.

In riferimento ad un CD-DEG che lavora tra due posizioni date, una a capacità minima ($h=0$) ed una a capacità massima (che dipende dalla massima altezza raggiunta dal tip nel ciclo in esame), la massima energia convertibile in un ciclo è limitata dalla condizione di break-down dielettrico del materiale [14]. Quest'ultima pone un limite superiore al massimo campo elettrico presente nel materiale (che, nel caso del CD-DEG, è il campo elettrico in corrispondenza del TIP [7]).

In Figura 7, la condizione di break-down è rappresentata dalla curva blu a tratto continuo e il ciclo O-A-B-O rappresenta il ciclo di massima energia per un DEG operante in un range di deformazione noto; l'area evidenziata è numericamente proporzionale all'energia convertita. Per convertire la massima energia, è richiesto quindi che 1) il DEG venga caricato istantaneamente quando si trova nella configurazione di massima capacità (trasformazione O-A); 2) il generatore venga mantenuto in una condizione di marginalità rispetto alla condizione di break-down mentre la sua capacità diminuisce (trasformazione A-B); 3) il CD-DEG venga istantaneamente scaricato quando la sua capacità raggiunge il valore minimo (trasformazione B-O); 4) il DEG sia scarico durante la successiva fase in cui, per effetto della deformazione dovuta alle forze

esterne, la sua capacità viene riportata al valore massimo. Il passaggio 2) è però piuttosto difficile da realizzare in pratica. Tuttavia, collegando il CD-DEG in parallelo ad un condensatore C_2 , mantenendo una carica costante, Q_t , sul parallelo C_2-C_d durante tutta la fase di attivazione elettrica del DEG, la carica ai capi dello stesso risulta istantaneamente legata al voltaggio dalla seguente relazione lineare [13]:

$$V_d = C_2^{-1}(Q_t - Q_d). \quad (1)$$

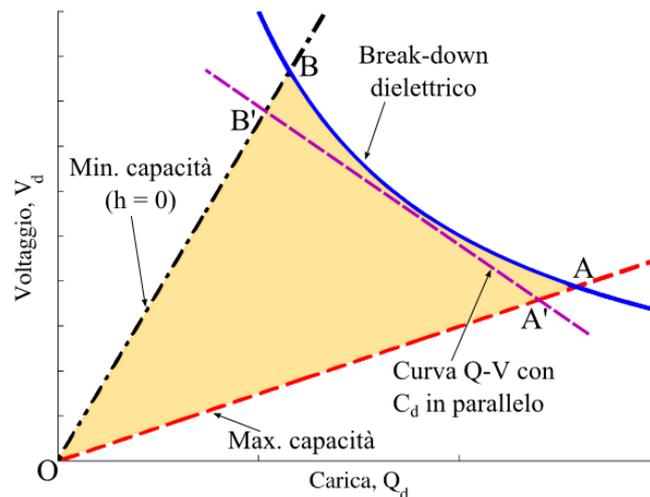


Figura 7. Ciclo di controllo ottimale per un DEG (O-A-B-O) e ciclo subottimo (O-A'-B'-O) realizzato controllando il parallelo C_2-C_d a carica costante.

In Figura 7 è mostrato come, con un'opportuna scelta del valore di C_2 , sia possibile realizzare un ciclo di controllo O-A'-B'-O che ben approssima quello ad massima energia.

Alla luce di tale risultato, il controllo del CD-DEG è stato implementato secondo la seguente logica:

- 1) Il parallelo C_2-C_d è istantaneamente caricato (con carica Q_t) quando il CD-DEG è massimamente espanso (ovvero quando la sua capacità è massima);
- 2) Il parallelo viene disconnesso dal power supply durante la fase di ritorno del DEG verso la configurazione $h = 0$;
- 3) Quando il CD-DEG raggiunge la configurazione piatta ($h = 0$), il parallelo C_2-C_d viene istantaneamente scaricato sul carico;
- 4) Durante la successiva fase di espansione del DEG, il sistema non è attivo elettricamente.

Il passaggio dallo stato 4) allo stato 1) richiede che venga individuato l'istante in cui il CD-DEG raggiunge la massima capacità. Tale massimo è, in generale, diverso ad ogni ciclo, e dipende dall'entità della forzante (un CD-DEG operante come PTO di un'OWC, ad es., raggiunge una capacità massima diversa di ciclo in ciclo se soggetto ad onde irregolari).

La condizione di massima espansione può essere stimata monitorando la derivata di una delle variabili di controllo (p , z o h). A meno di sfasamenti di piccola entità, il massimo e il minimo di ciascuna delle tre variabili corrispondono col massimo della capacità raggiunta dal DEG (rispettivamente per deformazioni del DEG verso l'alto e verso il basso). Analogamente, la condizione 3) di scarica del CD-DEG viene verificata sullo zero di una delle variabili di controllo.

Il triggering tra gli stati 1)-2) e 3)-4) è realizzato in un tempo fisso molto piccolo rispetto ai tempi caratteristici della dinamica (0.01 s) ma sufficiente a garantire la completa carica/scarica del CD-DEG in tutte le condizioni di test.

E' opportuno evidenziare che l'ottimalità dei cicli di conversione descritti e mostrati in Figura 7 è tale solo alla luce delle condizioni al contorno, ovvero una volta fissata la capacità massima (cioè la deformazione massima) raggiunta dal DEG nel ciclo in esame. In un impianto in cui il CD-DEG è accoppiato dinamicamente con un sistema oscillante, il valore massimo di capacità raggiunta dipende, a sua volta, dalla dinamica accoppiata del sistema dinamico + DEG. L'ottimizzazione della potenza prodotta da un tale sistema richiede

perciò considerazioni più approfondite e strategie di controllo più complesse che tirino in ballo l'evoluzione temporale del sistema, eventualmente includendo elementi di predizione [15]. La legge di controllo qui proposta, che è ottima solo dal punto di vista del DEG (al di fuori del contesto dinamico in cui esso opera), ha il vantaggio di essere facilmente implementabile e di non richiedere predizioni della storia futura del sistema. Investigare la sua efficacia in accoppiamento con WEC oscillanti è perciò interessante nell'ottica di semplificazione delle strategie e dei sistemi di controllo dei WEC stessi.

2.2 Test sperimentali ed analisi dei risultati

In questa sezione verrà descritta l'architettura del simulatore HIL sviluppato per i test. Successivamente saranno presentati i risultati ottenuti integrando un modello idrodinamico semplificato e il setup hardware descritto. Verranno presentati risultati relativi sia a stati di mare monocromatici (onde regolari) che pancromatici (onde irregolari), allo scopo di dimostrare l'efficacia del controllore nei diversi scenari.

Architettura del simulatore HIL

Il simulatore HIL è stato implementato secondo la struttura logica di Figura 8(a): il modello Simulink della dinamica dell'OWC fornito dall'Università di Bologna [16], basato sulla teoria delle onde lineari e sul moto potenziale, è utilizzato per calcolare la posizione istantanea del pelo libero dell'acqua all'interno del collettore, z , e inviare conseguentemente il comando di posizione al pistone del sistema hardware (foto in Figura 8(b)). La misura del sensore di pressione viene inviata in tempo reale al modello software, così da chiudere il loop. Il controllore del CD-DEG gestisce l'attivazione elettrica (secondo la logica descritta) sulla base delle variabili di controllo misurate dai sensori.

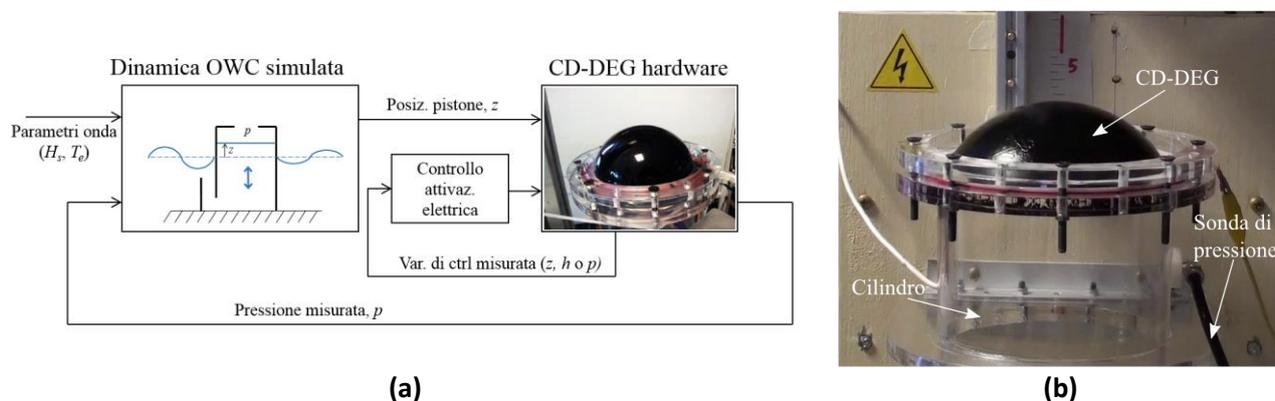


Figura 8. (a) schema di flusso del simulatore HIL; (b) particolare hardware del CD-DEG e della camera d'aria.

Scalabilità dei sistemi accoppiati WEC + DEG

Dal punto di vista funzionale, i PTO basati su DEG possono essere facilmente scalati e testati a frequenze diverse poiché il loro principio di funzionamento e la loro efficienza sono teoricamente indipendenti dalla frequenza di lavoro.

E' noto che, quando si studia la dinamica di un WEC in scala ridotta è necessario applicare una opportuna scalatura delle grandezze fisiche in gioco che prende il nome di similitudine/scalatura di Froude [17]. Questo tipo di similitudine impone la conservazione delle accelerazioni richiesta dal fatto che l'accelerazione di gravità è invariante rispetto al fattore scala. Quindi, per lo studio di un PTO polimerico in scala, occorre tener conto di una opportuna procedura di scalatura delle dimensioni del DEG, che rispetti la logica di similitudine di Froude. In particolare, si nota come non è possibile applicare una scalatura geometrica/dimensionale diretta. La forza fornita dal DEG è legata infatti ai parametri costitutivi elettro-elastici del materiale, che non sono dipendenti dalla scala.

Tale incongruenza può essere parzialmente compensata utilizzando, nel CD-DEG in piccola scala, uno spessore diverso dal semplice spessore full-scale scalato. Tuttavia è necessario tenere ulteriormente conto

di questa incoerenza andando a correggere con un fattore correttivo opportuno il valore di pressione letto dal sensore e inserito come input nel modello idrodinamico software. Conseguentemente, anche la stima della potenza prodotta dal PTO (in scala ridotta) non sarà direttamente correlabile a quella prodotta in full-scale tramite il semplice scaling di Froude ma dovrà considerare un opportuno fattore di scala.

Risultati sperimentali

Di seguito si analizzano i risultati di alcuni test selezionati. In tutte le prove qui presentate è stata utilizzata la posizione z del pistone come variabile di controllo del CD-DEG. Nello specifico, il DEG è caricato quando z raggiunge un massimo/minimo e scaricato quando $z = 0$.

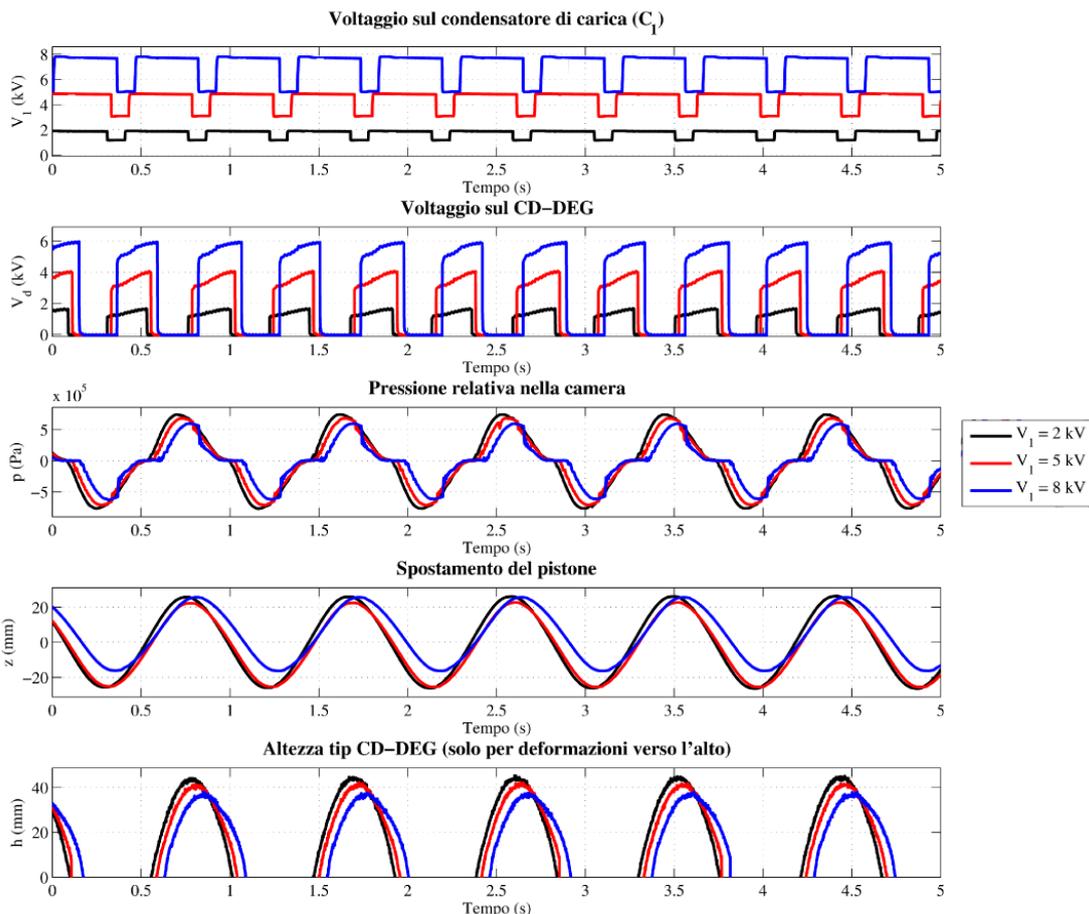


Figura 9. Profili temporali delle principali grandezze misurate (V_c , V_d , p , z ed h) ottenuti con un'onda regolare ($T = 0.91$ s e $H = 3.2$ cm) e per tre diversi valori del voltaggio V_1 imposto. I dati relativi all'altezza del tip, h (lettura del sensore CCD), sono relativi alle sole fasi in cui la membrana è espansa verso l'alto.

Test con onde regolari

In Figura 9 si riportano le timeseries relative ai dati acquisiti in una serie di test in cui il modello idrodinamico è stato eccitato con onde (simulate) regolari (monocromatiche).

L'onda presa in considerazione ha un periodo $T = 0.91$ s e un'altezza $H = 3.2$ cm, che corrispondono all'incirca a onde di $T = 2$ s e $H = 16$ cm, tipiche per il sito di Reggio Calabria (rispetto al quale il prototipo di PTO ha scala 1:5) e onde di $T = 6.5$ s e $H = 1.6$ m in scala reale (rispetto a cui il prototipo ha scala 1:50).

I dati fanno riferimento a 3 serie di test distinte, nelle quali il condensatore C_1 è caricato con voltaggi V_1 diversi (rispettivamente 2, 5 e 8 kV). In riferimento a quanto enunciato nel paragrafo 2.1 sul controllo e all'equazione (1), l'uso di valori diversi di V_1 dà origine a valori diversi della carica totale Q_1 presente sul

parallelo C_2-C_d . La variazione di V_1 nelle varie prove è perciò responsabile di una traslazione della retta che lega Q_d e V_d (vedere equazione (1)) durante la fase di deformazione del DEG, come chiarito in Figura 10(a). Dalla Figura 9 si evince che il voltaggio V_1 sul capacitore di carica è, in buona misura, costante a tratti: questo dimostra che C_1 è grande abbastanza da non risentire dell'effetto di scarica indotto dal parallelo C_2-C_d .

I profili di V_d mostrano che il voltaggio ai capi del CD-DEG cresce monotonamente durante le fasi di attivazione (ovvero mentre la capacità diminuisce), ciò dimostra che sta avvenendo una effettiva generazione di energia elettrica.

I profili di spostamento del pistone, z , e spostamento del tip, h (relativo alle sole fasi di espansione verso l'alto), risultano quasi perfettamente in fase: anche questo è un risultato atteso data la scarsa influenza, a questa scala, della dinamica propria del DEG.

Osservando le principali variabili dinamiche in gioco (p e z) si osservano differenze percettibili nei tre diversi casi. Ciò dimostra che l'attivazione elettrica (e la sua entità) è in grado di influenzare in maniera rilevante la dinamica del sistema (e quindi di estrarre energia dal sistema).

Si nota ad esempio che, all'aumentare del livello di voltaggio, l'ampiezza di oscillazione del pelo libero (moto del pistone) si riduce, a testimonianza del fatto che il moto della colonna d'acqua risulta maggiormente smorzato. Le diverse attivazioni elettriche sono anche responsabili di una variazione di fasatura delle variabili dinamiche (e, conseguentemente, dei comandi di attivazione elettrica).

Dai profili temporali di pressione relativa in camera si osserva che l'attivazione elettrica è responsabile di una sensibile diminuzione di pressione nella camera, che è tanto maggiore quanto maggiore è il voltaggio utilizzato. Tale caduta di pressione indica che il lavoro meccanico assorbito dal pistone durante la fase di decompressione della camera è minore di quello fornito durante la fase di gonfiaggio del CD-DEG, e la differenza è tanto maggiore quanto maggiore è il voltaggio imposto. Nel range di voltaggi considerati, evidentemente, l'energia convertita è tanto maggiore quanto maggiore è il voltaggio imposto.

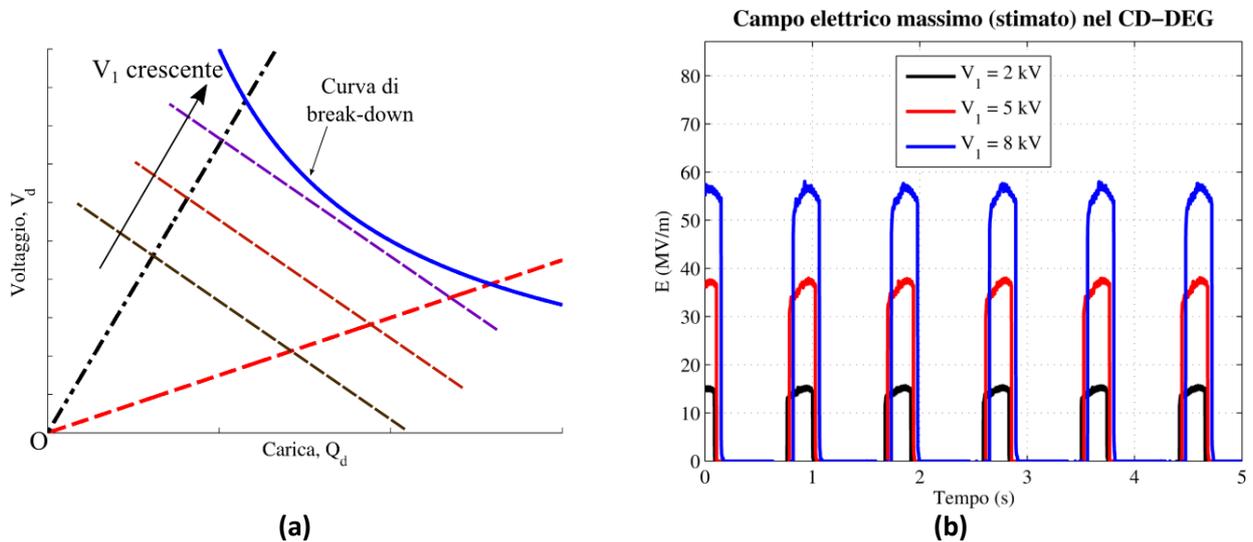


Figura 10. (a) Effetto dell'aumento di V_1 sui cicli di controllo del DEG; (b) Stima del campo elettrico al tip del CD-DEG ottenuta dai valori misurati di V_d e dalla stima dello spessore al tip per il caso di onde regolari. I dati sono relativi alla sola fase in cui $h > 0$ a causa dei limiti dell'apparecchiatura.

In Figura 10(b) è presentata una stima del campo elettrico massimo nel CD-DEG, ottenuta a partire dai valori misurati di V_d e di h (la stima è relativa alle sole fasi in cui h è positiva).

E' noto che il campo elettrico massimo del CD-DEG viene raggiunto al tip della membrana [7-8] ed è pari a

$$E = \frac{V_d}{t} \tag{2}$$

ove t , spessore della membrana al tip, può essere stimato dal valore misurato di h :

$$t = \frac{e^2 e_0^2}{(h^2 + e^2)^2} t_0 \quad (3)$$

ove t_0 è lo spessore del CD-DEG indeformato (prima che la membrana venga pre-tirata e montata sul frame), e è il diametro della membrana nella configurazione pre-caricata ed e_0 quello prima del pre-carico. Il grafico di Figura 10(b) mostra come, con l'introduzione della capacità ausiliaria C_2 in parallelo, il campo elettrico nel CD-DEG sia mantenuto circa costante a tratti (anche se il massimo è in realtà raggiunto ad un istante intermedio della fase di deformazione, come previsto dal modello teorico di Figura 7) con un valore massimo raggiunto (nella prova a voltaggio maggiore) di circa 60 MV/m (ovvero, prossimo al valore di rottura dielettrica stimato per l'acrilico VHB [18]).

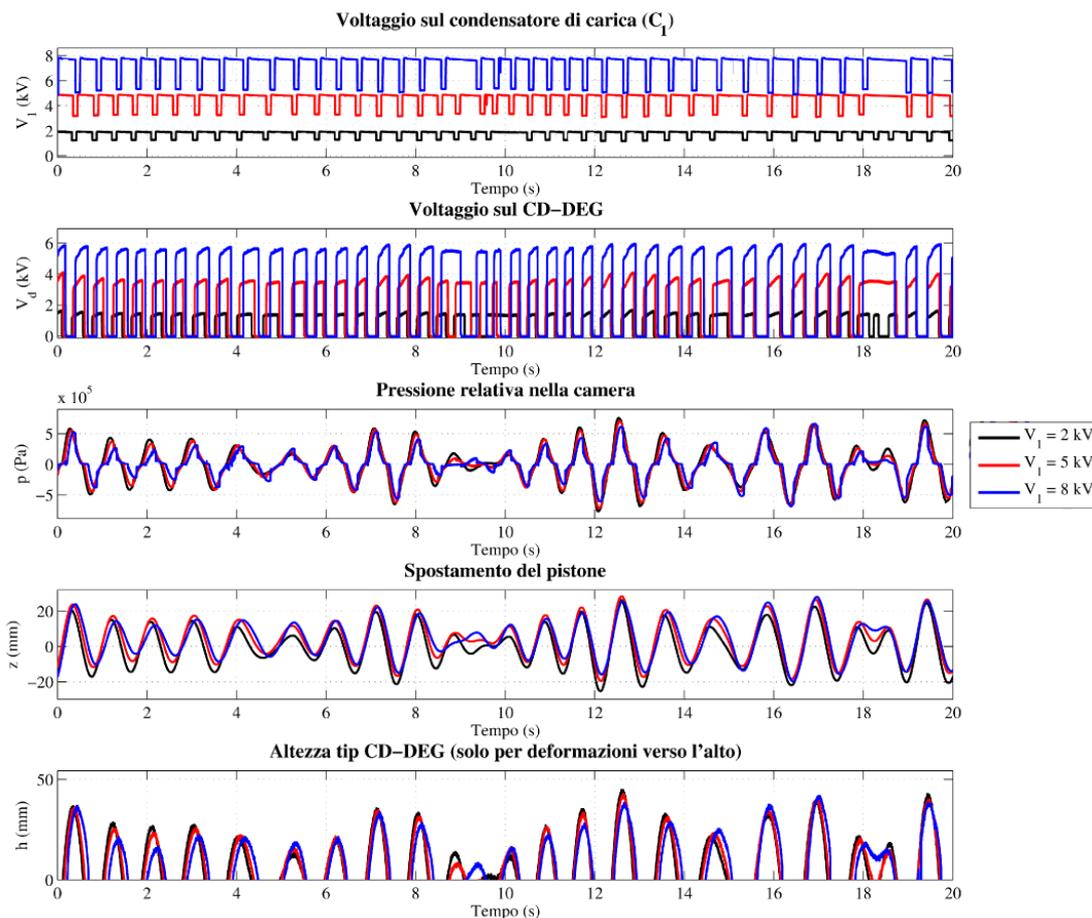


Figura 11. Profili temporali delle principali grandezze misurate (V_1 , V_d , p , z ed h) ottenuti con un'onda irregolare ($T_e = 0.91$ s e $H_s = 4.55$ cm) e per tre diversi valori del voltaggio V_1 imposto. I dati relativi all'altezza del tip, h (lettura del sensore CCD), sono relativi alle sole fasi in cui la membrana è espansa verso l'alto.

Test con onde regolari

In Figura 11 sono presentate le timeseries relative a 20 s di test con onde simulate irregolari. Nell'idrodinamica simulata, la colonna d'acqua è eccitata con onde aventi periodo energetico $T_e = 0.91$ s e altezza significativa $H_s = 4.55$ cm (ovvero, $T_e = 2$ s e $H_s = 23$ cm nella scala del ReWEC di Reggio Calabria, $T_e = 6.5$ s e $H_s = 2.3$ m in scala reale) generate secondo uno spettro di Bretschneider [19]. L'onda irregolare così generata trasporta la stessa potenza (per unità di lunghezza del fronte) dell'onda monocromatica precedentemente considerata. I test mostrati fanno riferimento agli stessi valori del voltaggio di alimentazione, V_1 , del caso monocromatico.

I dati dimostrano che, anche in presenza di onde irregolari, il controllore è in grado di gestire i comandi di attivazione e disattivazione del CD-DEG con la giusta sincronia (ovvero, il DEG risulta elettricamente attivo durante le fasi di decrescita della propria capacità).

Rispetto allo scenario con onde regolari, l'utilizzo di voltaggi di attivazione V_I differenti dà luogo a differenze ancor più visibili nella dinamica del sistema, soprattutto in corrispondenza dei treni di onde con ampiezza minore. In un intorno dell'istante 18 s, ad esempio, si nota che la diversa dinamica generata dai diversi livelli di attivazione elettrica ha dato luogo ad un diverso numero di cicli di attivazione (ovvero, ad un diverso numero di oscillazioni del pelo libero).

È possibile inoltre osservare che, in presenza di treni d'onda di piccola ampiezza (si vedano gli istanti intorno a 10 s), la risposta del CD-DEG (ad es., il profilo di spostamento del tip, h) diventa piuttosto rumorosa. Ciò si traduce in un'operazione non corretta del DEG: osservando la timeseries di V_d si nota che, in questi casi, il voltaggio non ha un trend strettamente crescente durante la fase di attivazione. L'indicazione che se ne ricava è che non conviene attivare il CD-DEG ad ogni ciclo, ma solo in quei cicli nei quali la deformazione supera una certa soglia, consentendo la corretta operazione del dispositivo.

In Figura 11 è riportata la stima dei valori di campo elettrico sul DEG (relativa alle sole fasi con $h > 0$) ottenuta con la procedura descritta sopra. I picchi nel campo elettrico si attestano sugli stessi valori ottenuti in caso monocromatico, poiché i livelli di deformazione della membrana sono comparabili.

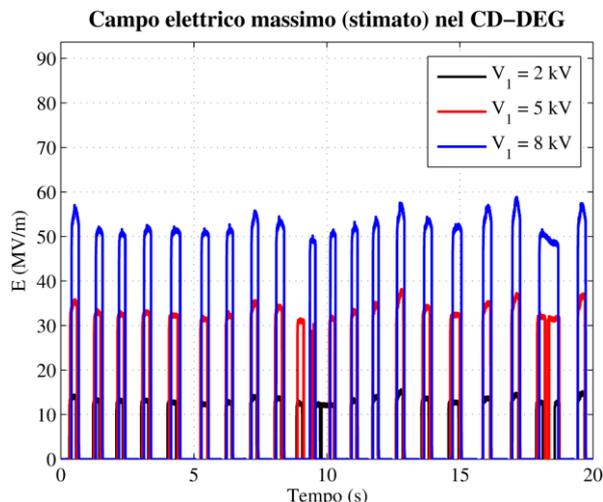


Figura 12. Stima del campo elettrico al tip del CD-DEG ottenuta dai valori misurati di V_d e dalla stima dello spessore al tip per il caso di onde irregolari. I dati sono relativi alla sola fase in cui $h > 0$ a causa dei limiti dell'apparecchiatura.

2.3 Dimensionamento del PTO a elastomero dielettrico per sistema ReWEC

Nell'ambito di un progetto ENEA parallelo al progetto qui presentato, l'Università di Bologna ha fornito delle specifiche dimensionali per un PTO elastomerico per adatto ad essere installato sul prototipo in scala 1:10 di ReWEC/3 installato presso il laboratorio NOEL di Reggio Calabria [16].

In questa sezione si discute l'ingegnerizzazione della soluzione proposta, con particolare riferimento al sistema elettronico di controllo del PTO.

Il dimensionamento proposto in [16] è stato effettuato sulla base di un modello accoppiato OWC + DEG basato su un modello semplificato di idrodinamica potenziale (analogo a quello integrato nei test HIL qui descritti) e un modello analitico di CD-DEG.

È stato stimato che, utilizzando 4 CD-DEG con le caratteristiche riportate in Tabella 1(a) montati sulla sommità del prototipo ReWEC, è possibile ottenere gli output di potenza riassunti in Tabella 1(b) per stati di mare caratteristici del sito di Reggio Calabria.

Si osserva innanzitutto che, in [16] e in Tabella 1 è stato considerato un polimero siliconico, anziché l'acrilico VHB utilizzato nei test sperimentali qui presentati. La scelta non comporta tuttavia differenze sostanziali rispetto a quanto osservato nei test, né in termini di principio, né in termini di risultati

qualitativi. I polimeri siliconici presentano infatti caratteristiche elastiche paragonabili a quelle degli acrilici (rigidezza dello stesso ordine) e caratteristiche dielettriche non inferiori.

			T_p (s)																																	
			1.8	2.2	2.4	3																														
Pre-stretch	λ_p	3.5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>H_s (m)</th> <th>1.8</th> <th>2.2</th> <th>2.4</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.2</td> <td>135</td> <td>158</td> <td>168</td> <td>155</td> </tr> <tr> <td>0.3</td> <td>303</td> <td>306</td> <td>296</td> <td>264</td> </tr> <tr> <td>0.4</td> <td>502</td> <td>451</td> <td>445</td> <td>376</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>699</td> <td>574</td> <td>523</td> <td>501</td> </tr> <tr> <td>0.6</td> <td>831</td> <td>677</td> <td>641</td> <td>588</td> </tr> </tbody> </table>				H_s (m)	1.8	2.2	2.4	3	0.2	135	158	168	155	0.3	303	306	296	264	0.4	502	451	445	376	0.5	699	574	523	501	0.6	831	677	641	588
H_s (m)	1.8	2.2					2.4	3																												
0.2	135	158					168	155																												
0.3	303	306					296	264																												
0.4	502	451					445	376																												
0.5	699	574					523	501																												
0.6	831	677					641	588																												
Raggio (config. Indeformata)	e_0	0.11 m																																		
Raggio (config. stretchata)	e	0.4 m																																		
Spessore (config. indeformata)	t_0	2.45 cm																																		
Spessore (config. stretchata)	t_s	2 mm																																		
Campo elettr. di break-down	E_{BD}	100 MV/m																																		
Costante dielettrica relativa	ϵ_r	7																																		
(a)			Matrice di Potenza (W) (b)																																	

Tabella 1. (a) Specifiche dei CD-DEG dimensionati per l'impianto ReWEC di Reggio Calabria; (b) Matrice di potenza stimata per il sistema ReWEC + PTO polimerico [16].

L'impiego del VHB è appropriato per test di laboratorio in piccola scala, grazie alle proprietà adesive che consentono una semplice installazione dello stesso sui setup. Al di fuori della scala di laboratorio, risulta tuttavia preferibile l'impiego di un DE con minori perdite viscosive.

Escludendo l'acrilico dai potenziali materiali candidati per i test in media scala, i possibili DE candidati risultano la gomma (naturale o sintetica) e, appunto, i siliconi. La prima è però da escludersi data la sua eccessiva rigidezza che, in particolare in piccola scala, darebbe luogo a PTO eccessivamente rigidi, non sufficientemente deformabili dall'azione forzante delle onde.

Apparentemente, i polimeri siliconici risultano perciò il miglior compromesso, almeno nella scala di test 1:10. Il processo di manifattura relativamente semplice delle membrane siliconiche, inoltre, permette di ottenere materiali con caratteristiche dielettriche variabili in un ampio range, con proprietà meccaniche circa costanti.

Come precisato in [16], la matrice di potenza di Tabella 1(b) è stata calcolata assumendo un controllore ideale, in grado di effettuare cicli di controllo complessi come quelli descritti in Figura 7.

In base a quanto dedotto nella trattazione al paragrafo 2.1, la semplice architettura elettronica di Figura 5 è in grado di replicare un controllo del tutto simile a quello ideale, con una riduzione dell'energia prodotta per ciclo minimale. Ciò tuttavia richiede il corretto dimensionamento della capacità C_2 da porre in parallelo al CD-DEG.

Considerando che il PTO in esame consta di 4 CD-DEG distinti, l'architettura elettronica di controllo può essere qui implementata seguendo 2 schemi alternativi:

- I 4 DEG possono essere connessi in parallelo e controllati mediante un unico circuito elettronico;
- I CD-DEG distinti possono essere equipaggiati con circuiti diversi e controllori indipendenti.

La prima soluzione offre il vantaggio di una maggior semplicità dal punto di vista architettonico e permette di ridurre il numero di componenti in gioco. Con tale architettura, la capacità ausiliaria C_2 può essere implementata mediante un unico capacitore/batteria di capacitori in parallelo. D'altra parte, gestire i singoli CD-DEG separatamente permette di ottenere maggior controllabilità (per es., eventuali sfasamenti nella deformazione dei CD-DEG indotti da inomogeneità della pressione in camera potrebbero essere gestiti attivando i DEG a istanti diversi) e, eventualmente, di parzializzare l'attivazione.

In riferimento al dimensionamento e alla strategia di controllo ideale utilizzata in [16], in Figura 13 si riporta il ciclo di controllo ideale dei CD-DEG impiegati nel caso studio in esame.

Le variabili carica, voltaggio e capacità (Q , V , C) sono state espresse in forma adimensionale (Q^* , V^* , C^*) utilizzando le seguenti equazioni:

$$Q^* = \frac{Q}{\pi \epsilon \epsilon_0 E_{BD}} \quad ; \quad V^* = \frac{V}{E_{BD} t_0} \quad ; \quad C^* = \frac{Q^*}{V^*} = \frac{C}{\pi \epsilon \epsilon_0 / t_0}, \quad (4)$$

ove E_{BD} è il campo elettrico di break-down del materiale (assunto, in questo caso, costante).

Tali adimensionalizzazioni permettono di leggere i cicli di controllo indipendentemente dalla specifica architettura considerata (ad es., numero di layer connessi in parallelo in cui lo spessore complessivo del CD-DEG viene ripartito) e sono pertanto funzionali ad analisi parametriche finalizzate al dimensionamento dei componenti.

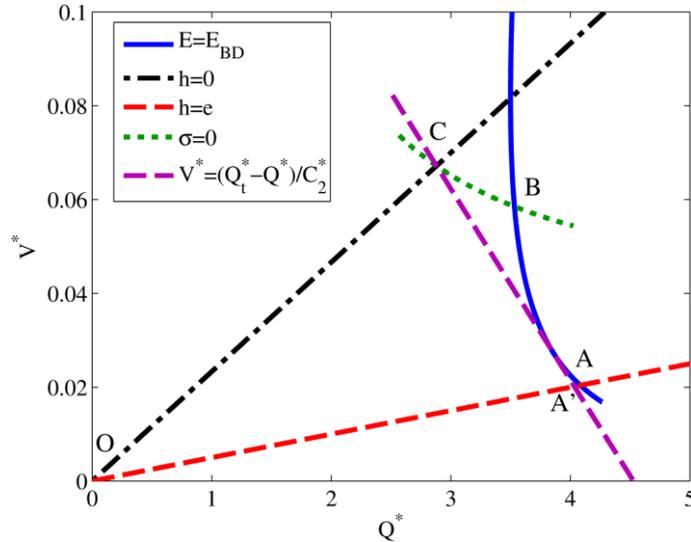


Figura 13. Ciclo di controllo ideale (O-A-B-C-O) e ciclo di controllo sub-ottimo (O-A'-C-O) dei CD-DEG in esame. Le variabili carica e voltaggio sono espresse in forma adimensionale.

Il ciclo di Figura 13 (O-A-B-C-O) si riferisce a deformazioni che avvengono tra le 2 configurazioni estreme $h = 0$ ed $|h| = e$, ove h è l'altezza del tip del CD-DEG ed e è il raggio interno del frame su cui il DEG è montato (corrispondente col raggio del CD-DEG nella configurazione piana, $h = 0$). Tali condizioni rappresentano gli estremi di deformazione ammissibile per il CD-DEG [8]. Oltre alla trasformazione A-B, corrispondente con una condizione di marginalità rispetto al break-down elettrico, il ciclo include una trasformazione B-C, durante la quale il DEG è idealmente controllato in maniera tale da evitare che le membrane polimeriche, a causa degli elevati stress legati alla presenza del campo elettrico, perdano tensione meccanica (σ).

Utilizzando un condensatore in parallelo al DEG e controllando il parallelo delle due capacità con carica costante, è possibile realizzare un ciclo che ben approssima quello ideale. In Figura 13, il ciclo O-A'-C-O è stato identificato ottimizzando il valore della capacità C_2^* (adimensionalizzata) in maniera tale da massimizzare l'area del ciclo stesso (proporzionale all'energia convertita) pur rispettano i vincoli menzionati sopra.

Il ciclo adimensionale di Figura 13 costituisce un utile strumento per il dimensionamento dell'impianto elettrico del PTO polimerico.

La prima scelta progettuale da effettuare consiste nella definizione del numero di layer (connessi in parallelo), n , presenti in ciascun CD-DEG. Quest'ultimo può essere infatti costruito connettendo in parallelo diversi strati di DE sovrapposti, ciascuno con la propria coppia di elettrodi. La scelta del numero di layer influenza il valore del massimo voltaggio operativo.

Fissato n , il voltaggio sul CD-DEG è legato al voltaggio adimensionale, V^* , dalla seguente relazione:

$$V_d = E_{BD} \frac{t_0}{n} V^* \quad (5)$$

Il numero di strati può essere fissato scegliendo un limite superiore per il massimo voltaggio del ciclo (corrispondente al punto C in Figura 13). Nello specifico, impiegando 7 strati in ciascun DEG, il massimo voltaggio è circa 23 kV.

Ciascuno strato avrebbe di conseguenza uno spessore a riposo (prima del pre-tiraggio) di 3.5 mm.

Alla luce di questa assunzione, è possibile procedere al dimensionamento delle capacità ausiliarie C_2 .

Assumendo preliminarmente che ciascun CD-DEG sia equipaggiato con il proprio circuito autonomo, la capacità equivalente da collegare in parallelo a ciascun CD-DEG vale

$$C_2 = \frac{n^2 \pi \epsilon \epsilon_0}{t_0} C_2^* \approx 140 \text{ nF}, \quad (6)$$

Corrispondente ad una capacità ausiliaria totale di 560 nF qualora i 4 DEG siano collegati in parallelo in un unico circuito di controllo.

Con le suddette scelte dei parametri di progetto, è possibile pertanto ottenere all'atto pratico un PTO con prestazioni paragonabili a quelle descritte in [16] e in Tabella 1.

Connessione alla rete e architettura elettrica nel caso full-scale

In riferimento al caso full-scale, l'architettura elettrica a valle del DEG per la distribuzione dell'energia generata alla rete presenta necessariamente delle differenze rispetto al caso in cui il PTO sia una turbina.

In Figura 14(a) e Figura 14(b) sono riportati due schemi approssimativi di architettura elettrica per i casi con turbina e CD-DEG rispettivamente. Mentre nel caso con turbina si richiedono un generatore elettromagnetico (ad es., generatore a induzione), un convertitore di frequenza (che implica una doppia trasformazione CA/CC) e un trasformatore, nel caso del DEG è richiesto un inverter (per la conversione CC/AC) e, eventualmente, un trasformatore.

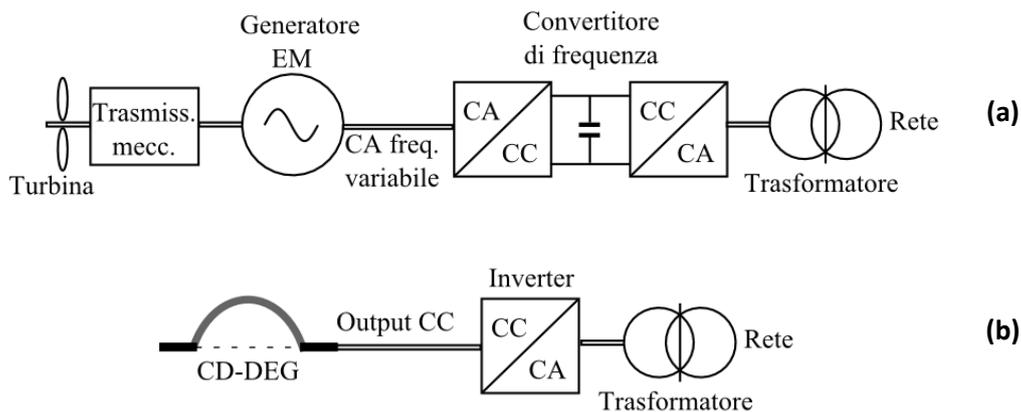


Figura 14. Schemi elettrici del collegamento tra OWC e rete: (a) caso con turbina (b) caso con CD-DEG.

L'output del DEG è energia elettrica in CC ad alto voltaggio. Come detto, a parità di campo elettrico massimo presente sul DEG (settato dalla condizione di break-down), il voltaggio di uscita può essere settato scegliendo opportunamente il numero di strati della struttura a stack che costituisce il CD-DEG. Il numero di layer di progetto costituisce un compromesso tra voltaggi eccessivi (che si otterrebbero dividendo il volume di polimero in pochi strati) ed eccessivo numero di layer. Eccessivi voltaggi sono da evitare a causa dell'alto costo dei componenti elettronici coinvolti (cavi, switch, ecc.), l'eccessivo numero di strati richiede d'altra parte un numero molto grande di connessioni elettriche e costi elevati di fabbricazione.

L'elevato voltaggio di uscita, da un lato, rappresenta una potenziale criticità, dato il maggior costo dei cavi e l'eventuale necessità di ricorrere a componenti elettronici custom; i DEG accoppiano infatti voltaggi piuttosto elevati a correnti relativamente ridotte: queste peculiari specifiche faticano a conciliarsi con la componentistica commerciale più comune, destinata ad altri impieghi. Dall'altro lato, l'elevato voltaggio in uscita permette di ridurre le dimensioni del trasformatore di connessione alla rete (o addirittura di eliminarlo).

Risulta importante sottolineare che, la realizzazione tecnica di un prototipo di DEG avente le specifiche dimensionali illustrate, comporterebbe uno sforzo tecnologico relativamente contenuto. Infatti, membrane di elastomero di dimensione inferiore ai 2mx2m sono facilmente reperibili sul mercato, così come i

principali componenti elettronici (di potenza e sensorizzazione) che costituiscono l'elettronica di controllo. Inoltre le modifiche richieste al collettore ReWEC per l'installazione de PTO innovativo consisterebbero in comuni lavorazioni di carpenteria metallica.

3 Conclusioni

Il presente report presenta le attività di collaborazione tra ENEA e l'Istituto TeCip della Scuola Sant'Anna di Pisa. In particolare, i risultati di una serie di test "dry-run" effettuati su un prototipo da laboratorio in piccola scala di Power Take-Off (PTO) polimerico per convertitori di energia dalle onde (WEC) sono descritti. Il caso studio analizzato riguarda il prototipo ReWEC, sviluppato presso l'Università di Reggio Calabria.

ReWEC è un dispositivo di tipo Oscillating Water Column (OWC), già installato e testato in mare in scala 1:10 presso il laboratorio naturale NOEL dell'Università di Reggio Calabria, e in scala 1:1 presso il porto di Civitavecchia. Attualmente il sistema è progettato per montare un turbina ad aria come PTO.

Nell'ambito del presente lavoro, è stato allestito un setup per il test di un PTO alternativo (in scala) per il sistema ReWEC basato su elastomeri dielettrici (DE). La tecnologia dei DE appare promettente nel settore delle energie rinnovabili marine, poiché potrebbe aprire la strada ad architetture di generatori semplificate e a basso costo, adatte ad operare nelle peculiari condizioni dell'ambiente marino.

Il nuovo PTO consiste in uno stack di membrane polimeriche dielettriche rivestite da elettrodi, assemblate a formare un'unità deformabile compatta, che sfrutta le variazioni di capacità elettrica per convertire l'energia meccanica raccolta in energia elettrica. Il dispositivo, denominato Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator (CD-DEG), è pensato per essere montato sulla parete superiore della camera d'aria di ReWEC al posto della turbina, e sfrutta le deformazioni indotte dalle fluttuazioni di pressione per abilitare il meccanismo di trasduzione.

E' stato costruito un prototipo in piccola scala di CD-DEG (indicativamente 1:5 rispetto al prototipo ReWEC di Reggio Calabria, 1:50 rispetto a quello di Civitavecchia), che è stato installato su un banco prova disponibile presso l'Istituto TeCIP. Il banco prova consta di una camera d'aria cilindrica e di un pistone avente lo scopo di replicare la superficie del pelo libero della colonna d'acqua dell'OWC.

Il test-bench è stato opportunamente sensorizzato ed equipaggiato al fine di effettuare test di tipo Hardware-in-the-Loop (HIL), nei quali la dinamica dell'OWC è emulata via software utilizzando i dati provenienti dal prototipo hardware di PTO. Il sistema fisico è a sua volta controllato sulla base della posizione stimata del pelo libero dell'acqua nel modello dinamico software.

I test HIL sono stati utilizzati per testare un controllore di CD-DEG, la cui risposta fa uso dei dati real-time misurati dai sensori, senza utilizzare ulteriori predizioni o stime dello stato futuro del sistema.

I risultati sperimentali hanno evidenziato l'efficacia del PTO (che si è effettivamente dimostrato in grado di generare energia elettrica) e del controllore, sia in presenza di forzanti regolari (monocromatiche) che irregolari (pancromatiche). Sulla base delle indicazioni dedotte dai test HIL e delle simulazioni effettuate dall'Università di Bologna, sono state dedotte delle specifiche di massima per l'architettura elettrica di un PTO elastomerico per il prototipo ReWEC 1:10 di Reggio Calabria.

I principali risultati ottenuti dal presente studio possono essere riassunti come segue:

- E' stata sviluppatO un efficace test-bench per l'implementazione di un sistema HIL per la simulazione di un PTO ad elastomero dielettrico per OWC;
- I test svolti, utilizzando tale sistema, hanno confermato la possibilità di implementare algoritmi di controllo per OWC basati su DEG in condizioni di regimi monocromatici e pancromatici basati sulla lettura della variabili di pressione, altezza della colonna d'acqua;
- I risultati delle simulazioni validati in test HIL, hanno permesso di verificare la fattibilità di una implementazione di un PTO basato su DEG per il ReWEC (installato presso l'Università di Reggio Calabria);
- Un dimensionamento preliminare del sistema DEG da installare presso il ReWEC è tale da consentire lo sviluppo di un prototipo a breve termine utilizzando (principalmente) componenti disponibili sul mercato.

I risultati e le considerazioni prodotte nell'ambito del presente lavoro aprono la strada ad una serie di possibili sviluppi futuri:

- Progetto di dettaglio e realizzazione del sistema DEG per ReWEC: sulla base delle indicazioni derivate dal dimensionamento qui presentato, è possibile procedere ad una più accurata progettazione e installazione di un CD-DEG sul prototipo ReWEC di Reggio Calabria. Dal punto di vista scientifico, una tale operazione sarebbe un unicum nel panorama dei DE.
- Realizzazione del controllore in scale reale: Riprogettando opportunamente il circuito di carica e controllo del CD-DEG, l'architettura HIL qui presentata può essere utilizzata per sperimentare diversi tipi di controllo, ad esempio controllori pensati per ottimizzare la dinamica dell'OWC sulla base di previsioni dell'onda incidente.
- Sviluppo di una campagna di test sul sistema su ReWEC esistente per valutare l'ulteriore scalatura con installazione full-scale di un CD-DEG su OWC sul prototipo di Civitavecchia.

4 Riferimenti bibliografici

1. F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen, "Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology". Elsevier. 2001.
2. S. Chiba, M. Waki, R. Kornbluh, R. Pelrine, "Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles". In The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego (USA), March 2008.
3. P. Jean, A. Wattez, G. Ardoise, C. Melis, R. Van Kessel, A. Fourmon, E. Barrabino, J. Heemskerk, J. Queau, "Standing wave tube electro active polymer wave energy converter," in Proc. of SPIE Vol 8340, (2012).
4. G. Moretti, G.P. Papini Rosati, M. Alves, M. Grases, R. Vertechy, M. Fontana, "Analysis and design of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter with Dielectric Elastomer Power Take-Off". In ASME 2015 34rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. Jhon's (Canada), June 2015.
5. G. Moretti, M. Fontana, R. Vertechy, "Model-Based Design and Optimization of a Dielectric Elastomer Power Take-Off for Oscillating Wave Surge Energy Converters". Meccanica, Springer. 2015.
6. A. Sarmento, L. Gato, A. Falcão, "Turbine-controlled wave energy absorption by oscillating water column devices". Ocean Engineering, 17(5), 481-497. 1990.
7. G. P. Papini Rosati, R. Vertechy, M. Fontana, "Dynamic model of Dielectric Elastomer Diaphragm Generators for Oscillating Water Column Wave Energy Converters". In Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Snowbird, Utah, USA, September 2013.
8. R. Vertechy, G.P. Rosati Papini, M. Fontana, "Reduced model and application of inflating Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generators for Wave Energy harvesting". Journal of Vibration and Acoustics, vol.137, no.1, 2015.
9. F. Arena, A. Romolo, V. Laface, G. Malara, A. Viviano, "Analisi di fattibilità di impianti di tipo REWEC3 (o U-OWC) per la produzione di energia elettrica da moto ondoso in aree campione lungo le coste italiane", Ricerca di Sistema Elettrico, 2012.
10. F. Arena, A. Romolo, G. Malara, A. Ascanelli, "On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: a case study". In ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes (FR), June 2013.
11. M. Righi, R. Vertechy, M. Fontana, "Experimental Characterization of a Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator", In Proceedings of the ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS2014), Newport (USA), September 2014.

- 12.G. Moretti, G.P. Papini Rosati, M. Fontana, R. Vertechy, "Hardware in the Loop simulation of a dielectric elastomer generator for oscillating water column wave energy converters", OCEANS'2015 MTS/IEEE Conference, Genova (IT), May 2015.
- 13.J. Huang, S. Shian, Z. Suo, D. Clarke, "Maximizing the Energy Density of Dielectric Elastomer Generators Using Equi-Biaxial Loading". Advanced Functional Materials, 23(40), 5056-5061, 2013.
- 14.S. Koh, C. Keplinger, T. Li., S. Bauer, Z. Suo, "Dielectric elastomer generators: How much energy can be converted?", Mechatronics, IEEE/ASME Transactions, 16(1), 33-41, 2011.
- 15.J. Falnes, "Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction". Cambridge university press, 2002.
- 16.R. Vertechy, "Studio di un sistema PTO per OWC del tipo REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi", Enea, Ricerca di Sistema Elettrico, 2015.
- 17.AA.VV., "Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems", Marine Renewable Energy Guides, EMEC, 2009.
- 18.G. Moretti, M. Fontana, R. Vertechy, "Modeling and control of lozenge-shaped dielectric elastomer generators". In ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Snowbird (USA), September 2013.
- 19.D. Carter, "Estimation of wave spectra from wave height and period", Institute of Oceanographic Sciences, Report no. 135, 1982.

5 Abbreviazioni ed acronimi

Per uniformità di notazione con la letteratura scientifica corrente, sono stati mantenuti gli acronimi inglesi comunemente impiegati e noti nel settore.

CD-DEG: Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator

DE: Dielectric Elastomer

DEG: Dielectric Elastomer Generator

HIL: Hardware-in-the-Loop

HV: High Voltage

OWC: Oscillating Water Column

PTO: Power Take-Off

WEC: Wave Energy Converter

Simboli matematici utilizzati:

V voltaggio

Q carica elettrica

C capacità elettrica

V^* voltaggio adimensionale

Q^* carica elettrica adimensionale

C^* capacità elettrica adimensionale

C_1 capacità del condensatore di carica del CD-DEG (v. Figura 5)

C_2 capacità del condensatore ausiliario, connesso in parallelo al CD-DEG (v. Figura 5)

C_d capacità (variabile) del CD-DEG.

V_1, V_2 voltaggi su C_1 e C_2 rispettivamente

V_d voltaggio ai capi del CD-DEG

Q_d carica sul CD-DEG

Q_t carica totale sul prallelo $C_d - C_2$

E campo elettrico al tip del CD-DEG

ϵ, ϵ_r costante dielettrica assoluta e relativa del DE

E_{BD} campo elettrico di break-down del DE

e_0, e raggio del CD-DEG in posizione piana, rispettivamente nella configurazione indeformata e pre-stretchata

t_0, t_s spessore totale del CD-DEG, rispettivamente nella configurazione indeformata e nella configurazione piana pre-stretchata

t spessore del CD-DEG al tip in una configurazione generica

h altezza del tip del CD-DEG

T, H periodo ed altezza d'onda (onde regolari)

T_p, H_s periodo di picco e altezza significativa (onde irregolari)