

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Elettrica**

Tesi di Laurea Magistrale

Generazione Elettrica da moto ondoso



Relatori

Prof. Michele Angelo Pastorelli

.....

Ing. Giovanni Bracco

.....

Candidato

Amedeo Biagio Garofalo

.....

A.A. 2018

INDICE

INDICE FIGURE	3
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 Energia da moto ondoso e tecnologia WEC	7
1.1.1 Energia rinnovabile.....	7
1.1.2 Energia da moto ondoso	7
1.1.3 Wave energy Converters	10
1.2 ISWEC	11
1.2.1 Storia del progetto	11
1.2.2 ISWEC in scala reale	13
2 GENERATORE ELETTRICO	15
2.1 Brushless Sinusoidale	15
2.1.1 Aspetti costruttivi	15
2.1.2 Modello generale	17
2.2 Controllo del Brushless Sinusoidale	17
2.3 Dati di tecnici del generatore 1FW3285	19
3 MODELLI DI CALCOLO	20
3.1 Modello Meccanico	20
3.2 Modello Elettrico per la stima delle perdite.....	21
3.2.1 Stima delle perdite e calcolo parametri elettrici	22
3.2.2 Visualizzazione delle grandezze elettriche.....	23
4 FASE PRELIMINARE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE	26
4.1 Calcolo della mappa dei rendimenti	26
4.2 Validazione Mappa dei rendimenti.....	28
4.3 Stima di un sistema LTI.....	32

5	STRATEGIE DI CONTROLLO	35
5.1	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI	35
5.2	LOGICHE DI CONTROLLO.....	37
5.2.1	T_NEW_1.....	37
5.2.2	T_NEW_2.....	39
5.2.3	T_NEW_3.....	41
5.2.4	T_NEW_4.....	42
5.2.5	T_NEW_5.....	43
5.2.6	T_NEW_6.....	44
5.2.7	T_NEW_7.....	45
5.2.8	T_NEW_8.....	46
5.3	ANDAMENTO DEL PUNTO DI LAVORO.....	47
5.3.1	Controllo 0.....	47
5.3.2	Controllo 1	51
5.3.3	Controllo 2	52
5.3.4	Controllo 3	53
5.3.5	Controllo 4.....	54
5.3.6	Controllo 5	55
5.3.7	Controllo 6.....	56
5.3.8	Controllo 7.....	57
5.3.9	Controllo 8.....	58
6	RISULTATI SIMULAZIONE PARAMETRICA	59
6.1	Variazione parametri Controllo 1	62
7	CONCLUSIONI	63
8	RIFERIMENTI	64

INDICE FIGURE

Figura 1.1 Densità di Potenza mondiale in kW/m^2 (da fonte [4])	8
Figura 1.2 Densità di Potenza europea in kW/m^2 da fonte ENEA	8
Figura 1.3 RON in Italia (Immagine di ISPRA).....	9
Figura 1.4 Densità di potenza delle coste italiane in kW/m^2 (da fonte [8])	10
Figura 1.5 Rappresentazione schematica di un sistema giroscopico (da fonte [17])	11
Figura 1.6 Primo prototipo ISWEC a un grado di libertà (da fonte [18])	12
Figura 1.7 Prototipo ISWEC in scala 1:8 (da fonte [19]).....	12
Figura 1.8 Scafo e convertitori giroscopici (da fonte [19])	13
Figura 1.9 Giroscopio e PTO (da fonte [20])	14
Figura 3.1 Modello meccanico completo ISWEC.....	20
Figure 3.2 Modello elettrico semplificato per stima perdite	21
Figura 3.3 Andamento tipico di velocità e coppia all'albero del generatore elettrico.....	23
Figura 3.4 Andamento regolarizzato velocità e coppia all'albero del generatore elettrico .	24
Figura 3.5 Andamento grandezze elettriche normalizzate	25
Figura 4.1 Mappa dei rendimenti	27
Figura 4.2 Errore relativo dato sperimentale – LUT	29
Figura 4.3 Confronto andamento Potenze elettriche (sperimentale – LUT) per Onda 1.....	30
Figura 4.4 Dettaglio andamento Potenze elettriche Onda 1	31
Figura 4.5 Calcolo Potenza elettrica nel modello meccanico.....	31
Figura 4.6 Stima sistema ISWEC con System Identification Toolbox	32
Figura 4.7 Diagramma di Bode della funzione di trasferimento $\text{sys}(s)$	33
Figura 4.8 Spettro armonico Onda 1	33
Figura 4.9 Errori relativi Potenze elettriche calcolate con $\text{sys}(s)$ rispetto alle sperimentali	34
Figura 5.1 Applicazione della nuova strategia di controllo in Simulink del blocco “Controller” del modello meccanico.....	36
Figura 5.2 Sottodomini definiti per $\eta_{\text{max}} = 0,21$	38
Figura 5.3 Funzione $T_{\text{NEW_1}}$ con $\eta_{\text{max}} = 0,1$ e $k_{T_new} = 0,21$	38
Figura 5.4 Sottodomini definiti da $\eta_{\text{min}}=0,8$	40
Figura 5.5 Strategia $T_{\text{NEW_2}}$ con $\eta_{\text{min}} = 0,8$	40
Figura 5.6 Sottodomini definiti da $\eta_{\text{min}} = 0,8$	41
Figura 5.7 Funzione $T_{\text{NEW_3}}$ con $\eta_{\text{min}} = 0,8$ e $k_{T_new} = 0,15$	41

Figura 5.8 Funzione T_NEW_4 con $dw = 17$ e $k_T_new = 0,1$	42
Figura 5.9 Campi di lavoro definiti da $P_k = 40000$ W, $\eta_{min} = 0,89$, $\eta_{max} = 0$	43
Figura 5.10 Funzione T_NEW_6	44
Figura 5.11 Sottodomini definiti da $\eta_{min} = 0,8$, $\eta_{max} = 0,4$	45
Figura 5.12 Sottodomini di funzionamento da motore (giallo) e generatore (viola).....	46
Figura 5.13 Funzione T_NEW_8	46
Figura 5.14 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 0.....	48
Figura 5.15 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 0 - Onda 27	49
Figura 5.16 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 0 - Onda 27	49
Figura 5.17 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 1.....	51
Figura 5.18 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 1 - Onda 27	51
Figura 5.19 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 1 - Onda 27	51
Figura 5.20 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 2.....	52
Figura 5.21 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 2 - Onda 27	52
Figura 5.22 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 2 - Onda 27	52
Figura 5.23 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 3.....	53
Figura 5.24 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 3 - Onda 27	53
Figura 5.25 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 3 - Onda 27	53
Figura 5.26 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 4.....	54
Figura 5.27 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 4 - Onda 27	54
Figura 5.28 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 4 - Onda 27	54
Figura 5.29 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 5.....	55
Figura 5.30 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 5 - Onda 27	55
Figura 5.31 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 5 - Onda 27	55
Figura 5.32 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 6.....	56
Figura 5.33 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 6 - Onda 27	56
Figura 5.34 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 6 - Onda 27	56
Figura 5.35 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 7.....	57
Figura 5.36 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 7 - Onda 27	57
Figura 5.37 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 7 - Onda 27	57
Figura 5.38 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 8.....	58
Figura 5.39 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 8 - Onda 27	58
Figura 5.40 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 8 - Onda 27	58

1 INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi tratta un generatore di energia elettrica associato a una fonte di energia rinnovabile: l'energia da moto ondoso. Tra le diverse tecnologie presenti nel panorama ingegneristico, si entrerà nel merito della tecnologia ISWEC (*Inertial Sea Wave Energy Converter*), e in particolare si prenderà in considerazione il generatore di Pantelleria. L'obiettivo di questo lavoro è lo studio di nuove strategie di controllo adattate al generatore di Pantelleria al fine di migliorare la producibilità elettrica.

Nella prima parte del documento, verrà descritta brevemente la risorsa del moto ondoso dal punto di vista della sua potenzialità energetica. Successivamente verrà riportato un breve cenno sulla genesi del dispositivo considerato e verrà fatto un breve richiamo teorico sul tipo di macchina elettrica utilizzata.

Nella seconda parte, verranno descritti i modelli di calcolo utilizzati, in particolare quello elettrico, di cui ne è stato realizzato una versione semplificata adattabile al modello meccanico in termini computazionali. Successivamente verrà realizzata una stima dell'affidabilità sfruttando dei dati sperimentali raccolti dalle campagne di misurazione a Pantelleria.

L'ultima parte sarà dedicata alla descrizione delle nuove strategie di controllo pensate sulla base dei risultati prodotti con l'implementazione del modello elettrico nel modello meccanico. Verrà poi mostrato come tali leggi influenzano il comportamento dinamico dell'organo associato alla produzione di potenza, e infine verranno riportati i risultati delle simulazioni parametriche e le relative considerazioni.

1.1 Energia da moto ondoso e tecnologia WEC

1.1.1 Energia rinnovabile

La realtà del cambiamento climatico, negli ultimi anni, ha ormai raggiunto la coscienza di tutti. Sono stati fatti una serie di sforzi in tutti i campi della scienza per trovare delle soluzioni a un problema di ogni individuo della popolazione terrestre. La produzione di energia è sicuramente un aspetto fondamentale da considerare, e la ricerca nello sviluppo di fonti rinnovabili rappresenta un passo decisivo verso l'obiettivo.

L'evoluzione tecnologica ha reso necessario un aumento della domanda di energia elettrica, la quale è vista come la principale forma di energia che sarà utilizzata nei prossimi anni in qualunque applicazione, sostituendo gli ormai obsoleti e inquinanti combustibili fossili. In particolare, nel 2014, la produzione totale di energia elettrica da fonti rinnovabili ammontava al 22,8% su un totale di 23,48 TWh di energia totale prodotta [1]. In particolare, in accordo con [1], la media di potenza relativa al moto ondoso è di circa 2 TW, corrispondente a 17.520 TWh annui. Questi numeri hanno stimolato l'interesse nello sviluppo di tale tecnologia.

1.1.2 Energia da moto ondoso

Da un punto di vista puramente descrittivo, l'energia da moto ondoso è il risultato di diverse forme di energia presenti in natura, come quella del vento, solare, dei terremoti, fino all'energia derivante dalla forza di Coriolis e dalla tensione superficiale terrestre [2]. L'approfondimento sulla genesi delle onde non è obiettivo di questa tesi, per cui si porrà maggiore attenzione sulla producibilità ad esse associate, essenziale per la progettazione dei dispositivi. Lo strumento classico per caratterizzare le onde da un punto di vista energetico è la "teoria lineare delle onde" [3], secondo cui *"in generale, una misurazione delle grandezze legate alle onde, non può ripetersi esattamente. Assumendo che lo stato del mare è in condizioni stazionarie, ovvero se il processo stocastico dove la distribuzione di probabilità non cambia nel tempo, le proprietà statistiche di distribuzione dei periodi e altezza saranno simili in almeno due misurazioni"*.

Si può osservare che gli oceani hanno un maggior contenuto energetico, identificabile in $[kW/m^2]$ [4].



Figura 1.1 Densità di Potenza mondiale in kW/m^2 (da fonte [4])

Dagli studi dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), si evince che, in particolare, l'Europa ha ottime potenzialità energetiche. Ovviamente, le maggiori capacità si riscontrano sulla costa oceanica.

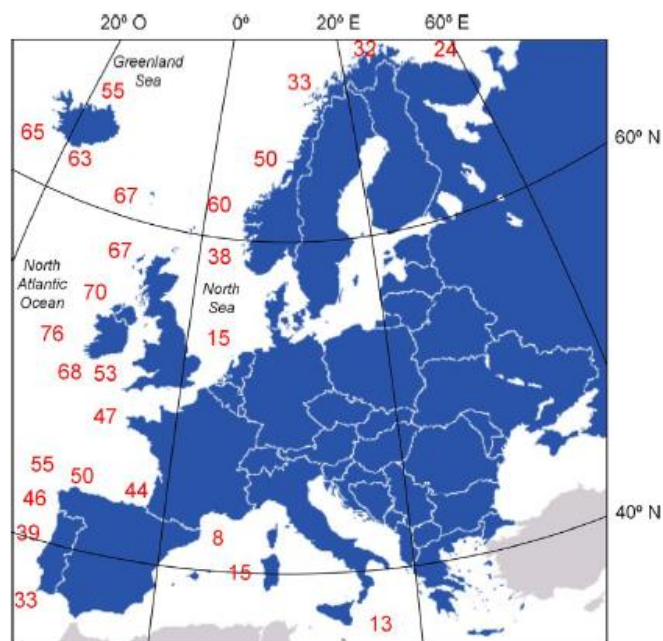


Figura 1.2 Densità di Potenza europea in kW/m^2 da fonte ENEA

Oltre al contenuto energetico, alle onde sono associate altre grandezze, come l'ampiezza, la direzione di propagazione e la frequenza, necessarie al dimensionamento di un dispositivo di produzione di energia.

I sistemi di misura per caratterizzarle possono essere delle boe, applicate direttamente in mare, o l'osservazione da satellite [5]. Le due grandezze a cui si farà riferimento nel seguito sono l'altezza significativa H_s e il periodo energetico T_e . Si definisce *altezza significativa* H_s , la media del 33% dell'altezza delle onde più alte considerate in un dato intervallo di tempo. Il *periodo energetico* T_e è definito come “la media dei periodi di tutte le onde componenti” [6].

Le coste italiane, dal punto di vista della misurazione, sono gestite dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON), composta da 15 boe [7].



Figura 1.3 RON in Italia (Immagine di ISPRA)

L'energia media annua non raggiunge valori paragonabili con quelli oceanici, ma esiste una buona varietà che permette di eseguire differenti valutazioni. Le coste energeticamente più favorevoli sono quelle Ovest in Sardegna, dove si superano i 10 kW/m^2 , e nei pressi di Mazara del Vallo in Sicilia, con picchi di 8 kW/m^2 [8].

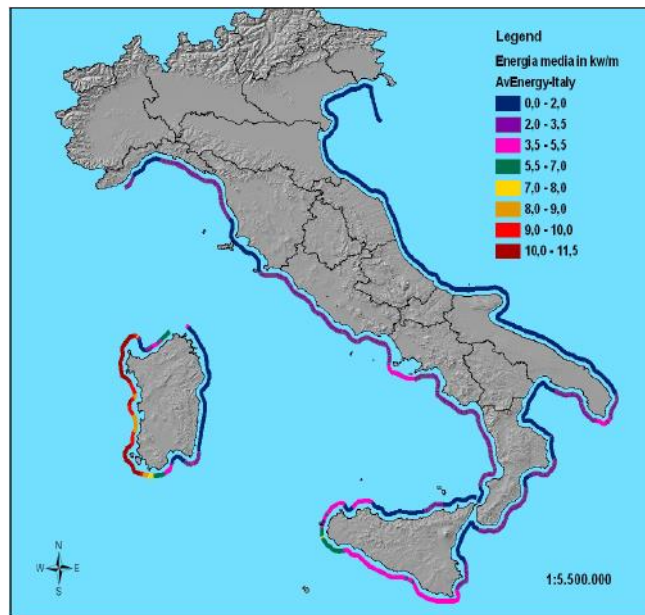


Figura 1.4 Densità di potenza delle coste italiane in kW/m² (da fonte [8])

1.1.3 Wave energy Converters

I dispositivi atti a produrre energia dalle onde del mare sono genericamente chiamati WECs (Wave Energy Converters). Stephen Salter, negli anni 70', in seguito a una sua pubblicazione [9], ha riportato l'interesse per lo studio di questa tecnologia. Infatti, negli anni successivi, un grande numero di studi sono stati affrontati in tutto il mondo, i quali hanno prodotto una letteratura molto corposa sull'argomento. Un' interessante revisione di tale percorso si può ritrovare in [10]. Sono nate diverse categorie di dispositivi, che propongono una grande varietà di soluzioni, presentate in [11]. Per quanto riguarda le strategie di controllo, una revisione generale è stata scritta in [12] , e in particolare per il real-time in [13]. Una configurazione dell'interfaccia con il sistema elettrico è spiegata in [14].

Gli aspetti economici rappresentano un problema fondamentale. Come tutte le sorgenti di energia da fonti rinnovabili, le variabili efficienza e costo in termini di LCOE (Levelized Cost Of Energy) sono determinanti nella scelta dell'uso di una tecnologia piuttosto che un'altra. Una descrizione recente di questo aspetto è riportata in [15]. La tecnologia ISWEC, oggetto di discussione di questa tesi, è una di quelle che sta andando in quella direzione.

1.2 ISWEC

1.2.1 Storia del progetto

Il progetto ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) viene concepito per la prima volta nel 2005 da un gruppo di ingegneri del dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino. Il mar Mediterraneo non gode di una elevata densità di potenza media confrontata con quella oceanica, ma essendo un mare chiuso, possiede una frequenza maggiore rispetto ai mari aperti [16]. L'idea è, quindi, quella di sfruttare gli effetti giroscopici per estrarre energia dalle onde del mare.

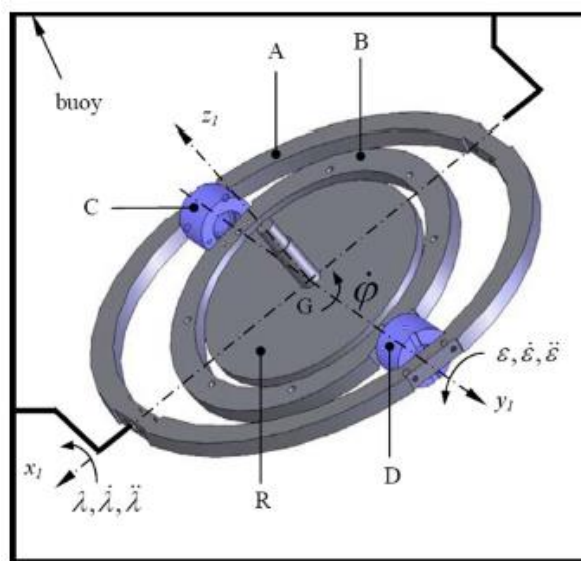


Figura 1.5 Rappresentazione schematica di un sistema giroscopico (da fonte [17])

Il primo dispositivo legato a questo progetto nacque nel 2009, caratterizzato da un singolo grado di libertà, il cui prototipo è stato prodotto in scala 1:45 per il sito di Alghero (Sardegna, Italia).

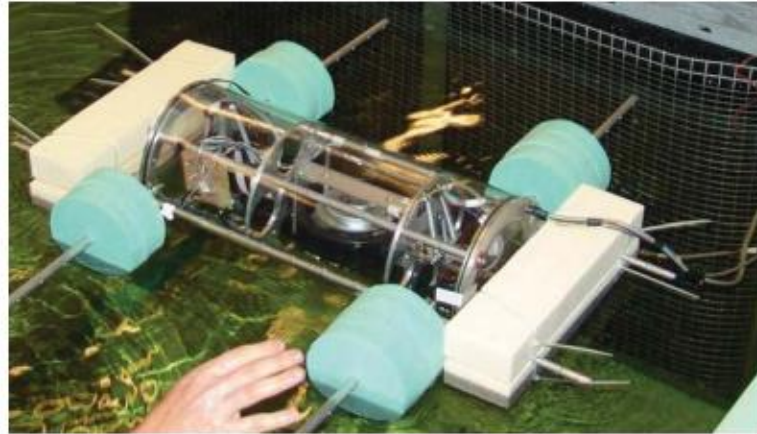


Figura 1.6 Primo prototipo ISWEC a un grado di libertà (da fonte [18])

Il passo successivo, ha visto la nascita dello spin-off “Wave for Energy S. r. l.” che, in collaborazione con Aris S. p. A., ha lavorato per la creazione del prototipo in scala 1:8 per il sito di Pantelleria (Sicilia, Italia), che fu lanciato nel 2012.



Figura 1.7 Prototipo ISWEC in scala 1:8 (da fonte [19])

1.2.2 ISWEC in scala reale

Il prototipo in scala reale è stato installato nel sito di Pantelleria nell'Agosto 2015, in cui ebbe inizio la campagna sperimentale. Non è scopo di questa tesi descrivere nel dettaglio il sistema meccanico, per il quale esiste una sufficiente quantità di materiale, ma verranno citate le componenti utili alla trattazione dal punto di vista elettrico.

All'interno dello scafo sono collocati due convertitori giroscopici.

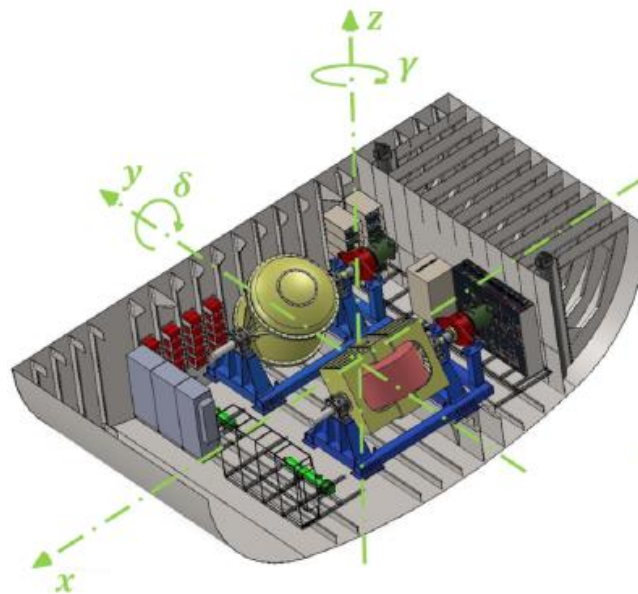


Figura 1.8 Scafo e convertitori giroscopici (da fonte [19])

La differenza tra i due sistemi giroscopici sta nel fatto che uno di essi (a sinistra in Figura 1.8) è contenuto in un alloggio sotto vuoto. Il prototipo è dotato di un sistema che consente di allineare lo scafo con l'asse rispetto al quale le onde incidono maggiormente, di conseguenza il moto ondoso induce prevalentemente un movimento di beccheggio [20]. Il beccheggio è individuato dall'angolo δ . Il volano, che è messo in rotazione da un motorino elettrico, (in rosso in Figura 1.9), è posto su un telaio (in blu in Figura 1.9) [20]. L'angolo di rotazione del volano è φ . Il telaio ruota rispetto all'angolo ϵ , che è quello che sarà di maggiore interesse dal punto di vista elettrico nel seguito. Esso infatti, è collegato al dispositivo che consente di estrarre potenza meccanica, chiamato Power Take Off (PTO). Il PTO (in verde in Figura 1.9) è poi connesso meccanicamente, mediante un Gear Box, all'albero del generatore elettrico.

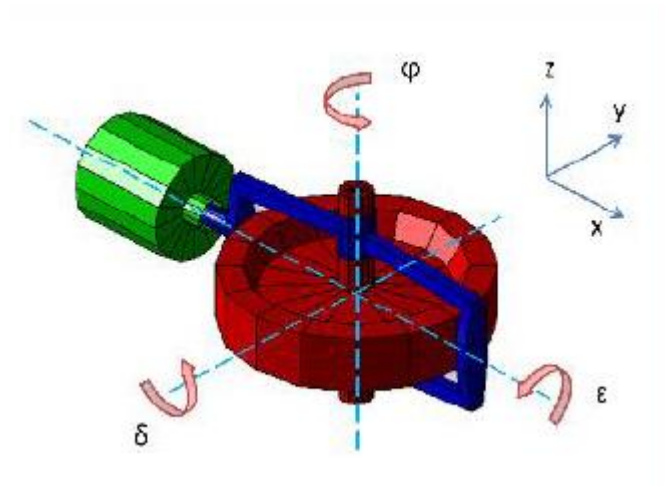


Figura 1.9 Giroscopio e PTO (da fonte [20])

In definitiva, si può dire che la rotazione combinata dello scafo attorno all'asse identificato da δ e del giroscopio attorno all'asse φ , provoca l'insorgenza di effetti giroscopici che determinano una rotazione attorno all'asse ϵ del telaio [20]. In questo modo, la periodicità delle onde provoca il beccheggio dello scafo, che a sua volta induce un movimento oscillatorio del PTO [20].

2 GENERATORE ELETTRICO

In questo capitolo si entrerà maggiormente nel merito della parte elettrica che compone l'ISWEC. In particolare, si porrà l'attenzione sull'azionamento utilizzato, dando una descrizione teorica necessaria e sufficiente alla comprensione dei fenomeni elettrici, ma anche per il fine ultimo della valutazione della producibilità dell'intero sistema.

2.1 Brushless Sinusoidale

Il generatore utilizzato è un Siemens 1FW3285, appartenente alla categoria dei PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine), detta anche SPM (Surface Permanent Magnet).

2.1.1 Aspetti costruttivi

Una generica macchina brushless sinusoidale è composta da uno statore, su cui sono avvolti degli avvolgimenti trifase, e un rotore, in questo caso isotropo a magneti permanenti.

Tale macchina è detta “sinusoidale”, perché gli avvolgimenti sono avvolti in modo tale che la distribuzione dei conduttori in funzione dello spazio radiale abbia un andamento sinusoidale. Viene dunque definita una funzione $F(\alpha)$, in cui α è la coordinata spaziale a statore espressa in [rad]. In generale si può dire che F è il numero di conduttori presenti tra α e una posizione iniziale di riferimento. Nella pratica i conduttori sono posti in cave, dunque la distribuzione di conduttori assume inizialmente un andamento discreto. Per renderla il più possibile vicina a un andamento sinusoidale, si adottano delle pratiche correttive dal punto di vista costruttivo. Una di esse è il *passo raccorciato*, che consiste nello scambiare un numero definito di conduttori tra cave vicine appartenenti a fasi diverse, per cui in ogni cava sono previsti almeno due strati di conduttori. Un'altro accorgimento è lo *skewing*, il quale prevede che le cave siano inclinate di un angolo (in genere piccolo) lungo la direzione assiale, in modo da ridurre la discretizzazione dell'andamento della distribuzione dei conduttori.

Il rotore è dotato di magneti di spessore uniforme. Essi definiscono una funzione di induzione magnetica $B(\xi)$, dove ξ è la coordinata spaziale a rotore espressa in [rad]. Il numero di poli definisce la frequenza della funzione $B(\xi)$. In condizioni ideali, la funzione di induzione è un'onda quadra, ma nella pratica esiste l'effetto del *cortocircuito di flusso*, riscontrabile nella posizione in cui due magneti di polarità opposte sono messi a contatto.

Questo fenomeno fa assumere alla funzione di induzione un andamento ad *elmo*, che può essere fastidioso per la coppia risultante, introducendo un'ondulazione. Per limitare questo problema, si tengono separati i magneti con un piccolo spessore di ferro.

L'interazione tra la funzione di induzione e la funzione di distribuzione di conduttori induce un flusso concatenato, definito come:

$$\lambda_m(\vartheta) = \int_{-\pi}^{+\pi} F(\alpha) \cdot B(\xi) \cdot r \cdot l \cdot d\alpha = \int_{-\pi}^{+\pi} F(\alpha) \cdot B(\alpha - \vartheta) \cdot r \cdot l \cdot d\alpha \quad (1)$$

dove $\theta = \alpha - \xi$ è la posizione relativa tra statore (α) e rotore (ξ), r e l sono rispettivamente raggio e lunghezza di rotore. Dunque, θ è una funzione del tempo. Allora la forza elettromotrice indotta sarà:

$$e(t) = \frac{d\lambda_m(\vartheta(t))}{dt} = \frac{d\lambda_m(\vartheta)}{d\vartheta} \cdot \omega_m(t) \quad (2)$$

dove il termine derivata dipende esclusivamente da particolari costruttivi, quindi è costante nel tempo, mentre l'altro fattore è la velocità angolare meccanica di rotore che dipende dal tempo. Bisogna osservare che a parità di coppia e velocità, l'ampiezza della fem indotta non dipende dal numero di poli.

Si definisce autoinduttanza il rapporto tra flusso concatenato di un avvolgimento e la corrente che percorre lo stesso avvolgimento, per cui si può scrivere un'espressione che dipende dalla funzione di distribuzione dei conduttori:

$$L = \frac{r \cdot l \cdot \mu_0}{l_m + g} \int_{-\pi}^{+\pi} F^2(\alpha) \cdot d\alpha \quad (3)$$

dove l_m è la lunghezza del magnete, g è la lunghezza del traferro.

Analogamente si può definire la mutua induttanza tra due avvolgimenti come rapporto tra flusso concatenato di un avvolgimento e corrente che percorre un altro avvolgimento, da cui:

$$M_{ij} = \frac{r \cdot l \cdot \mu_0}{l_m + g} \int_{-\pi}^{+\pi} F_i \cos(p \cdot \alpha) \cdot F_j \cos(p \cdot \alpha - \varphi) \cdot d\alpha \quad (4)$$

dove i è l'avvolgimento in cui si induce il flusso concatenato, j è l'avvolgimento percorso da corrente, φ è lo sfasamento fisico tra i due avvolgimenti, p è il numero di poli.

2.1.2 Modello generale

Il flusso concatenato totale sarà il contributo dei flussi di auto e mutua induttanza definiti dalle correnti di statore, più il contributo dei flussi concatenati dei magneti dipendenti dalla posizione del rotore. Allora si può definire *induttanza equivalente*:

$$L_{eq} = L - M + L_{\sigma} \quad (5)$$

dove L_{σ} è l'induttanza associata ai flussi dispersi. Il modello magnetico si può scrivere come:

$$[\lambda] = L_{eq} \cdot [i] + [\lambda_m] \quad (6)$$

dove la forma matriciale include le tre fasi. Essendo le equazioni elettriche del tipo:

$$[v] = R[i] + \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (7)$$

allora si ha:

$$[v] = R[i] + L_{eq} \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[\lambda_m]}{dt} \quad (8)$$

Dal bilancio energetico si ricava l'espressione della coppia in forma matriciale:

$$T = p \cdot \frac{d[i]^T}{dt} \cdot \frac{d[\lambda_m]}{d\theta} \quad (10)$$

da cui si deduce che la coppia dipende dall'interazione tra flusso e corrente.

2.2 Controllo del Brushless Sinusoidale

In generale, lo studio dinamico delle macchine elettriche viene fatto attraverso vettori rotanti nel piano, ottenuti per mezzo delle trasformazioni trifase-bifase e di rotazione. In questo modo si analizzano delle grandezze che ruotano solidali con un sistema di riferimento mobile scelto, che spesso è quello di rotore, le quali avranno andamenti dinamici più intuitivi. La trasformazione di rotazione associa i vettori rotanti a un sistema di riferimento mobile definito da due assi: *asse diretto* (asse d), sul quale, nel caso di un SPM,

viene arbitrariamente posizionato il vettore del flusso dei magneti, e *asse in quadratura* (asse q), posto in quadratura rispetto all'asse d. Quindi nel seguito si farà riferimento a grandezze *in assi dq*.

Elaborando (10), si ottiene la seguente espressione della coppia in assi dq:

$$T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\overline{\lambda_m} \wedge \bar{i}) \quad (11)$$

affinché si ottenga il massimo della coppia, il controllo impone che i vettori flusso e corrente siano posti in quadratura tra loro. In definitiva, l'espressione della coppia per un SPM è:

$$T(t) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \lambda_m \cdot i(t) = k_T \cdot i_q(t) \quad (12)$$

In questa espressione, è stato implicitamente definito che λ_m sia in asse d. Allora il vettore corrente, per essere in quadratura al flusso, deve avere solo la componente in asse q. Quindi il controllo impone che la componente di corrente in asse d sia mantenuta nulla. Inoltre, si deduce che, per un azionamento di tipo SPM, coppia e corrente in asse q sono direttamente proporzionali.

2.3 Dati di tecnici del generatore 1FW3285

Il generatore utilizzato presenta i seguenti dati tecnici:

Dati di progettazione	Abbreviazione	Unità	1FW3285-2□G	
Numero di giri nominale	n_N	1/min	250	
Coppia nominale (100 K)	$M_N (100 K)$	Nm	4950	
Potenza nominale (100 K)	$P_N (100 K)$	kW	130	
Corrente nominale (100 K)	$I_N (100 K)$	A	245	
Coppia da fermo (100 K)	$M_0 (100 K)$	Nm	5100	
Corrente da fermo (100 K)	$I_0 (100 K)$	A	250	
Dati limite				
Numero di giri max. ammesso (mecc.)	$n_{max\ mecc}$	1/min	1000	
Numero di giri max. ammesso (convertitore)	$n_{max\ 830\ V}$	1/min	440	
Coppia massima	M_{max}	Nm	8150	
Corrente massima	I_{max}	A	435	
Dati del motore				
Numero di poli	$2p$		20	
Trasmissione misura numero di giri (in caso di montaggio encoder tramite cinghia)	i_{enc}	--	-5	
Costante di coppia (100 K)	$k_T (100 K)$	Nm/A	20,5	
Costante di tensione (a 20 °C)	k_E	V/1000 1/min	1295	
Resistenza avvolgimento (a 20 °C)	R_{fase}	Ω	0,045	
Induttanza del campo rotante	L_D	mH	2,2	
Costante di tempo elettrica	T_{el}	ms	47,5	
Costante di tempo termica	T_{th}	min	14,0	

Tabella 2.1 Dati tecnici elettrici

Per questo motore è anche catalogata la potenza che deve essere dissipata per raffreddamento pari a 12,8 kW, rappresentativa di tutte le perdite.

3 MODELLI DI CALCOLO

In questo capitolo, verranno presentati i modelli utilizzati per l'esecuzione delle simulazioni di calcolo. I modelli sono stati realizzati sulle piattaforme Matlab e Simulink.

3.1 Modello Meccanico

Il modello meccanico utilizzato è stato costruito in ambiente SimMechanics di Simulink dal team di Wave for Energy, già sottoposto a validazione sperimentale e utilizzato per i calcoli di ottimizzazione della producibilità. È composto da più sottomodelli, per riprodurre più fedelmente il comportamento idrodinamico, il comportamento del sistema giroscopico, il controllo di coppia in uscita e il sistema di sicurezza. Non è obiettivo di questa tesi la discussione dettagliata del modello, ma verranno messe in evidenza solo le parti necessarie allo scopo del lavoro.

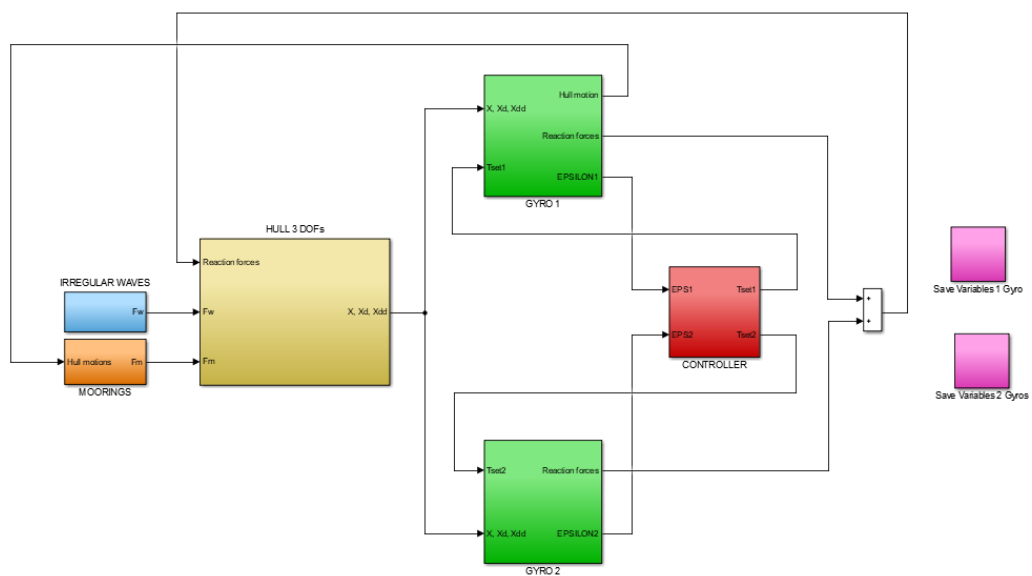


Figura 3.1 Modello meccanico completo ISWEC

3.2 Modello Elettrico per la stima delle perdite

Il modello elettrico dell'azionamento è stato costruito per avere uno strumento che identifichi le perdite nel generatore elettrico che potesse essere utilizzato nel modello meccanico. È stato necessario valutare l'efficienza dell'azionamento in funzione delle particolari condizioni di funzionamento indotte dal moto ondoso. Considerando i limiti imposti dai dati tecnici del generatore, è stata calcolata una mappa dei rendimenti in funzione di tutte le possibili condizioni di lavoro in termini di coppia e velocità.

Il modello elettrico utilizzato rappresenta una versione semplificata dell'azionamento da cui è possibile fare una stima delle perdite, rappresentabile come un circuito di una macchina in corrente continua:

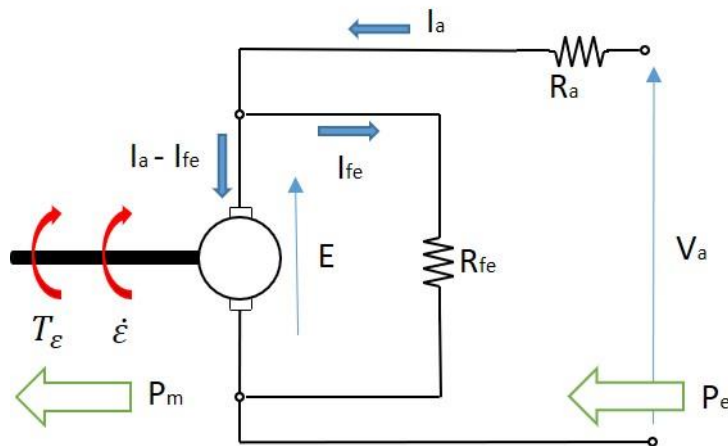


Figure 3.2 Modello elettrico semplificato per stima perdite

dove V_a e I_a rappresentano le grandezze sul bus in continua, R_a rappresenta le perdite per effetto Joule, R_{fe} rappresenta le perdite nel ferro, E si associa alla fem indotta, T_e e $\dot{\epsilon}$ sono rispettivamente la coppia e la velocità angolare all'albero meccanico, associate al PTO. Si adotta la convenzione di segno dei motori. È necessario quindi definire i parametri del circuito. Verrà utilizzato il metodo simbolico in regime stazionario usando i dati forniti dal catalogo in condizioni nominali. Si fa l'ipotesi di trascurare la reattanza di armatura. Questa ipotesi verrà successivamente giustificata dal fatto che le grandezze meccaniche variano "lentamente" rispetto alle dinamiche elettriche, per cui il contributo della reattanza è trascurabile.

3.2.1 Stima delle perdite e calcolo parametri elettrici

3.2.1.1 Perdite Joule

Considerando una macchina brushless trifase, la potenza associata alle perdite Joule vale:

$$P_j = 3 \cdot R_s \cdot I_{aN}^2 = 3 \cdot 0.045 \cdot 245^2 = 8103 \text{ W} \quad (13)$$

Per il circuito monofase equivalente allora vale:

$$R_a = 3 \cdot R_s = \frac{P_{jN}}{I_{aN}^2} = \frac{8103}{245^2} = 0.135 \Omega \quad (14)$$

associata alla resistenza di armatura.

3.2.1.2 Perdite nel ferro

È noto che:

$$P_{lossN} = 12.8 \text{ kW} = P_{jN} + P_{feN} \quad (15)$$

per cui:

$$P_{feN} = P_{lossN} - P_{jN} = 12800 - 8103 = 4697 \text{ W} \quad (16)$$

Considerando un funzionamento da motore, allora deve valere:

$$P_{eN} = P_{mN} + P_{lossN} = 130 + 12.8 = 142.8 \text{ kW} \quad (17)$$

$$V_{aN} = \frac{P_{eN}}{I_{aN}} = \frac{142800}{245} = 582.86 \text{ V} \quad (18)$$

Con la legge delle tensioni si calcola la f.e.m. indotta:

$$E_N = V_{aN} - R_a \cdot I_{aN} = 582.86 - 0.135 \cdot 245 = 549.785 \text{ V} \quad (19)$$

da cui si può calcolare la resistenza associata alle perdite nel ferro:

$$R_{fe} = \frac{E_N^2}{P_{feN}} = \frac{549.785^2}{4697} = 64.35 \Omega \quad (20)$$

3.2.2 Visualizzazione delle grandezze elettriche

Per avere un'idea della funzionalità del modello elettrico realizzato, si vuole applicare una possibile condizione di funzionamento. In ingresso verrà considerata l'onda di progetto, identificata dai seguenti parametri:

Periodo energetico	T_e	[s]	5.29
Altezza significativa	H_s	[m]	1.75
Indice d'onda	Index	//	27

Tabella 3.1 Parametri onda irregolare 27

In generale, le onde reali presentano un andamento irregolare, per cui risulta difficile descrivere l'andamento di T_e e ε in forma analitica. Al fine puramente descrittivo, si riporta un andamento tipico di T_e e ε lato generatore elettrico, tralasciando per il momento gli aspetti relativi al controllo, che verranno approfonditi successivamente.

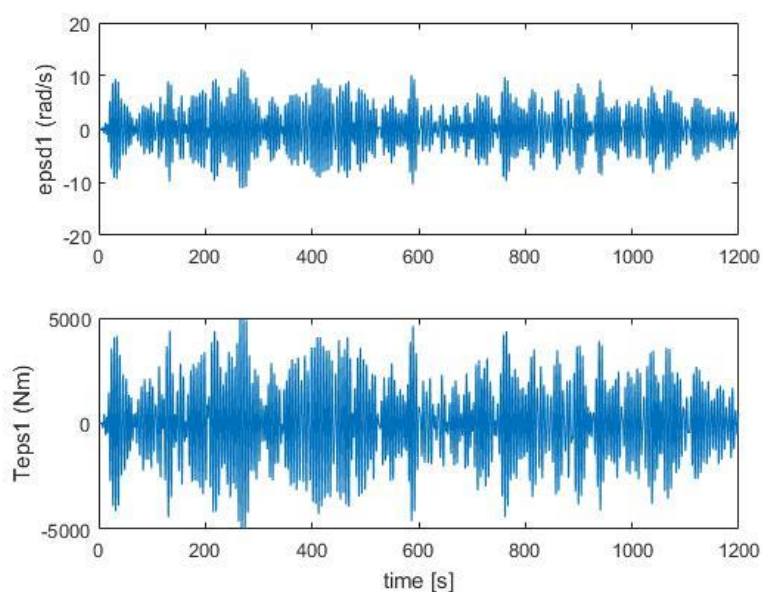


Figura 3.3 Andamento tipico di velocità e coppia all'albero del generatore elettrico

Gli andamenti elettrici possono essere visualizzati se si considera un'onda equivalente regolarizzata. Il principio si fonda sulla base dell'uguaglianza fra densità di potenza fra l'onda irregolare e regolare.

Per un'onda irregolare, la densità di potenza è definita come:

$$\delta P_{irr} = 0.49 \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (21)$$

Per l'onda regolare invece vale:

$$\delta P_{reg} = H^2 \cdot T \quad (22)$$

con H e T altezza significativa e periodo energetico dell'onda regolare. Ammettendo che T e T_e siano circa uguali, uguagliando le densità di potenza si ottiene:

$$H = \sqrt{0.49} \cdot H_s \quad (23)$$

Per cui l'equivalente onda regolare è caratterizzata dai seguenti parametri:

Periodo energetico	T	[s]	5.29
Altezza significativa	H	[m]	1.225
Indice d'onda	Index	//	27

Tabella 3.2 Parametri onda regolare 27

Gli andamenti risultanti di T_e e $\dot{\epsilon}$ per l'onda regolare sono i seguenti:

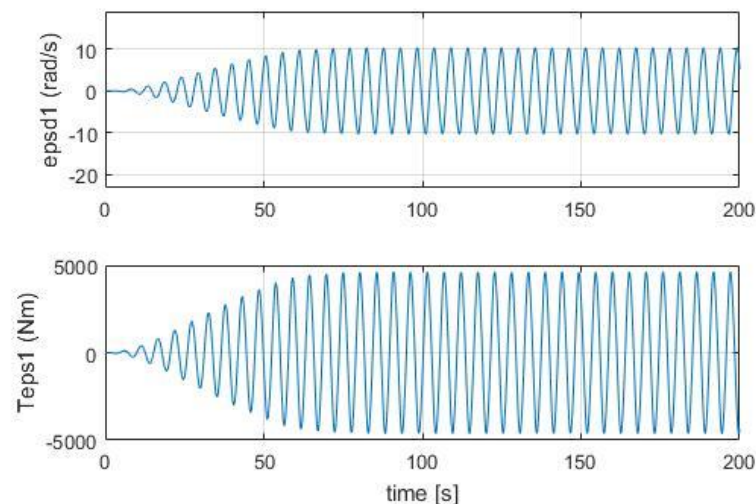


Figura 3.4 Andamento regolarizzato velocità e coppia all'albero del generatore elettrico

Si osserva come l'andamento, dopo un transitorio iniziale, diventa periodico sinusoidale. Questa proprietà consente di valutare le grandezze elettriche dal punto di vista grafico considerando un singolo periodo.

In questa condizione, il periodo di una sinusoide vale 5,3 secondi corrispondente a una frequenza di 0,189 Hz. Il termine $L \frac{di_a(t)}{dt}$ assume in genere valori molto piccoli. Si giustifica l'ipotesi di trascurare l'induttanza di armatura nel modello elettrico.

Il calcolo delle grandezze è fatto con le seguenti relazioni:

$$E(t) = K_E \cdot \dot{\epsilon}(t) \quad (24)$$

$$I_{fe}(t) = \frac{E(t)}{R_{fe}} \quad (25)$$

$$I_a(t) = \frac{T_\epsilon(t)}{K_T} + I_{fe}(t) \quad (26)$$

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + E(t) \quad (27)$$

$$P_e(t) = V_a(t) \cdot I_a(t) \quad (28)$$

Per questo modello è stato implicitamente assunto che $K_T = K_E$, considerando che la corrente calcolata con la costante di coppia è quella che attraversa il generatore di tensione e non la corrente di armatura, corrispondente alla corrente nominale di catalogo, per la quale è associato un $K_T' < K_T$.

Dando in ingresso T_ϵ e $\dot{\epsilon}$ regolari, si ottengono i seguenti andamenti delle grandezze elettriche, normalizzate rispetto ai valori nominali:

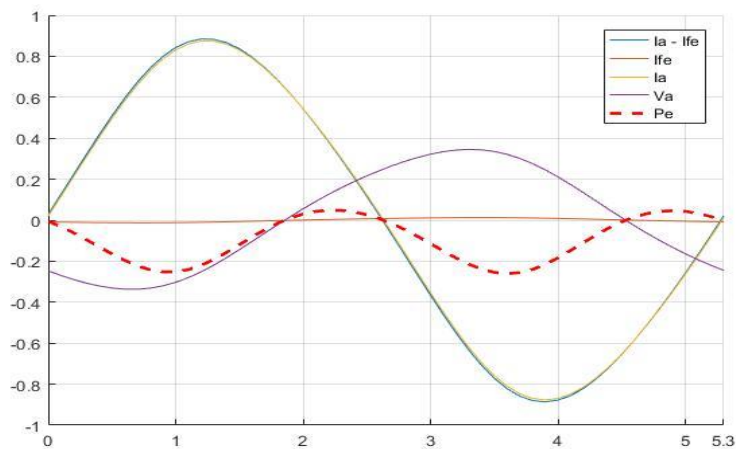


Figura 3.5 Andamento grandezze elettriche normalizzate

4 FASE PRELIMINARE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE

L'obiettivo finale di questo lavoro è provare ad ottimizzare la producibilità. Per fare questo è necessario considerare il rendimento del generatore in diverse condizioni di funzionamento. La fase preliminare del lavoro ha permesso quindi di validare l'affidabilità del modello elettrico, confrontando i risultati ottenuti attraverso la simulazione con i dati sperimentali rilevati direttamente su ISWEC a Pantelleria. La validazione del modello elettrico precede la sua successiva implementazione nel modello meccanico, dal quale si potrà poi valutare la producibilità al netto di perdite sia elettriche che meccaniche.

4.1 Calcolo della mappa dei rendimenti

La mappa dei rendimenti definisce i rendimenti del generatore in tutte le possibili condizioni di funzionamento, in termine di coppia e velocità in ingresso.

La mappa è stata realizzata per valori di coppia e velocità compatibili con i limiti meccanici imposti dalle specifiche tecniche del generatore, ossia:

$T_{\varepsilon min}$	[Nm]	-8000
$T_{\varepsilon max}$	[Nm]	+8000
$\dot{\varepsilon}_{min}$	[rad/s]	-33.53
$\dot{\varepsilon}_{max}$	[rad/s]	+33.53

Tabella 4.1 Limiti di coppia e velocità angolare della mappa dei rendimenti

I limiti di velocità sono stati scelti con un certo margine rispetto alla velocità massima ammissibile del generatore, che vale 26,18 rad/s. Tali valori definiscono il dominio di funzionamento del generatore elettrico. Bisogna osservare che i valori di coppia e velocità riportati sono quelli a valle del Gear Box, il quale introduce un coefficiente di trasmissione pari a 10. Si ricorda che il modello elettrico funziona con la convenzione di segno dei motori.

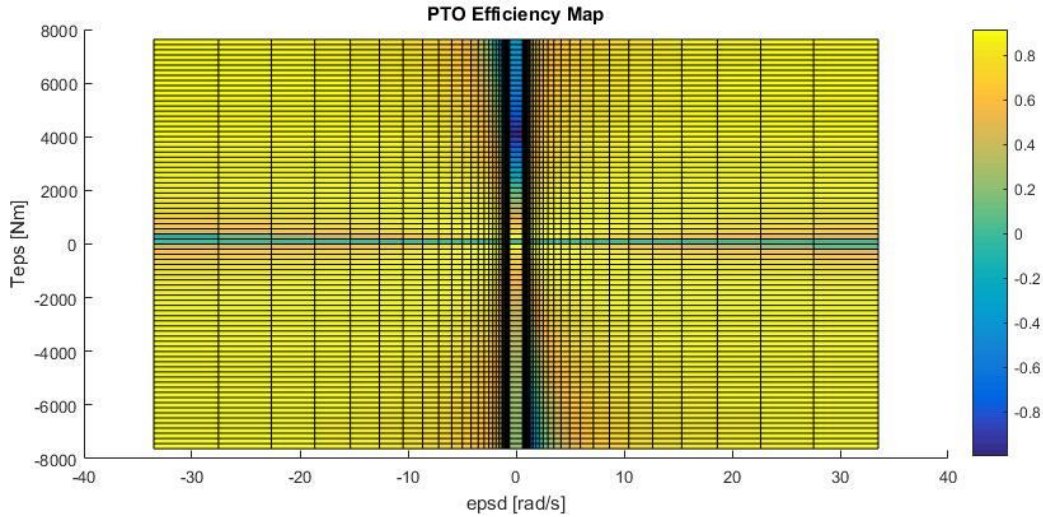


Figura 4.1 Mappa dei rendimenti

Nella mappa dei rendimenti, è possibile osservare tutti i valori di rendimento nei quattro quadranti di funzionamento. Il rendimento è stato calcolato come:

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} = \frac{V_{bus} \cdot I_{bus}}{T_\varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}} \quad \text{In funzionamento da generatore} \quad (29)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{T_\varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}}{V_{bus} \cdot I_{bus}} \quad \text{In funzionamento da motore} \quad (30)$$

Si osserva che esistono delle zone dove il rendimento risulta prossimo allo zero o addirittura negativo per le basse velocità. Esse rappresentano le zone più sfavorevoli di lavoro per il generatore elettrico e si pongono dove la macchina lavora come generatore, dunque il controllo deve fare in modo che si lavori il minor tempo possibile in quelle condizioni. La f.e.m. indotta a vuoto dipende dalla velocità, come visto in (2), per cui in fase di frenatura, e cioè in condizioni di funzionamento da generatore, a basse velocità la macchina va in uno stato di sottoeccitazione. Questo vuol dire che, quando la f.e.m. diventa minore della tensione di rete, il flusso di potenza si inverte. La rete vede la macchina come un motore, per cui tende a fornirgli potenza per accelerarlo. Tale potenza, unita a quella meccanica, risulta interamente dissipata sotto forma di calore, per cui non ha nessuna utilità nella conversione elettromeccanica.

4.2 Validazione Mappa dei rendimenti

La ricerca dell'ottimizzazione deve essere fatta nel modello meccanico, nel quale deve essere possibile calcolare direttamente la potenza elettrica in uscita. Sorge la necessità di implementare il modello elettrico semplificato nel modello meccanico. Ne viene ora valutata l'affidabilità. La simulazione è stata fatta per un set di nove onde di cui sono stati misurati sperimentalmente i valori al sito di Pantelleria

È stato costruito uno script Matlab per il calcolo della potenza elettrica secondo la relazione:

$$P_e(t) = \eta(T_e, \dot{\varepsilon}, t) \cdot T_e(t) \cdot \dot{\varepsilon}(t) = \eta(T_e, \dot{\varepsilon}, t) \cdot P_m(t) \quad (31)$$

dove per η è stata usata la mappa dei rendimenti in Figura 4.1 implementata sotto forma di Look-Up Table (LUT), $T_e(t)$ e $\dot{\varepsilon}(t)$ sono coppia istantanea e velocità istantanea misurate sperimentalmente riportate all'albero del generatore elettrico. In seguito, è stato calcolato il valor medio della potenza elettrica istantanea risultante. È stata confrontata tale potenza con quella misurata sperimentalmente.

L'errore relativo è stato calcolato come:

$$e_{rLUT}\% = \frac{P_{eLUT} - P_{eEXP}}{P_{eEXP}} \cdot 100 \quad (32)$$

La tabella seguente mostra i risultati in termini di potenza elettrica:

Indice Onda	1	2	4	5	9	10	11	12	13
Pe_{LUT} [kW]	2.996	2.81	2.92	4.21	8.76	7.0576	7.8644	6.4073	3.646
Pe_{EXP} [kW]	2.43	2.2365	2.41	3.624	7.916	6.396	7.0967	5.755	3.1537

Tabella 4.2 Risultati Potenze elettriche medie sperimentale – LUT

La figura seguente mostra gli errori relativi:

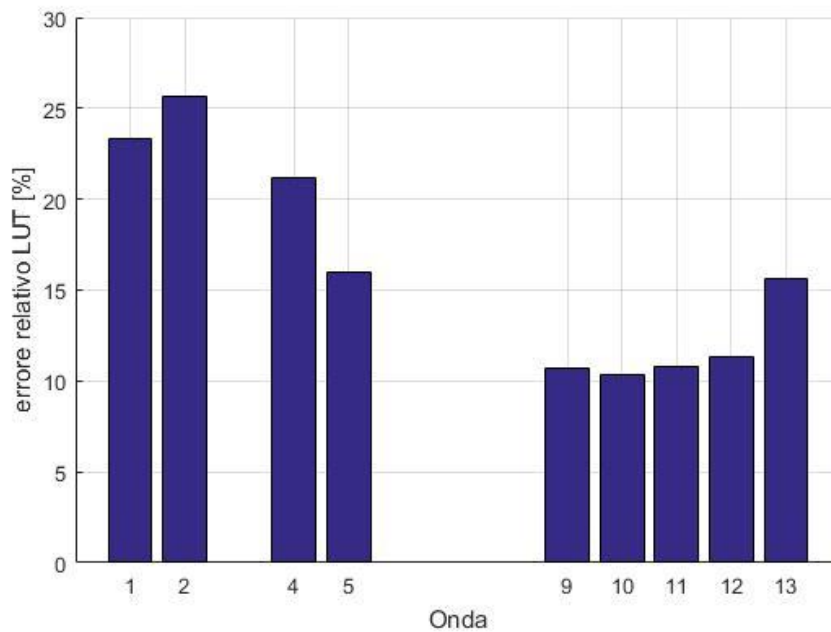


Figura 4.2 Errore relativo dato sperimentale – LUT

Si osserva che gli errori sono inversamente proporzionali alle potenze. L'errore risulta più alto per le onde che inducono potenza prodotta minore.

A titolo di esempio, viene riportato un andamento tipico della potenza elettrica istantanea associata alla generazione da moto ondoso. Si riporta un caso di confronto tra la potenza elettrica istantanea sperimentale e potenza elettrica istantanea calcolata con la LUT associato a una delle onde sopra analizzate.

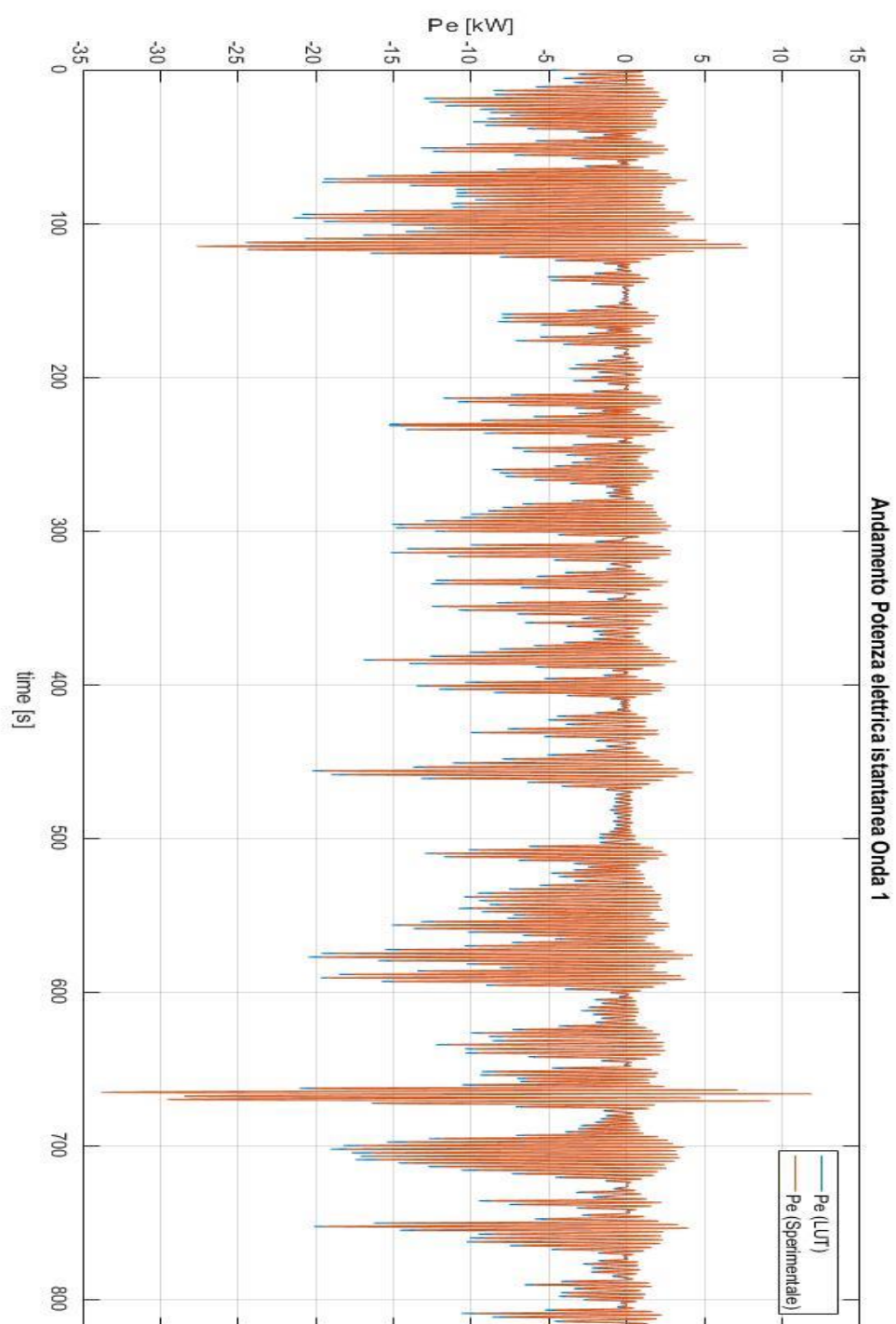


Figura 4.3 Confronto andamento Potenze elettriche (sperimentale – LUT) per Onda 1

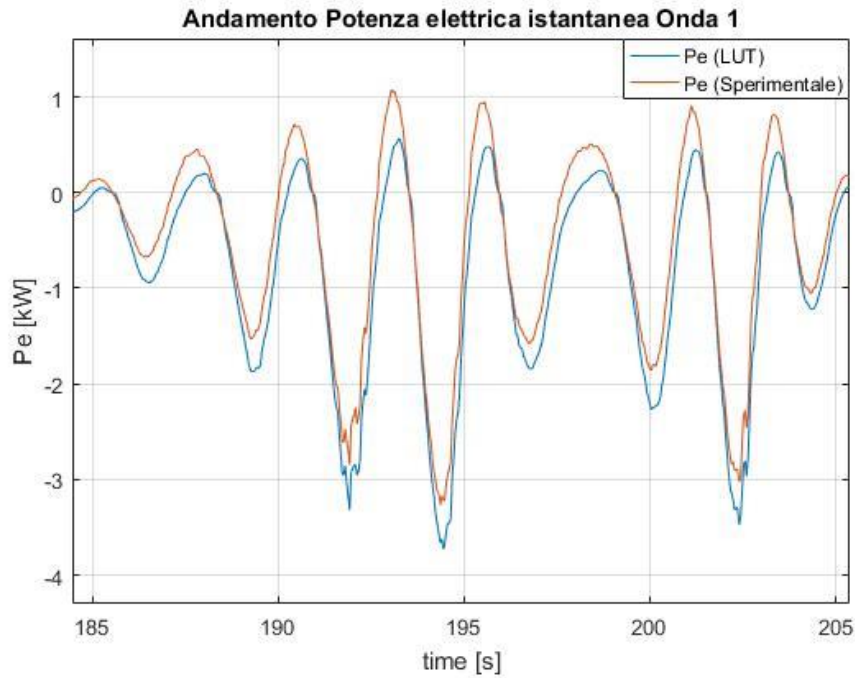


Figura 4.4 Dettaglio andamento Potenze elettriche Onda 1

La Look-Up Table contenente tutti i possibili valori di potenza elettrica definita nel dominio T_e e $\dot{\epsilon}$ lato generatore elettrico, è stata implementata nel modello meccanico Simulink. In questo modo è possibile avere una stima diretta della potenza elettrica prodotta usando direttamente il modello meccanico. La simulazione parametrica per la definizione dei parametri ottimali di controllo risulta particolarmente onerosa, per cui si è scelto di implementare questo metodo di calcolo in quanto garantisce una maggiore velocità computazionale rispetto all'implementazione di un modello Simulink più dettagliato della parte elettrica.

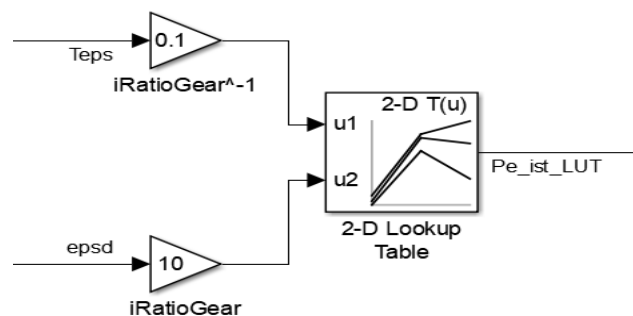


Figura 4.5 Calcolo Potenza elettrica nel modello meccanico

4.3 Stima di un sistema LTI

Per completezza, viene qui descritta un'altra strategia per il calcolo della potenza elettrica. L'idea è quella di stimare un sistema LTI che identifichi l'intero sistema ISWEC.

Tale stima può essere fatta usando il System Identification Toolbox di Matlab, il quale consente di stimare un sistema in diverse forme, dando come input i dati di ingresso e uscita che si hanno a disposizione. È stato scelto di stimare il sistema come una funzione di trasferimento, dando come input in ingresso le potenze meccaniche sperimentali e in uscita le potenze elettriche sperimentali delle nove onde che si hanno attualmente a disposizione.

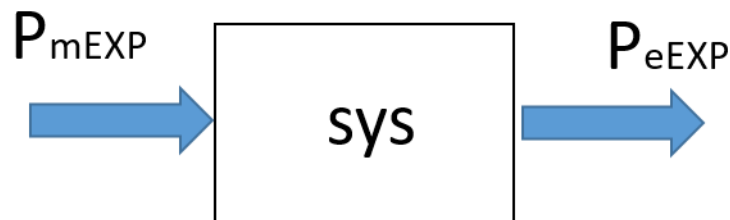


Figura 4.6 Stima sistema ISWEC con System Identification Toolbox

Scegliendo $n_p = 4$ e $n_z = n_p - 1$, si è ottenuta la seguente funzione di trasferimento:

$$sys(s) = \frac{539,1 s^3 + 2685 s^3 + 1658 s + 3,491}{s^4 + 403,1 s^3 + 3390 s^2 + 2115 s + 4,365} \quad (33)$$

Per tale funzione sono stati calcolati degli indici di bontà di approssimazione, che descrivono quanto la potenza elettrica calcolata con il sistema stimato differisce dalla potenza elettrica sperimentale data in input:

ONDA	1	2	4	5	9	10	11	12	13
FIT [%]	89,656	89,89	91,335	90,9	85,021	93,123	91,714	93,166	92,334

Tabella 4.3 Indici bontà di approssimazione del sistema sys per le onde sperimentali disponibili

Segue il corrispondente diagramma di Bode:

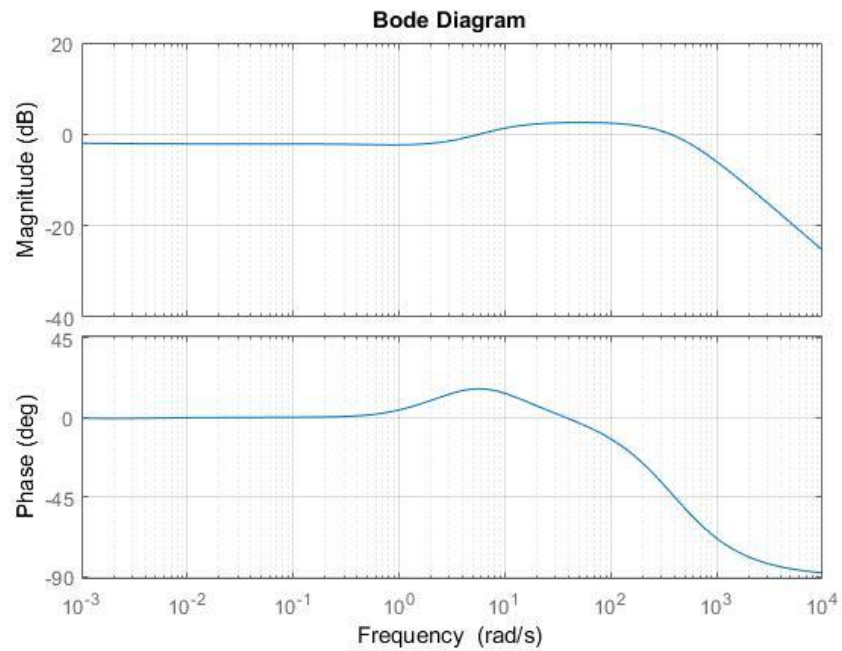


Figura 4.7 Diagramma di Bode della funzione di trasferimento $\text{sys}(s)$

Per valutare l'efficacia di questo metodo, è stata fatta un'analisi in frequenza del segnale in ingresso calcolandone lo spettro armonico usando l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform). A titolo di esempio, viene riportato solo lo spettro relativo alla prima onda, in quanto le armoniche significative sono circa le stesse per tutte le onde:

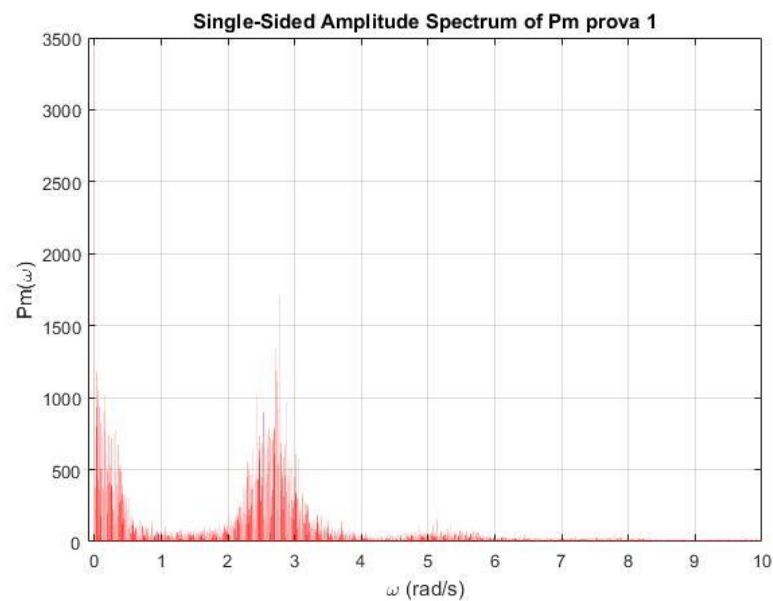


Figura 4.8 Spettro armonico Onda 1

Si osserva che la maggior parte delle armoniche significative che compongono il segnale sono caratterizzate da una frequenza minore di 10 rad/s. Dal diagramma di Bode del sistema, si vede che l'attenuazione massima a basse frequenze raggiunge i -1,97 dB, corrispondenti a 0,797. Anche per questo metodo sono stati calcolati gli errori relativi percentuali, usando la formula (27) in cui sono state sostituite le potenze calcolate col sistema stimato:

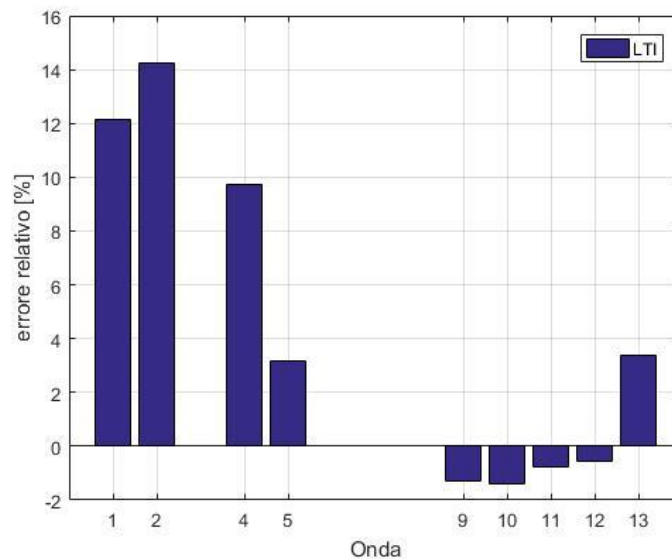


Figura 4.9 Errori relativi Potenze elettriche calcolate con sys(s) rispetto alle sperimentali

Il procedimento di calcolo della potenza elettrica per mezzo di una funzione di trasferimento viene per ora scartato, in quanto il numero di dati sperimentali a disposizione non consente di avere una stima sufficientemente affidabile tale per cui il sistema possa essere implementato nel modello meccanico.

5 STRATEGIE DI CONTROLLO

5.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Nei successivi paragrafi sarà presa in considerazione la mappa dei rendimenti in Figura 4.1. Assumendo il sistema lineare, l'interazione tra gli effetti idrodinamici sullo scafo e dei fenomeni giroscopici, induce una coppia sul PTO data dalla relazione [21]:

$$T_{\varepsilon}(t) = I_g \cdot \ddot{\varepsilon}(t) + J \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \dot{\delta}(t) \quad (34)$$

dove I_g è il momento di inerzia totale attorno all'asse ε , J è il momento di inerzia del giroscopio.

La legge di controllo attualmente in uso relativa alla coppia frenante applicata dal generatore elettrico è la seguente:

$$T_{\varepsilon}(t) = -k \cdot \varepsilon(t) - c \cdot \dot{\varepsilon}(t) \quad (35)$$

dove k è la costante di rigidezza, c è la costante di smorzamento. Dunque, la coppia è formata da un contributo proporzionale alla posizione angolare e uno proporzionale alla velocità angolare, entrambe relative al PTO. La potenza associata al PTO può essere regolata agendo sui parametri $\dot{\varphi}$, k e c . Nel seguito tale legge sarà associata al “Controllo 0”

La nuova legge di controllo verrà applicata per mezzo di una Look-Up Table implementata nel modello meccanico Simulink. L'obiettivo è quello di modificare la coppia frenante in funzione del punto di lavoro del generatore elettrico descritto dalle coordinate $(\dot{\varepsilon}, T_{\varepsilon})$ nel tempo il cui dominio è lo stesso definito per la mappa dei rendimenti. Quindi, dato in ingresso il punto di lavoro $(\dot{\varepsilon}, T_{\varepsilon})$ in un determinato istante, l'uscita sarà una funzione definita dalla logica scelta, e cioè un nuovo valore di coppia:

$$T_{\varepsilon OUT}(t) = f(\dot{\varepsilon}(t), T_{\varepsilon IN}(t)) \quad (36)$$

La funzione f , che rappresenta la nuova strategia di controllo di coppia, è anch'essa definita nello stesso dominio della mappa dei rendimenti, quindi esiste tra loro una corrispondenza biunivoca. Il dominio in esame può essere diviso in sottodomini, nei quali sono applicate diverse condizioni. Verranno in seguito proposte diverse strategie e, nella

maggior parte dei casi, f non è una funzione lineare, per cui non se ne può dare un'espressione analitica. La numerazione delle strategie è esclusivamente legata all'ordine temporale con cui sono state concepite. Esse quindi definiranno il “Controllo i -esimo”.

Dato che il calcolo verrà eseguito utilizzando il modello meccanico, è necessario applicare il rapporto di trasmissione ($iRatioGear = 10$) a coppia e velocità per entrare nel dominio del generatore elettrico.

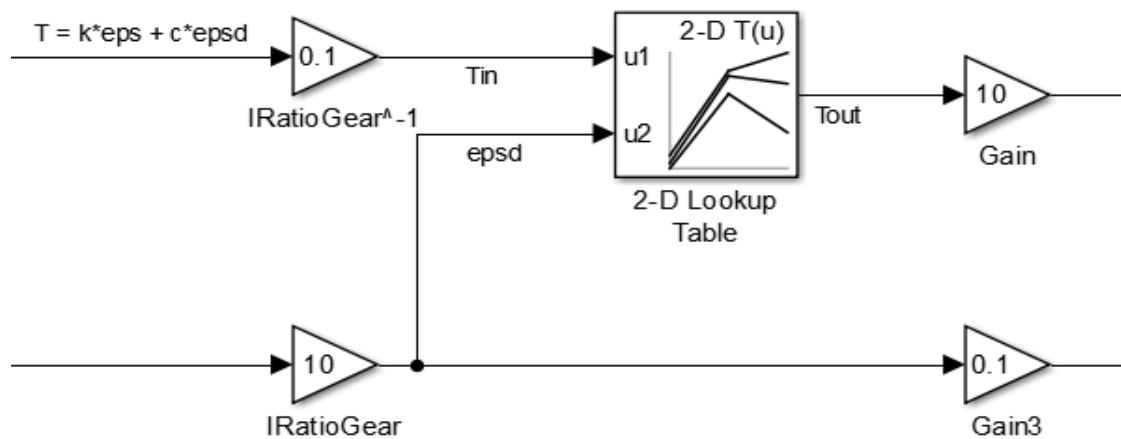


Figura 5.1 Applicazione della nuova strategia di controllo in Simulink del blocco “Controller” del modello meccanico

In questo capitolo, verrà inizialmente presentata la logica delle diverse strategie di controllo. Successivamente, sarà mostrato come esse agiscono mediante il *Controllo i -esimo* su un caso puramente teorico e sull'onda di progetto.

5.2 LOGICHE DI CONTROLLO

5.2.1 T_NEW_1

La legge T_NEW_1 sostanzialmente fa in modo che il sistema non vada a lavorare nei sottodomini in cui il rendimento risulta negativo o molto piccolo.

Data la mappa dei rendimenti di Figura 4.1, si vuole fare in modo che il punto di lavoro, definito dalle coordinate T_ε e $\dot{\varepsilon}$, non sia nelle zone colorate in blu della mappa e che vada in una zona dove si hanno rendimenti accettabili. Se il punto di lavoro fosse nella zona blu, in funzione del valore di velocità $\dot{\varepsilon}$, $T_{\varepsilon OUT}$ sarà una frazione di $T_{\varepsilon IN}$, cioè:

$$T_{\varepsilon OUT} = k_{T_{\varepsilon NEW}} \cdot T_{\varepsilon IN} \quad (37)$$

dove $0 < k_{T_{\varepsilon NEW}} < 1$. Per esempio, nel punto di lavoro $T_{\varepsilon IN} = -7625 \text{ Nm}$, $\dot{\varepsilon} = 3,496 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, il rendimento risulta $\eta = -0,107$. Per cui, assumendo un $k_{T_{\varepsilon NEW}} = 0.21$, per la stessa $\dot{\varepsilon}$, $T_{\varepsilon OUT} = -1601,25 \text{ Nm}$, dove il rendimento diventa circa $\eta = 0.76$.

Per questa legge è necessario definire due parametri:

- **eta_max**: rendimento massimo fino al quale viene modificato il valore di coppia.
- **k_T_new**: coefficiente riduttivo della coppia in ingresso.

Nelle zone dove il rendimento è maggiore di eta_max (zone in giallo), la coppia in ingresso non viene modificata.

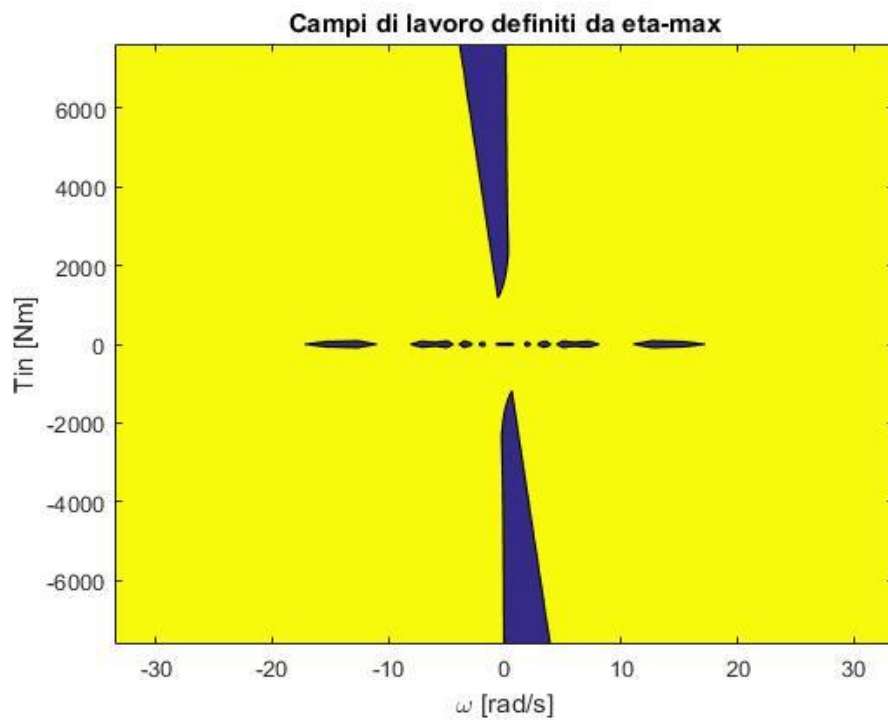


Figura 5.2 Sottodomini definiti per $\eta_{\max} = 0,21$

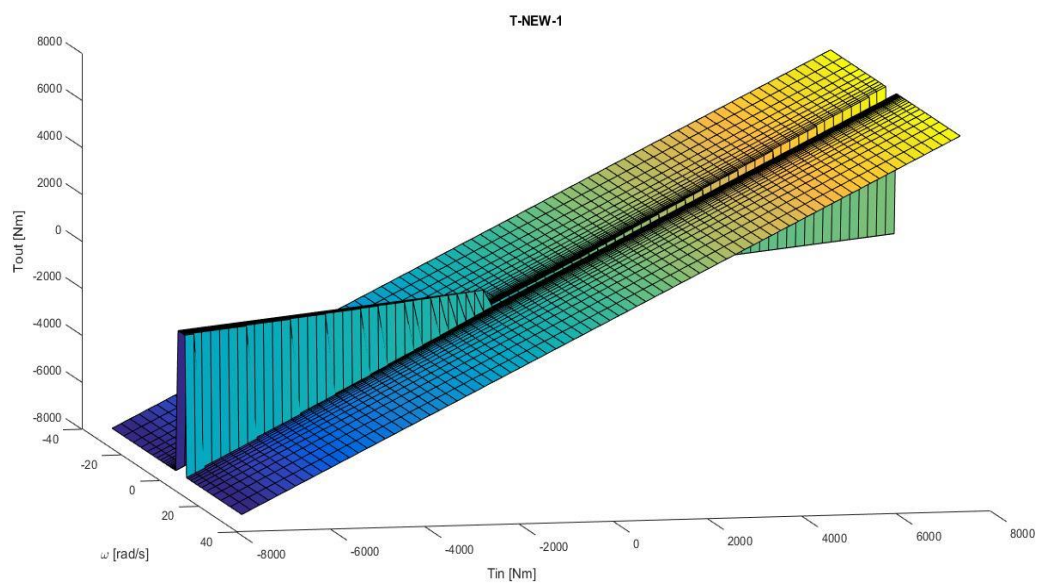


Figura 5.3 Funzione T_NEW_1 con $\eta_{\max} = 0,1$ e $k_{T_new} = 0,21$

5.2.2 T_{NEW_2}

La logica della seguente strategia è la seguente: viene scelto un valore di rendimento che definisce delle curve iso-rendimento, descrivendo a loro volta due sottodomini. Nei sottodomini in cui il rendimento sia maggiore del valore scelto, la coppia resta invariata. Altrimenti, in funzione del valore di velocità, la coppia in uscita sarà quella che interseca la iso-rendimento. In pratica si fissano dei limiti superiori e inferiori della zona di lavoro in funzione del rendimento selezionato.

È necessario allora definire:

- **eta_min:** valore di rendimento sopra il quale i valori di coppia in uscita sono uguali a quelli in ingresso.

Nei campi in giallo ($\eta > \text{eta_min}$), la coppia in uscita è uguale alla coppia in ingresso; nei campi in viola ($\eta < \text{eta_min}$), la coppia in uscita corrisponde al valore di coppia in corrispondenza delle iso-rendimento, in funzione della velocità. Si vuole osservare che la zona a coppia nulla rappresenta la linea di confine tra il funzionamento da motore o generatore. Qualunque sia il rendimento calcolato in quella zona, anche se negativo, la potenza elettrica calcolata risulta nulla, in quanto nulla è la coppia e quindi la potenza meccanica.

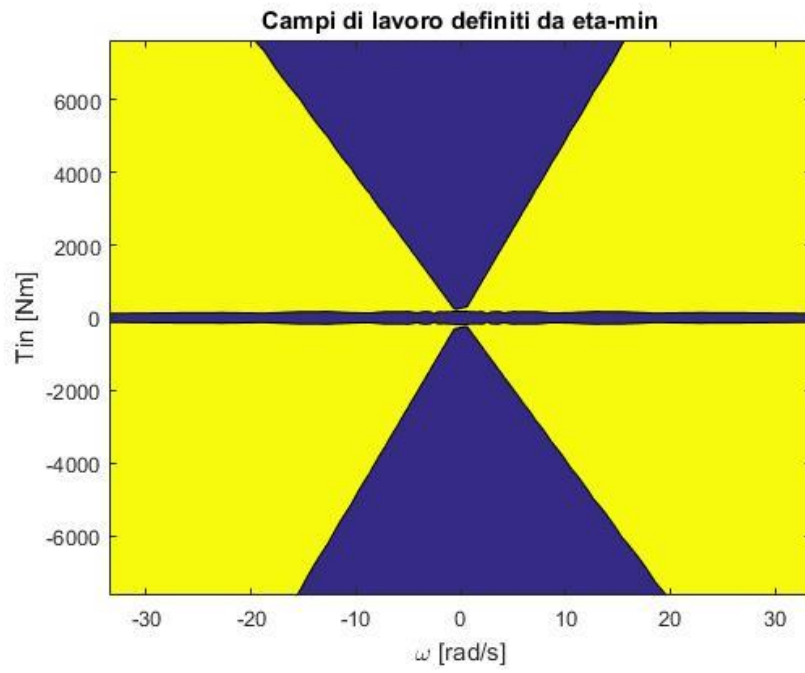


Figura 5.4 Sottodomini definiti da $\eta_{min}=0,8$

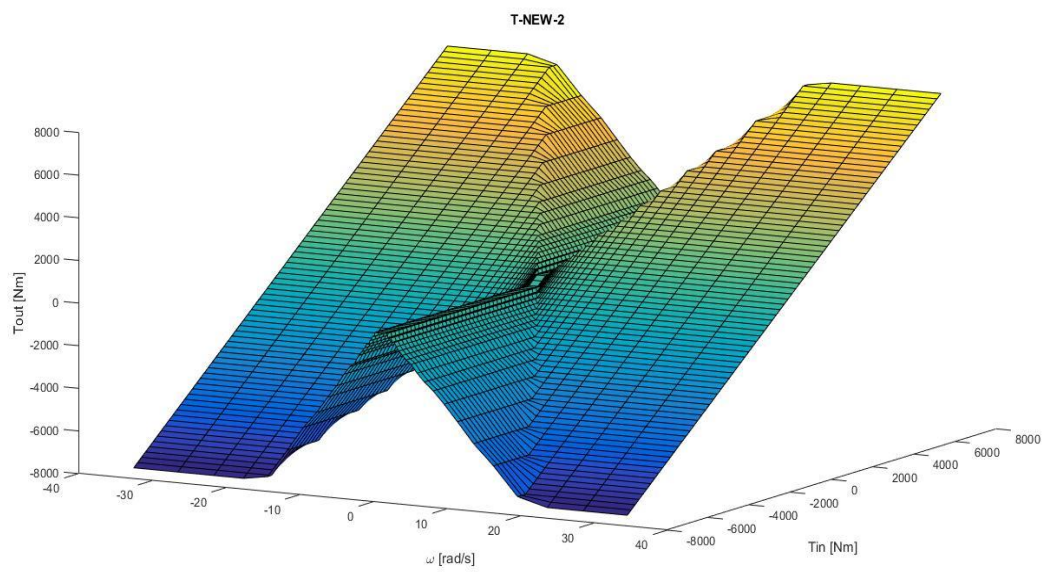


Figura 5.5 Strategia T_NEW_2 con $\eta_{min} = 0,8$

5.2.3 T_NEW_3

Questa strategia è simile alla precedente, con la differenza che si vuole ridurre la coppia nei quadranti di funzionamento da motore, cercando di mantenere il più possibile il punto di lavoro nei quadranti di funzionamento da generatore. Si definisce:

- **eta_min**: valore di rendimento sopra il quale i valori di coppia in uscita sono uguali a quelli in ingresso.
- **k_T_new**: coefficiente riduttivo della coppia in ingresso applicato ai quadranti 1 e 3.

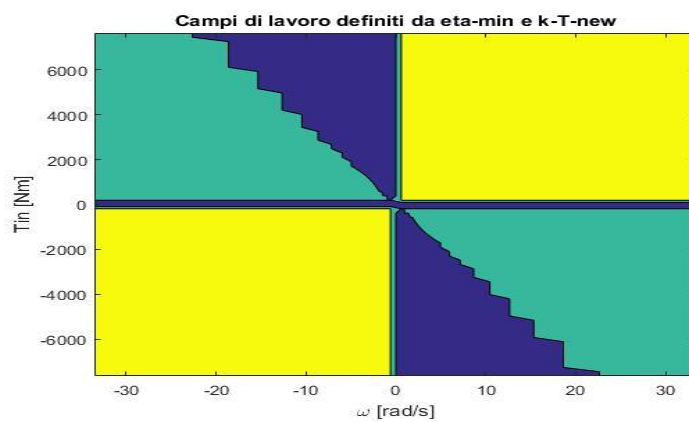


Figura 5.6 Sottodomini definiti da $\eta_{\min} = 0,8$

In questo caso, la coppia viene ridotta dove la macchina funziona da motore, quindi primo e terzo quadrante (indicati in giallo). Nel campo verde, le coppie in uscita sono uguali alle coppie in ingresso, mentre nel campo viola la coppia in uscita corrisponde al valore di coppia in corrispondenza delle iso-rendimento, in funzione della velocità.

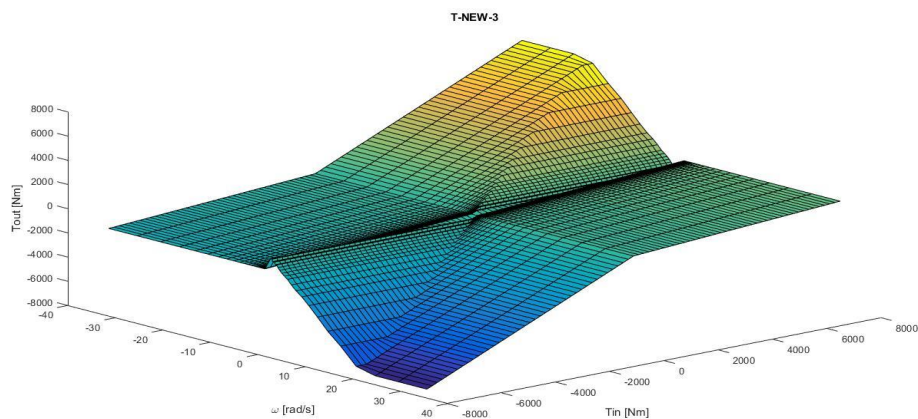


Figura 5.7 Funzione T_NEW_3 con $\eta_{\min} = 0,8$ e $k_T_new = 0,15$

5.2.4 T_NEW_4

La seguente legge segue l'andamento di una spezzata, la quale presenta due tratti a coppia costante, corrispondenti al massimo e al minimo di coppia, e un tratto inclinato in un intervallo di velocità scelto, valido per tutti i quadranti. Successivamente, nei quadranti di funzionamento come motore, si è applicato un coefficiente riduttivo che riduca il campo di coppia in uscita.

Si definisce:

- **dw**: intervallo di velocità positivo.

Il tratto inclinato della spezzata è definito quindi nell'intervallo $[-dw; dw]$. La funzione spezzata quindi è definita come:

$$\begin{cases} T_{\varepsilon OUT} = -T_{max} \cdot \frac{\dot{\varepsilon}}{dw} \text{ per } \dot{\varepsilon} \in [-dw; dw] \\ T_{\varepsilon OUT} = T_{max} \text{ per } \dot{\varepsilon} \in [\dot{\varepsilon}_{min}; -dw] \\ T_{\varepsilon OUT} = T_{min} \text{ per } \dot{\varepsilon} \in [dw; \dot{\varepsilon}_{max}] \end{cases} \quad (38)$$

- **k_T_new**: coefficiente riduttivo della coppia in uscita applicato ai quadranti 1 e 3.

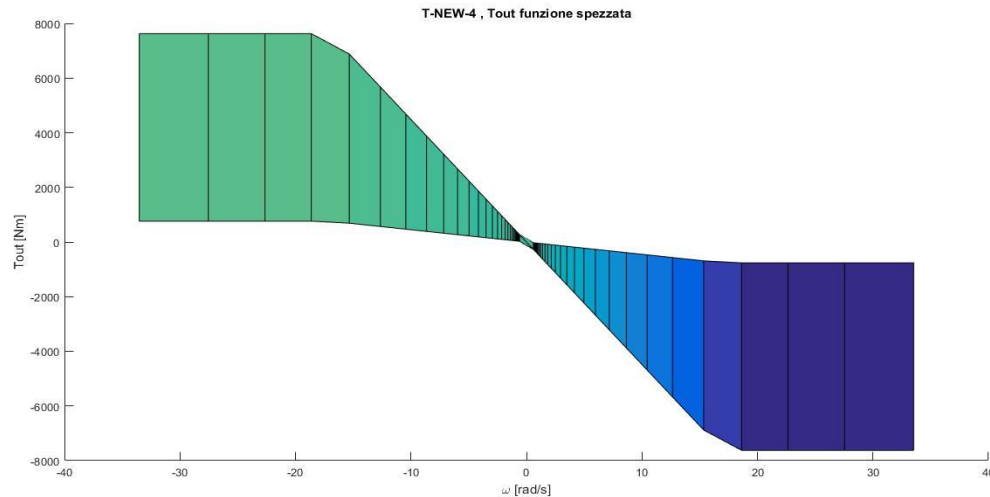


Figura 5.8 Funzione T_NEW_4 con $dw = 17$ e $k_T_new = 0,1$

Si possono osservare due profili: quello più ampio corrisponde ai quadranti di funzionamento da generatore, l'altro quello nei quadranti di funzionamento da motore.

5.2.5 T_NEW_5

Questa strategia unisce la T_NEW_1 e la T_NEW_2 e in più si chiede la massima coppia disponibile nelle zone in cui la potenza è maggiore di un valore scelto. L'idea è quella di combinare le idee precedenti in modo opportuno e tentare di estrarre la coppia massima nei quadranti in cui si lavora da generatore. Per cui bisogna definire:

- **P_k [W]**: valore di potenza elettrica che definisce la curva iso-potenza;
- **η_{max}** : rendimento massimo che tiene conto della zona a bassi rendimenti;
- **$k_{\eta_{max}}$** : coefficiente riduttivo della coppia dove $\eta < \eta_{max}$;
- **η_{min}** : rendimento minimo che tiene conto della zona ad alti rendimenti;
- **$k_{\eta_{min}}$** : coefficiente da applicare alla coppia dove $\eta > \eta_{min}$;

I sottodomini di funzionamento risultano i seguenti:

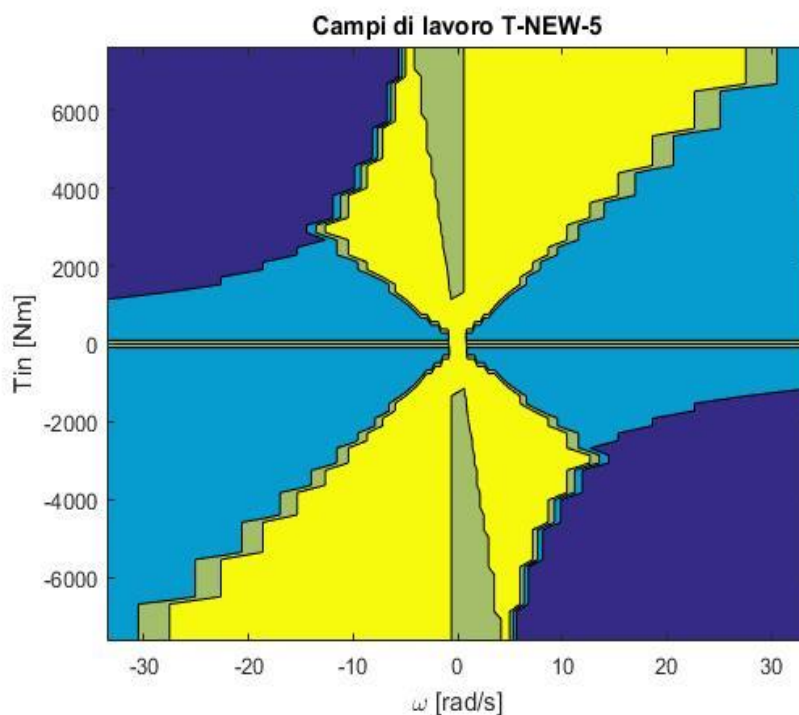


Figura 5.9 Campi di lavoro definiti da $P_k = 40000$ W, $\eta_{min} = 0,89$, $\eta_{max} = 0$

La zona viola è quella dove è stata applicata la condizione P_k , la verde è relativa a η_{max} , l'azzurra è relativa a η_{min} . La zona gialla è quella in cui non sono state applicate condizioni.

5.2.6 T_NEW_6

Questa strategia combina la mappa delle coppie in ingresso con la mappa dei rendimenti. In uscita si avrà una coppia che dipende dal rendimento in un determinato punto di funzionamento:

$$T_{\varepsilon OUT}(\dot{\varepsilon}, T_{\varepsilon IN}) = T_{\varepsilon IN} \cdot \frac{\eta(\dot{\varepsilon}, T_{\varepsilon IN})}{\eta_{max}(\dot{\varepsilon})} \quad (39)$$

Inoltre, si annulla la coppia in uscita nelle zone di funzionamento a rendimento negativo.

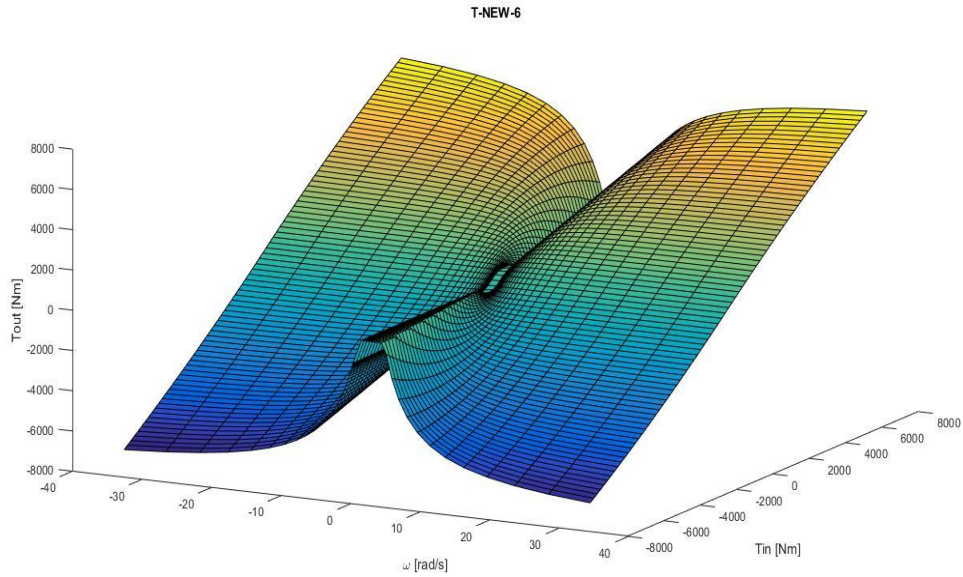


Figura 5.10 Funzione T_NEW_6

5.2.7 T_NEW_7

Questa strategia unisce la T_NEW_1 e la T_NEW_2 . Definisco:

- **eta_min**: valore di rendimento sopra il quale la coppia resta invariata;
- **eta_max**: rendimento massimo che tiene conto dei bassi rendimenti;
- **k_eta_max**: coefficiente riduttivo della coppia.

Nei sottodomini verdi, si segue la logica della funzione T_NEW_1 ; nei sottodomini gialli, si segue la logica della funzione T_NEW_2 ; in quelli viola, la coppia resta invariata.

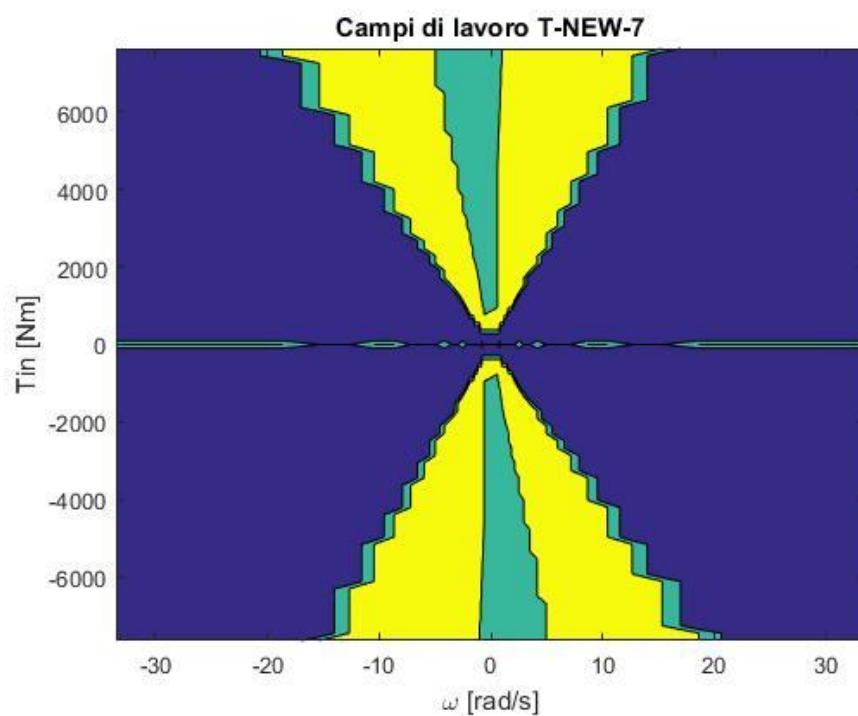


Figura 5.11 Sottodomini definiti da $\eta_{\min} = 0,8$, $\eta_{\max} = 0,4$

5.2.8 T_NEW_8

Questa strategia semplicemente annulla la coppia nei quadranti di funzionamento da motore. Nei quadranti di funzionamento da generatore, resta invariata.

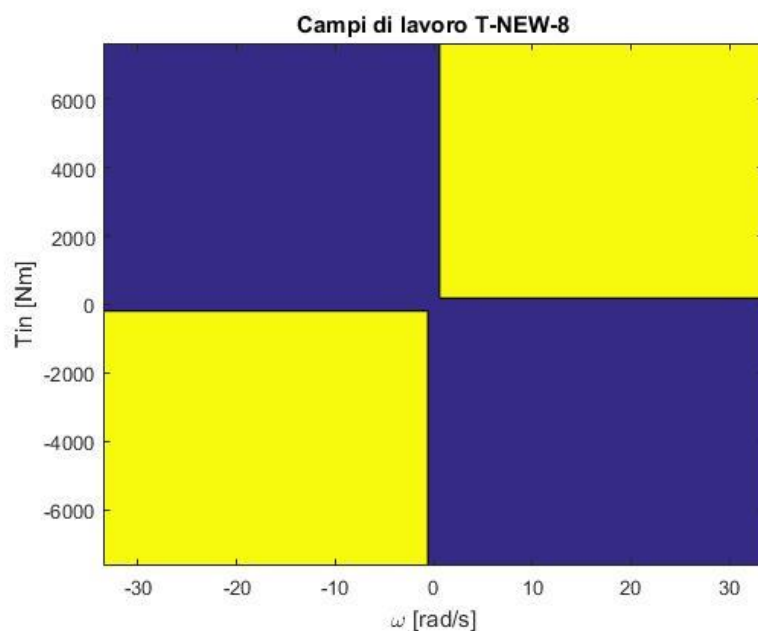


Figura 5.12 Sottodomini di funzionamento da motore (giallo) e generatore (viola)

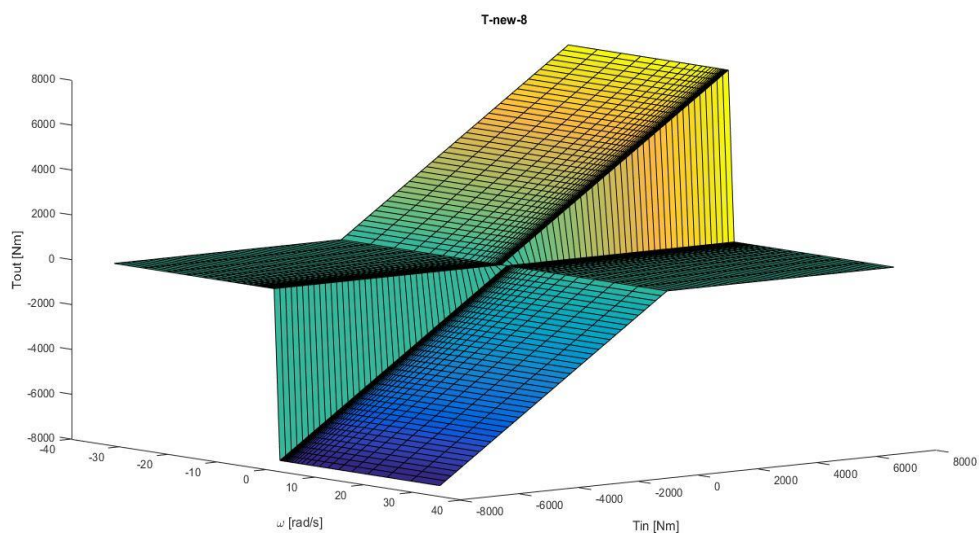


Figura 5.13 Funzione T_NEW_8

5.3 ANDAMENTO DEL PUNTO DI LAVORO

Nel seguente paragrafo, sarà descritto come le varie strategie agiscono e influenzano l'andamento della coppia inizialmente su un caso puramente teorico, per il quale si fanno le seguenti ipotesi:

- T_ε e $\dot{\varepsilon}$ funzioni sinusoidali regolari teoriche;
- Assenza di dinamica meccanica
- Assenza di transitorio iniziale

L'assenza di dinamica meccanica di fatto disaccoppia la velocità dalla coppia. Quindi l'andamento di $\dot{\varepsilon}$ resta invariato, mentre quello di T_ε dipende dalla strategia scelta. Tale andamento verrà poi riproposto includendo i fenomeni meccanici.

5.3.1 Controllo 0

Si definiscano T_ε e $\dot{\varepsilon}$, coppia e velocità meccaniche all'albero del generatore elettrico, sinusoidali periodiche di periodo $T = 4$ s in un intervallo di funzionamento di $t = 100$ s, di valori di picco e angolo di fase scelti arbitrariamente compatibili con il dominio di funzionamento del generatore elettrico:

$$T_{\varepsilon IN}(t) = 5000 \cdot \sin \omega t \text{ Nm} \quad (40)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = 15 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \text{ rad/s} \quad (41)$$

dove $\varphi = \pi/4$. L'andamento del punto di lavoro nel piano $\dot{\varepsilon} - T_\varepsilon$ in queste condizioni descrive un'ellisse regolare:

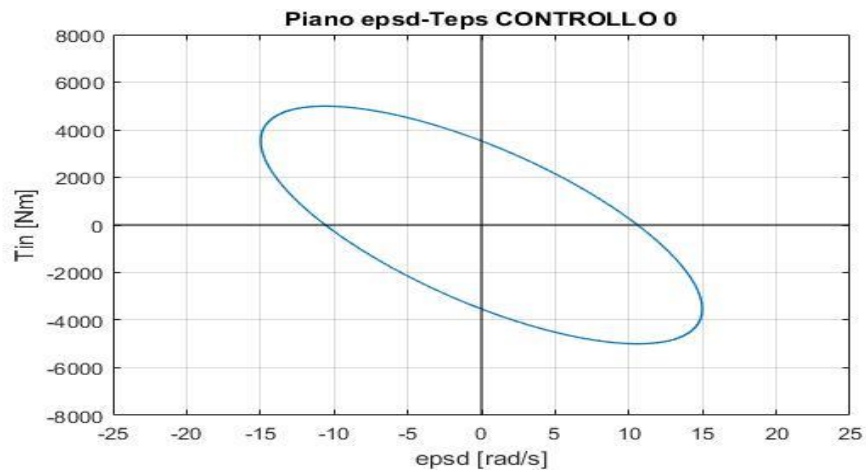


Figura 5.14 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 0

Questa rappresentazione dà un'idea teorica dell'andamento delle grandezze meccaniche imposte da un convertitore di moto ondoso in ingresso a un generatore elettrico con il Controllo 0. Come si può osservare, il moto oscillatorio include il funzionamento della macchina elettrica sia come generatore (utile alla produzione) sia come motore. La traiettoria perfettamente ellittica è dovuta all'assunzione di assenza di dinamica meccanica e assenza di transitorio iniziale.

Si vuole a questo punto descrivere un caso più vicino alla realtà. Si eliminano le ipotesi di idealità fatte in precedenza, introducendo quindi i fenomeni meccanici. L'interesse si focalizzerà esclusivamente sulle grandezze meccaniche applicate al PTO, dando in ingresso un'onda irregolare caratterizzata da periodo energetico T_e e altezza significativa H_s , precedentemente definiti. I fenomeni meccanici intermedi non sono interesse di questa tesi. Il risultato sarà delle T_e e $\dot{\epsilon}$ non periodiche.

In questo paragrafo verrà considerata l'onda irregolare di progetto, definita da:

Periodo energetico	T_e	[s]	5.29
Altezza significativa	H_s	[m]	1.75
Indice d'onda	Index	//	27

applicando i parametri di controllo nominali:

Velocità volano	$\dot{\phi}$	[rad/s]	20.944
Costante di smorzamento	c	[Nm/rad/s]	34000
Costante di rigidità	k	[Nm/rad]	34000

Si considera l'andamento di T_ε e $\dot{\varepsilon}$ di un solo giroscopio, essendo quelli del secondo giroscopio diversi solo per il segno, in un ciclo di 20 minuti.

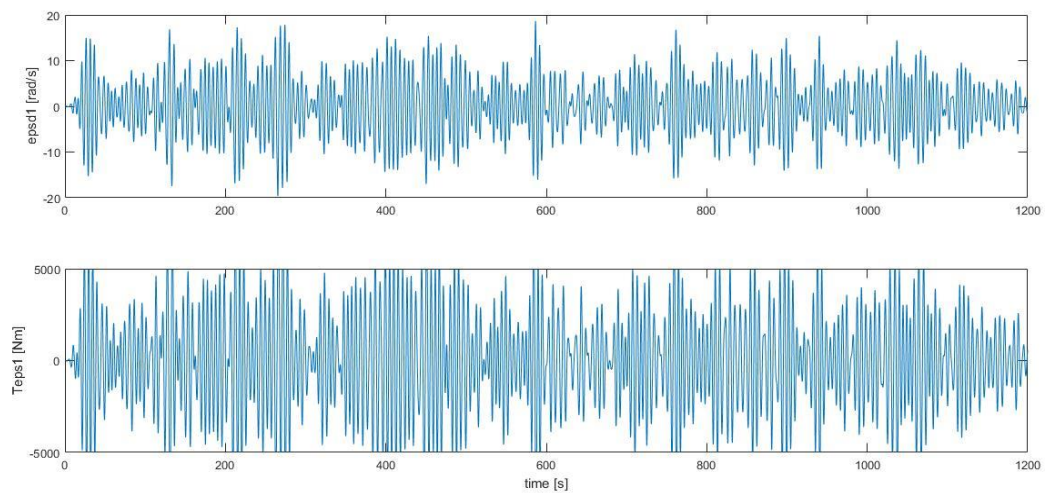


Figura 5.15 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 0 - Onda 27

da cui risulta l'andamento del punto di lavoro:

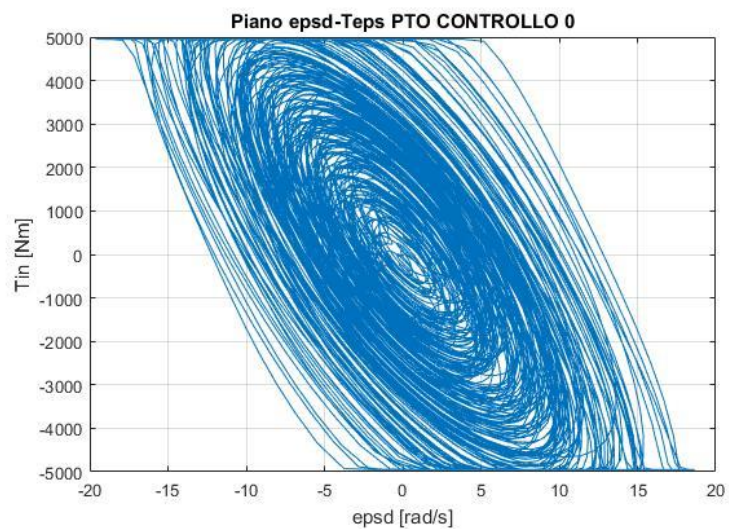


Figura 5.16 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 0 - Onda 27

Si osserva come l'andamento segue un'ellisse in modo fortemente irregolare, per cui non è possibile dare una descrizione analitica dell'andamento. Si nota anche la saturazione di coppia a 5 kNm, che sul lato meccanico corrisponde a 50 kNm, imposta per limitare le sollecitazioni sui componenti.

Successivamente si vedrà come le nuove strategie modificano tale andamento.

5.3.2 Controllo 1

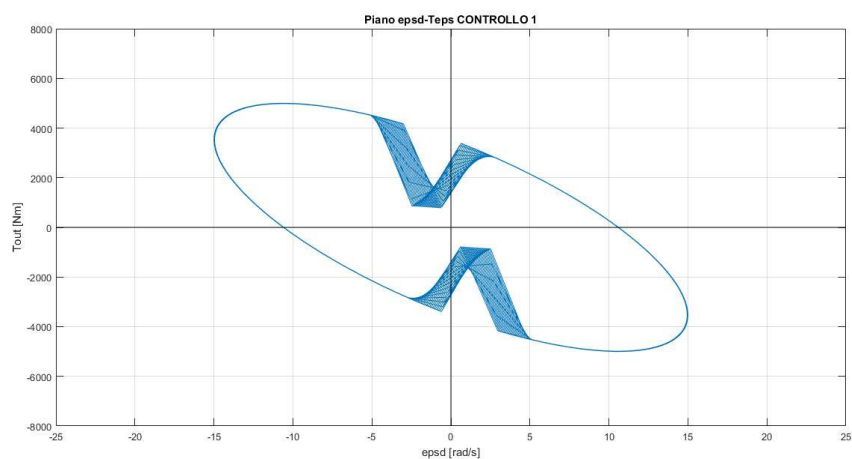


Figura 5.17 Traiettorie teorica del punto di lavoro con Controllo 1

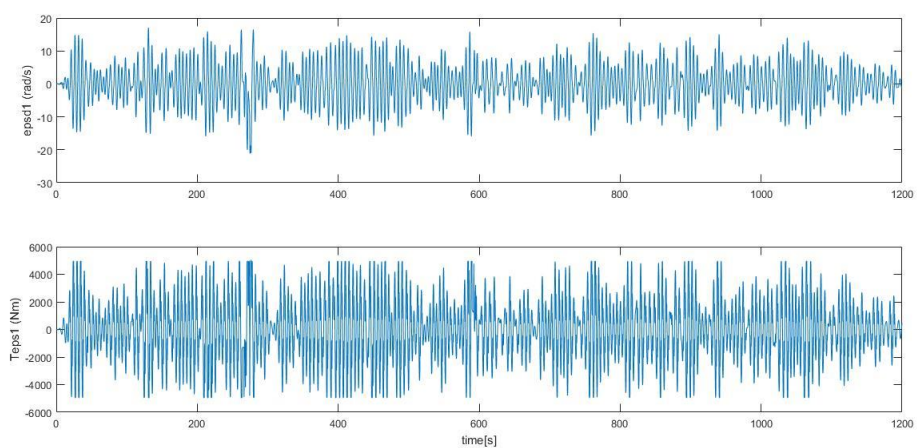


Figura 5.18 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 1 - Onda 27

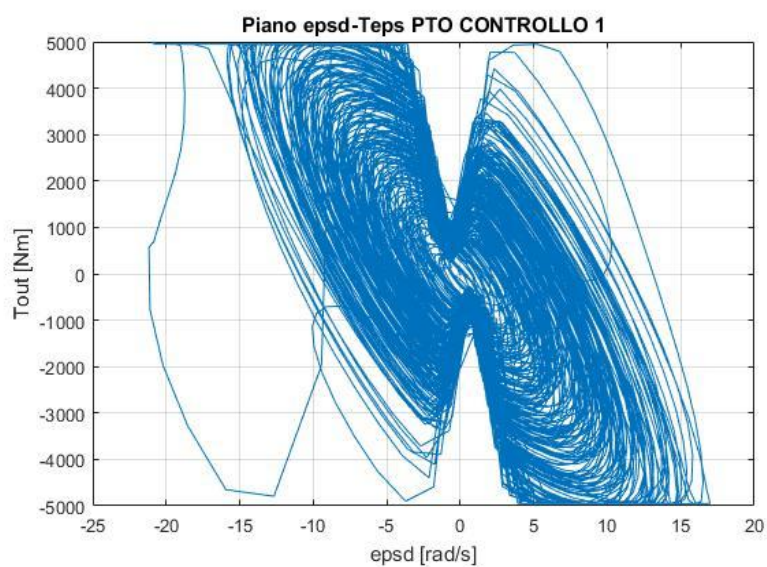


Figura 5.19 Traiettorie del punto di lavoro con Controllo 1 - Onda 27

5.3.3 Controllo 2

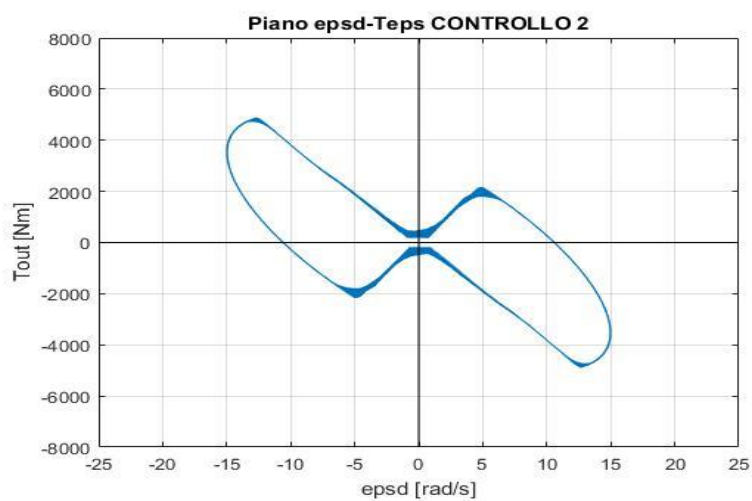


Figura 5.20 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 2

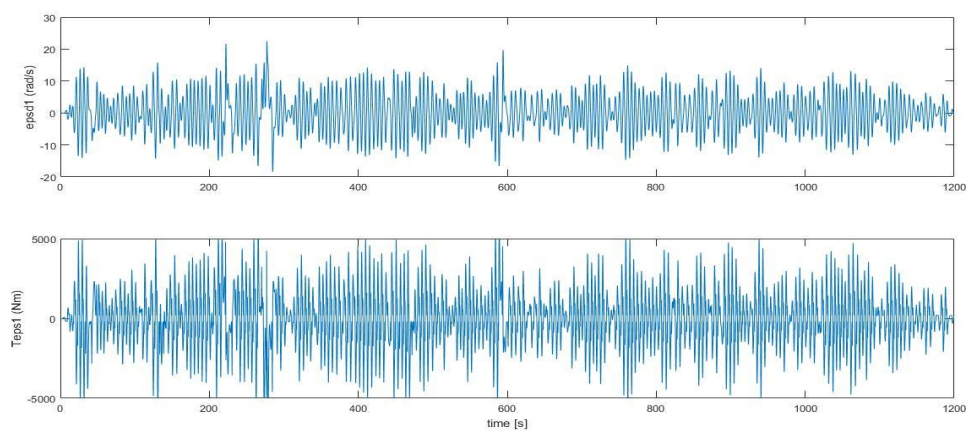


Figura 5.21 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 2 - Onda 27

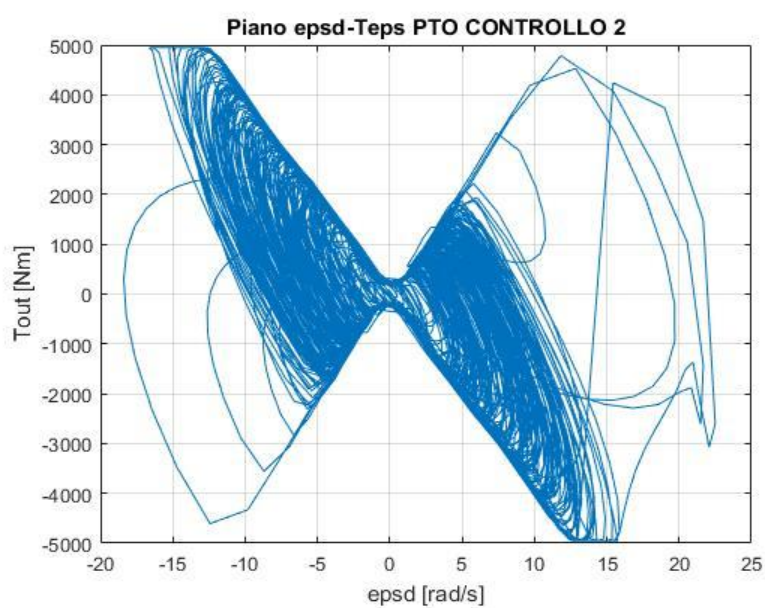


Figura 5.22 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 2 - Onda 27

5.3.4 Controllo 3

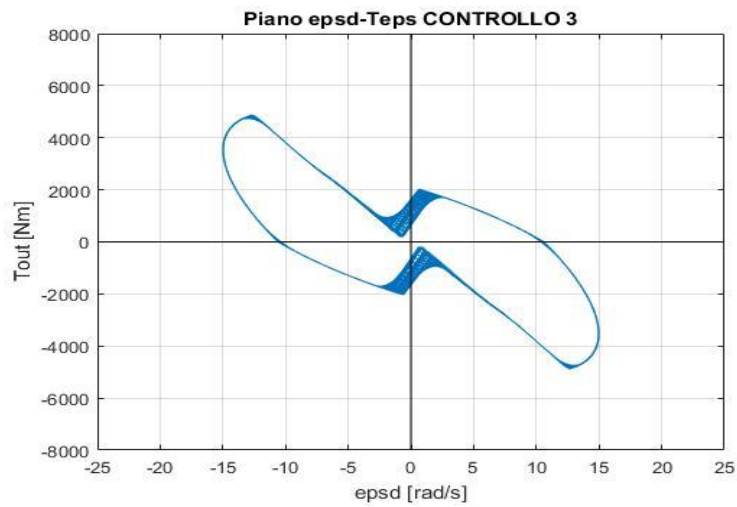


Figura 5.23 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 3

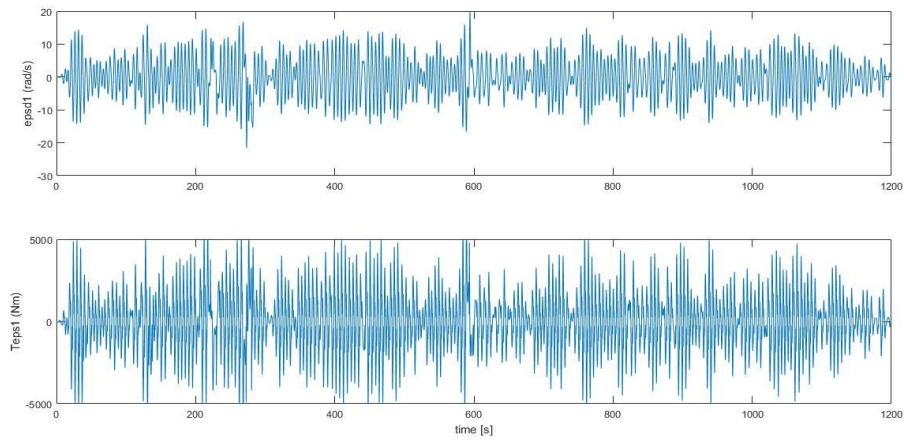


Figura 5.24 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 3 - Onda 27

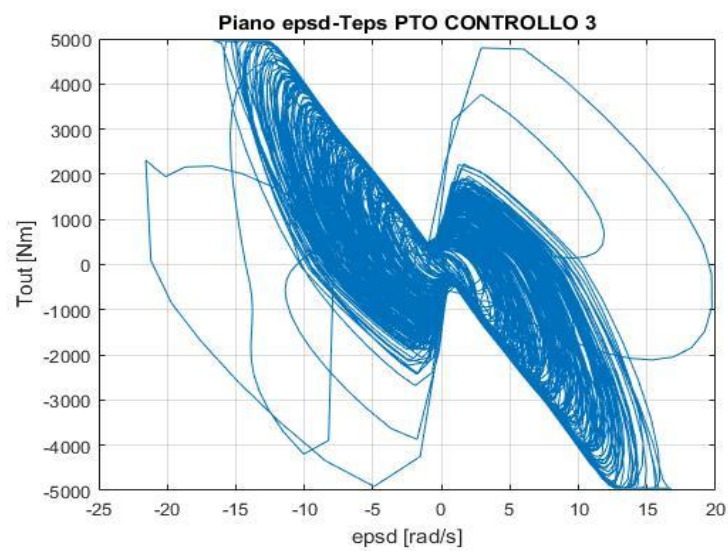


Figura 5.25 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 3 - Onda 27

5.3.5 Controllo 4

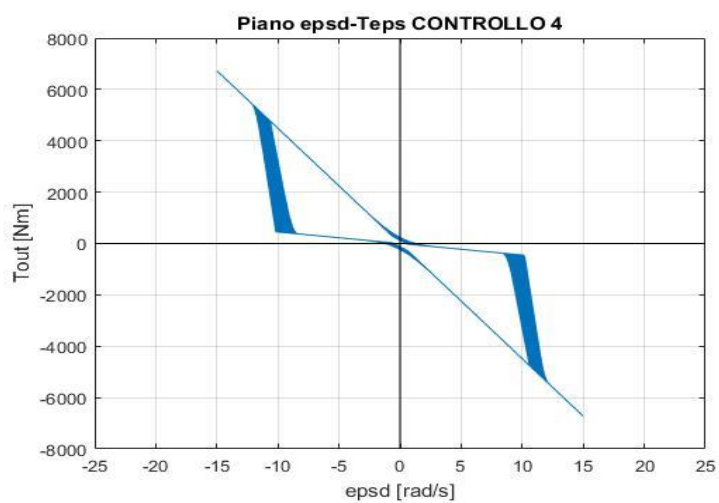


Figura 5.26 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 4

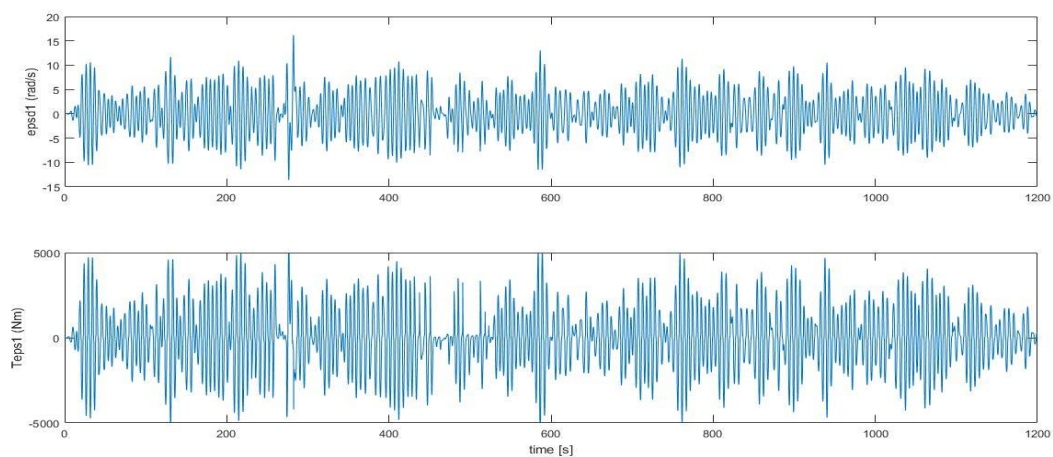


Figura 5.27 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 4 - Onda 27

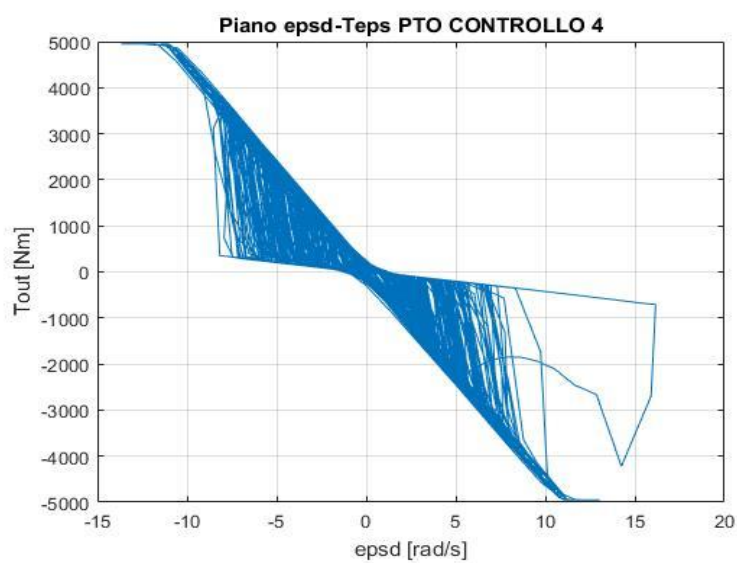


Figura 5.28 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 4 - Onda 27

5.3.6 Controllo 5

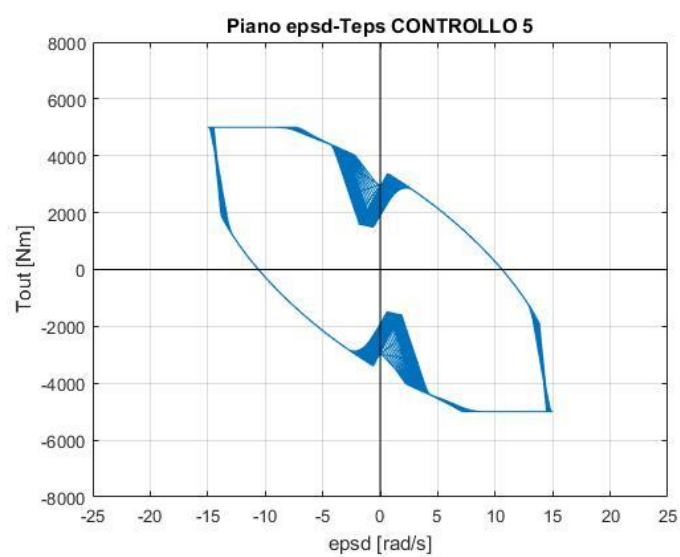


Figura 5.29 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 5

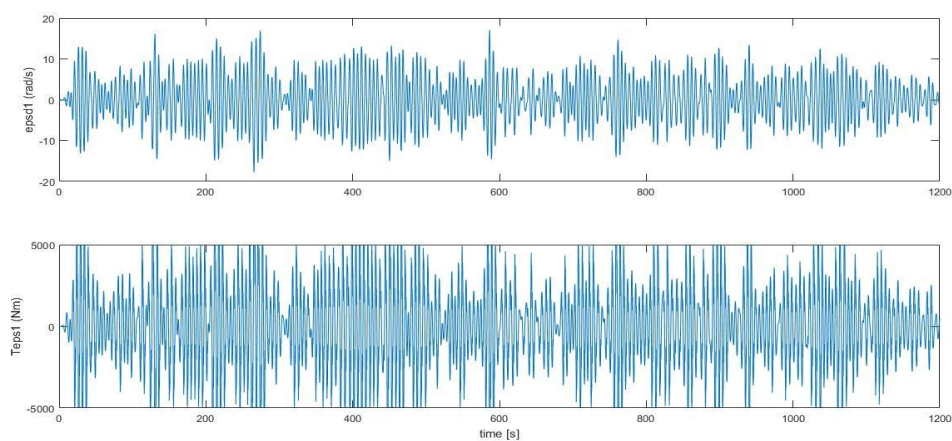


Figura 5.30 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 5 - Onda 27

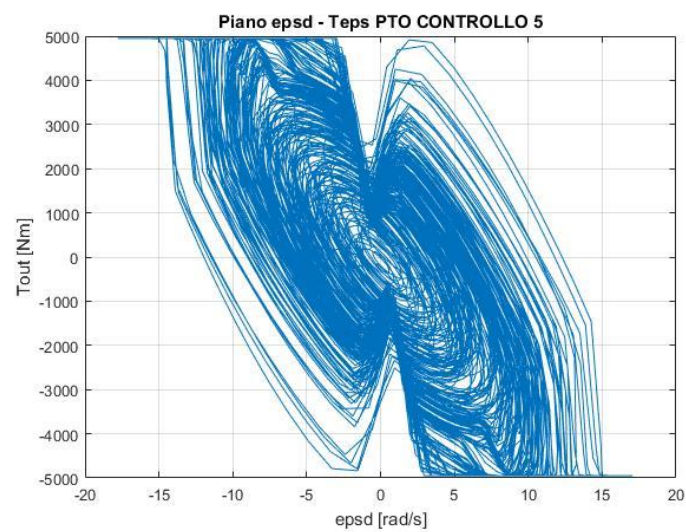


Figura 5.31 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 5 - Onda 27

5.3.7 Controllo 6

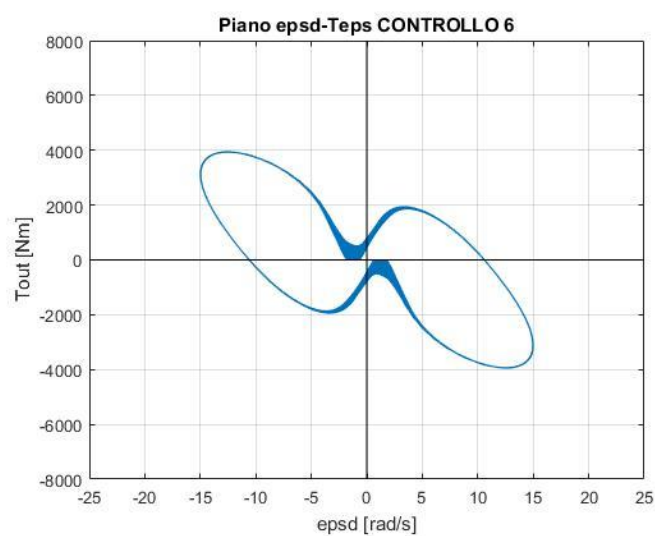


Figura 5.32 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 6

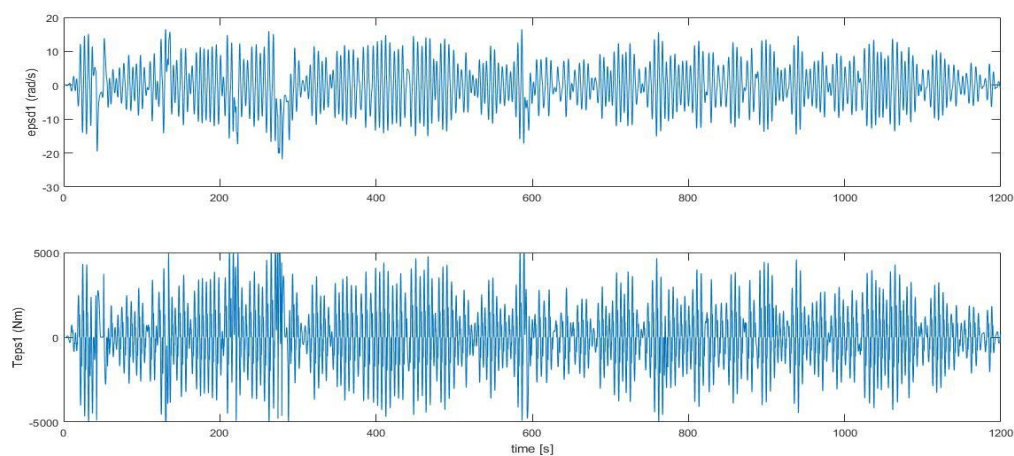


Figura 5.33 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 6 - Onda 27

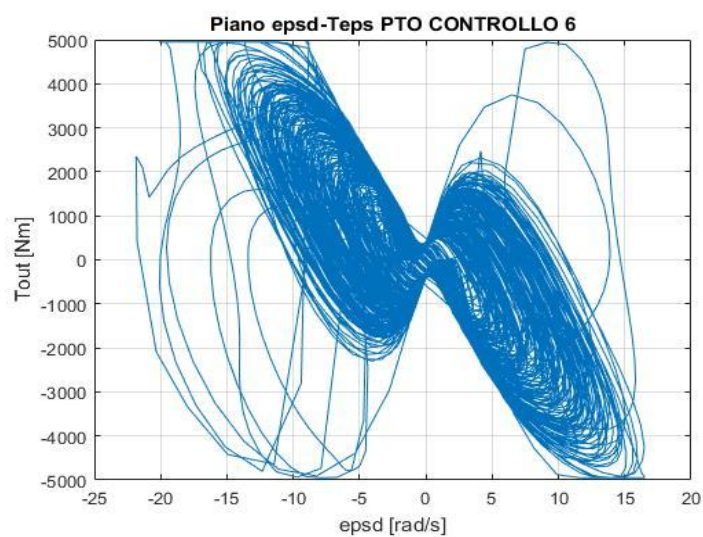


Figura 5.34 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 6 - Onda 27

5.3.8 Controllo 7

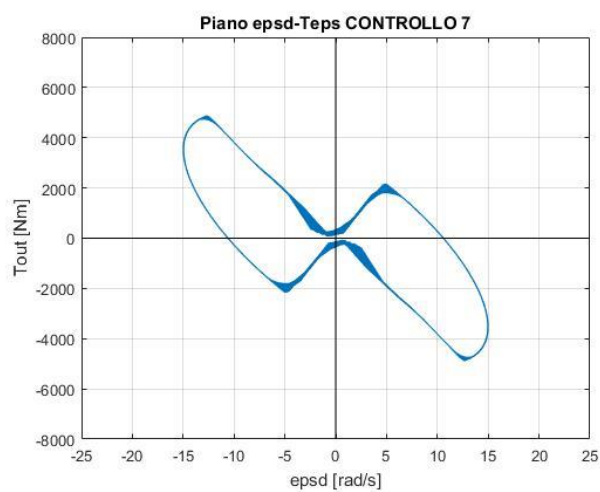


Figura 5.35 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 7

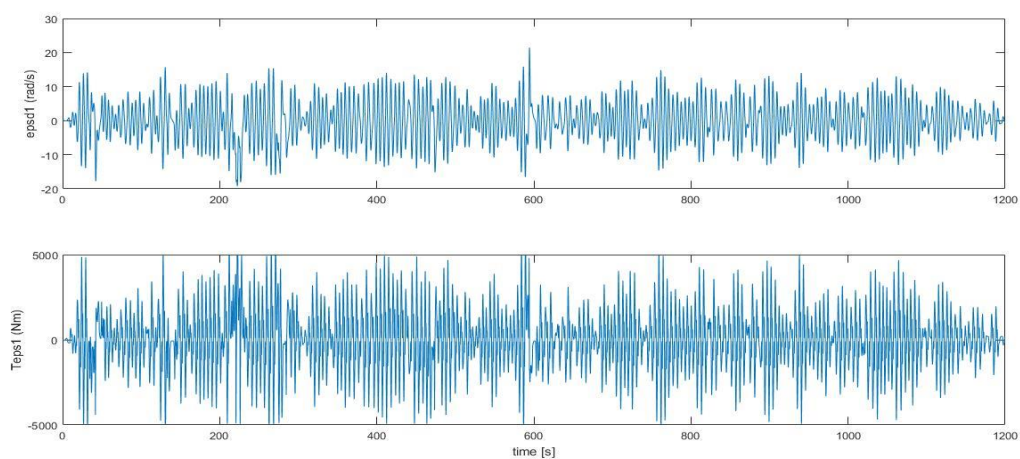


Figura 5.36 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 7 - Onda 27

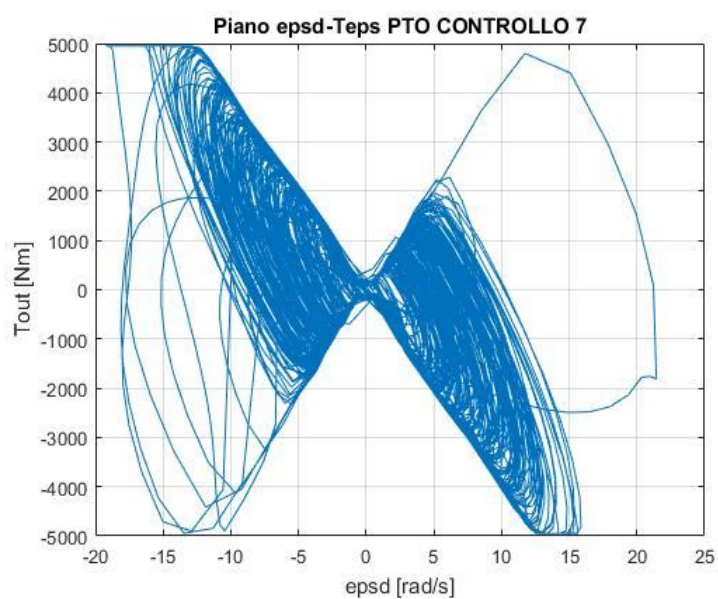


Figura 5.37 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 7 - Onda 27

5.3.9 Controllo 8

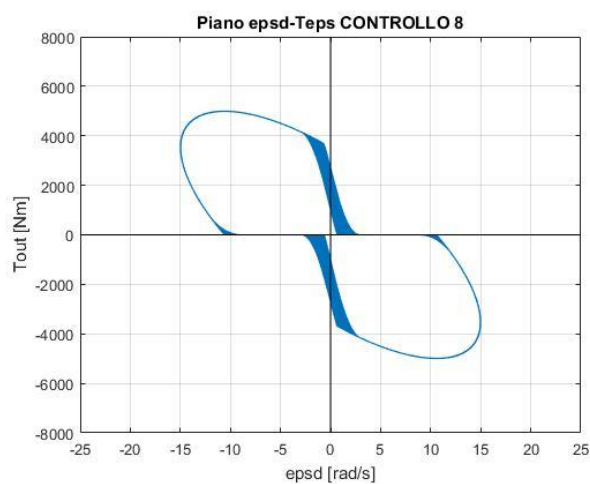


Figura 5.38 Traiettoria teorica del punto di lavoro con Controllo 8

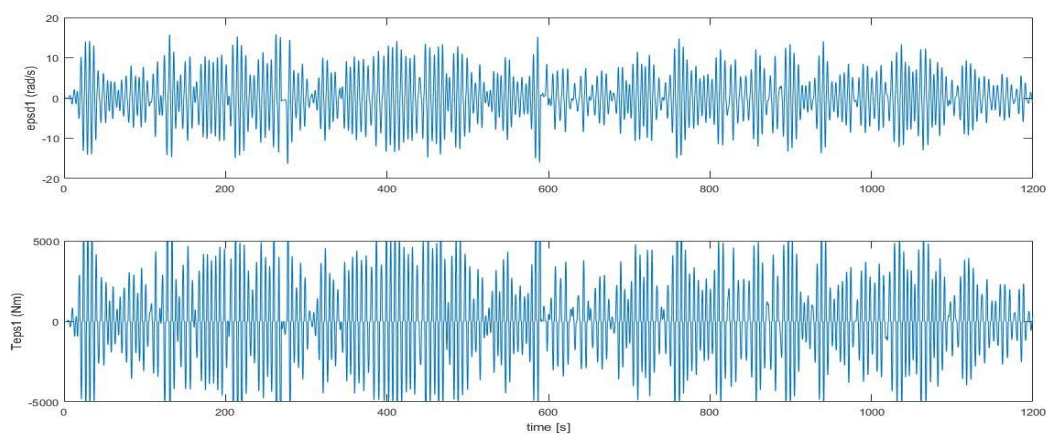


Figura 5.39 Velocità e coppia al PTO lato elettrico con Controllo 8 - Onda 27

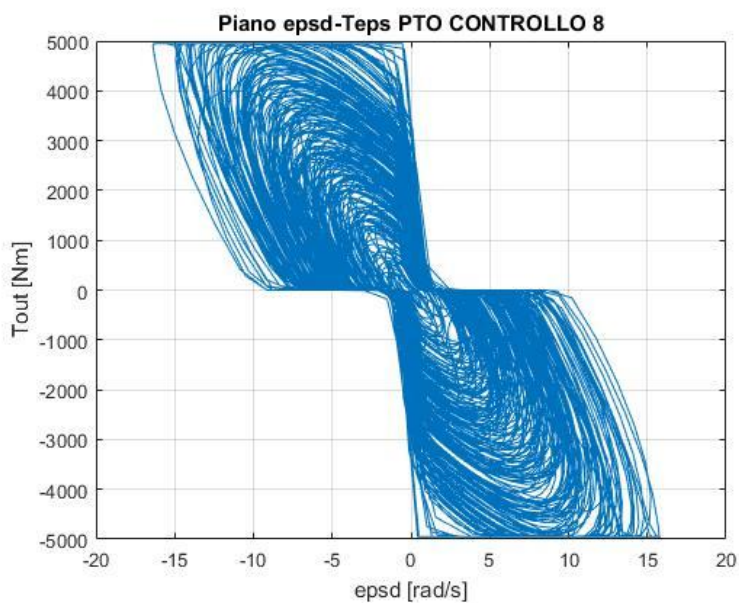


Figura 5.40 Traiettoria del punto di lavoro con Controllo 8 - Onda 27

6 RISULTATI SIMULAZIONE PARAMETRICA

La simulazione parametrica prevede una struttura di calcolo molto complessa messa a punto per fare delle valutazioni di tipo meccanico ed elettrico su un generatore di moto ondoso. Tale struttura consente di valutare le prestazioni del convertitore ISWEC in funzione delle condizioni marine. Quindi è necessario avere a disposizione un'importante quantità di dati relativi al sito in cui il generatore è installato. In questa tesi, sono state valutate le prestazioni rispetto ai parametri di controllo sull'onda di progetto, che è quella di maggior frequenza. All'interno del sistema esistono dei sensori e sistemi di controllo per cui è possibile stimare lo stato di mare e le condizioni atmosferiche, così che ISWEC è in grado di adattarsi ad esse.

La valutazione non è fatta solo in ottica di ottimizzazione della producibilità, ma è necessario tener conto anche delle sollecitazioni che un determinato controllo può apportare ai componenti meccanici, influenzando sui costi di manutenzione. Il modello è predisposto per scegliere i parametri di controllo ottimali tali per cui è ottimizzata l'intersezione tra producibilità elettrica e durata di vita dei componenti. In merito a questo aspetto, si è deciso di mantenere costante la velocità angolare del volano $\dot{\phi}$ che, nonostante dia un contributo significativo sulla producibilità, influisce pesantemente sulle sollecitazioni dei cuscinetti. La potenza elettrica netta è scrivibile in forma semplificata come:

$$P_{eNET} = P_{eGROSS} - P_{Bearings,losses} \quad (42)$$

dove P_{eGROSS} è la potenza elettrica calcolata usando la mappa dei rendimenti, mentre $P_{Bearings,losses} \propto k_{loads}\dot{\phi}$, la cui costante di proporzionalità dipende dalla combinazione di tutti i possibili carichi applicati ai cuscinetti dipendenti dalle condizioni di funzionamento.

Nella seguente tabella, sono riportati i parametri meccanici di controllo per cui sono state fatte le simulazioni:

Index		27	$\dot{\phi}$ [rad/s]	20.944
N	k [Nm/rad]		c [Nm/rad/s]	
1	5000		5000	
2	23125		23125	
3	41250		41250	
4	59375		59375	
5	77500		77500	
6	95625		95625	
7	113750		113750	
8	131875		131875	
9	150000		150000	

Tabella 6.1 Set parametri meccanici scelti per la simulazione parametrica

Le simulazioni sono state fatte sull'onda di progetto (Index = 27), con la velocità nominale del volano relativa a quell'onda ($\dot{\phi} = 20,944$ rad/s), e con tutte le possibili combinazioni dei valori di costante di smorzamento c e rigidezza k ($N = 9$). Questo vuol dire che, per ogni controllo, sono state svolte 81 simulazioni.

Per ogni controllo, saranno riportati i parametri elettrici di controllo delle strategie adottate, la potenza elettrica netta ottenuta, i rispettivi c e k ottimali e incremento percentuale calcolato come:

$$\Delta P_{eNET\%} = \frac{P_{eNET,Controllo_0} - P_{eNET,Controllo_i}}{P_{eNET,Controllo_0}} \cdot 100 \quad (43)$$

RISULTATI SIMULAZIONE PARAMETRICA					
Controllo	Parametri elettrici	C_{opt} [Nm/rad/s]	k_{opt} [Nm/rad]	P_{eNET} [kW]	$\Delta P_{eNET}\%$
0	//	23125	41250	15.122	//
1	$\eta_{max} = 0.2$ $k_{T_new} = 0.21$	23125	77500	15.713	+3.9%
2	$\eta_{min} = 0.89$	113750	113750	14.22	-5.96%
3	$\eta_{min} = 0.8$ $k_{T_new} = 0.15$	77500	150000	13.366	-11.61%
4	$d\omega = 17 \text{ rad/s}$ $k_{T_new} = 0.15$	23125	59375	11.901	-21.3%
5	$\eta_{min} = 0.8$ $P_k = 30000 \text{ W}$ $\eta_{max} = 0.2$ $k_{\eta_{max}} = 0.4$	41250	77500	13.509	-10.66%
6	//	41250	41250	12.632	-16.466%
7	$\eta_{min} = 0.8$ $\eta_{max} = 0.2$ $k_{\eta_{max}} = 0.4$	5000	23125	12.06	-20.248%
8	//	23125	41250	13.255	-12.346%

Tabella 6.2 Risultati simulazione parametrica

Dalla tabella si può osservare che, per questo set di c e k e con i parametri di controllo assegnati, rispetto al valore di riferimento dato dal Controllo 0 15,122 kW, solo il Controllo 1 ha fornito un sensibile miglioramento del 3,9%, pari a 15,713 kW.

6.1 Variazione parametri Controllo 1

Si ponga maggiore attenzione sul Controllo 1. Si consideri lo stesso set di c e k , valutando la potenza elettrica netta per diversi valori dei parametri di controllo elettrico.

RISULTATI SIMULAZIONE PARAMETRICA					
Controllo	Parametri elettrici	c_{opt} [Nm/rad/s]	k_{opt} [Nm/rad]	P_{NETTA} [kW]	$\Delta P_{NETTA}\%$
1	$\eta_{max} = 0.3$ $k_{T_new} = 0.21$	41250	95625	15.884	+5.03%
1	$\eta_{max} = 0.4$ $k_{T_new} = 0.21$	41250	113750	16.014	+5.89%
1	$\eta_{max} = 0.5$ $k_{T_new} = 0.21$	41250	113750	16.333	+8.01%
1	$\eta_{max} = 0.6$ $k_{T_new} = 0.21$	59375	131875	16.524	+9.27%
1	$\eta_{max} = 0.7$ $k_{T_new} = 0.21$	113750	59375	14.942	-1.19%

Tabella 6.3 Risultati simulazione parametrica relativa al Controllo 1

Si osserva che variando i parametri elettrici, si può avere un ulteriore miglioramento della potenza netta prodotta. Questo dimostra che, nonostante gli altri controlli abbiano dato risultati non soddisfacenti, la variazione dei parametri elettrici di simulazione potrebbe fare in modo che anch'essi vengano rivalutati. Per cui l'analisi fin qui fatta risulta solo un punto di partenza per uno studio più approfondito delle strategie proposte.

7 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha visto lo studio di nuove strategie di controllo per migliorare la produzione di energia elettrica del generatore di moto ondoso ISWEC di Pantelleria. È stata riportata un'introduzione in cui si descrive il dispositivo, in modo da permettere una maggiore comprensione dei fenomeni successivamente analizzati. La seconda parte riprende i modelli di calcolo utilizzati e le relative semplificazioni, in cui si è vista l'implementazione del calcolo diretto della potenza elettrica nel modello meccanico. Infine, sono state descritte delle nuove strategie di controllo, basate su leggi non lineari e quindi lontane da un'impostazione classica. È stato visto come tali strategie influenzano il comportamento del convertitore elettromeccanico e sono stati riportati i risultati delle simulazioni parametriche.

I risultati mostrano come è possibile avere dei miglioramenti della produttività scegliendo questa strada, offrendo incrementi non trascurabili. Si è dimostrato anche che, operando sui parametri definiti nelle nuove strategie di controllo, si può avere un ulteriore vantaggio. Dunque, si può affermare che questo lavoro è un punto di partenza per l'approfondimento delle strategie proposte, in quanto non è da escludere che una simulazione parametrica che esplori una combinazione più estesa di parametri elettrici delle nuove leggi e di parametri meccanici possa dare dei risultati soddisfacenti.

8 RIFERIMENTI

- [1] C. Stock-Williams e K. Gunn, «Quantifying the global wave power resources,» in *Renewable Energy*, Oxford, Elsevier, 2012, p. 296 – 304.
- [2] E. Enferad e D. Nazarpour, *Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves, New Developments in Renewable Energy,*, Prof. Hasan Arman, 2013.
- [3] G. B. Airy, *Tides and Waves*, 1841.
- [4] Atlantic Ocean Energy Alliance, «<http://www.aoea.ie/wave-energy/>,» Atlantic Ocean Energy Alliance, [Online]. Available: <http://www.aoea.ie/wave-energy/>. [Consultato il giorno 2017 Dicembre].
- [5] Treccani, «Enciclopedia Treccani,» [Online]. Available: <http://www.treccani.it/enciclopedia/oceanografia/>.
- [6] «STATO DEL MARE - LE ONDE MARINE E LA SCALA DOUGLAS,» [Online]. Available: http://www.nauticavalente.com/Barca&Marinaio/stato_del_mare.
- [7] ISPRA, «Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale,» [Online]. Available: <http://www.isprambiente.gov.it/it>. [Consultato il giorno Dicembre 2017].
- [8] G. Sannino, A. Bargagli, A. Carillo, E. Caiaffa, E. Lombardi, P. Monti e G. Leuzzi, «Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste,» Roma, 2011.
- [9] S. Salter, «Study of mechanism for the extraction of power from sea waves,» in *Wave Power*, Edinburgo, Nature, 1977, pp. 720-724.
- [10] A. F. de O. Falcao, «Wave energy utilization: A review of the technologies,» in *Wave energy utilization: A review of the technologies*, 2010, p. 899 – 918.
- [11] H. Benbouzid e M. Benbouzid, «Ocean wave energy extraction: Up-todate,» IEEE, 2015.

- [12] J. V. Ringwood, G. Bacelli e F. Francesco, «Energy-maximizing control of wave-energy converters: The development of control system technology to optimize their operation,» in *Control Systems*, IEEE, 2014, p. 34(5):30–55..
- [13] F. Fusco e J. V. Ringwood, «Short-term wave forecasting for real-time control of wave energy converters,» in *Sustainable Energy*, IEEE Transactions, 2010, p. 1(2):99–106.
- [14] F. Sharkey, M. Conlon e K. Gaughan, «Practical Analysis of Key Electrical Interfaces for Wave Energy Converter Arrays,» in *International Conference on Ocean Energy 2012 (ICOE)*, Dublino, Irlanda, 2012.
- [15] R. Bucher, H. Jeffrey, I. Bryden e G. Harrison, «Creation of Investor Confidence: The Top-Level Drivers for Reaching Maturity in Marine Energy,» in *Renewable Energy*, Edinburgo, 2016, p. 88:120 – 129..
- [16] M. Rafferò, Design of a Wave Energy Converter - a case of application: ISWEC (PhD Thesis), Torino: Politecnico di Torino, 2014.
- [17] L. Cappelli, F. Marignetti, G. Mattiazzo, E. Giorcelli, S. Carbone, G. Bracco e C. Attaiatese, «Linear Tubular Permanent-Magnet Generators for the Inertial Sea Wave Energy Converter,» in *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Torino, IEEE, 2014, pp. VOL. 50, NO. 3, 1817-1827.
- [18] G. Bracco, ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter (PhD Thesis), Torino: Politecnico di Torino, 2010.
- [19] G. Vissio, ISWEC toward the sea, Torino: Politecnico di Torino, 2017.
- [20] G. Mattiazzo, E. Giorcelli, D. Poggi, G. Sannino e A. Carillo, «Progettazione di un sistema di produzione di energia da moto ondoso in scala reale,» Enea e Politecnico di Torino, 2013.
- [21] C. Petrucci, Control of a gyroscopic wave energy converter, Torino: Politecnico di Torino, 2016.