

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE*

INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE M

TESI DI LAUREA

in

Diagnosis and Control

**Motori Sincroni Sinusoidali Bearingless: ricostruzione della posizione e
dell'orientamento del rotore**

CANDIDATO

Alessandro Samorì

RELATORE:

Prof. Ing. Andrea Tilli

CORRELATORE/CORRELATORI

Ing. Alessandro Bosso

Ing. Christian Conficoni

Ing. Guido Comai

Ing. Matteo Cacciari

Anno Accademico 2016/17

Sessione III

Indice

Introduzione	5
1 Motore Bearingless.....	7
2 Modellazione dei sensori.....	10
2.1 Analisi FEM in collaborazione con SPIN	10
2.2 Stima dei parametri	11
2.3 Scelta parametri principali e validazione	17
3 Algoritmo di stima di posizione e orientamento	18
3.1 Stima dell'angolo di rotore.....	19
3.2 Stima della posizione del rotore	21
3.3 Validazione stima senza correnti.....	22
3.4 Validazione stima con correnti di bearing o di coppia	24
4 Deviazioni delle misure dovute alle correnti di coppia e di bearing	30
4.1 Parametrizzazione delle deviazioni dovute alle correnti di coppia	31
4.2 Parametrizzazione delle deviazioni dovute alle correnti di levitazione.....	31
5 Algoritmo di stima con compensazione delle misure.....	33
5.1 Validazione con compensazione delle correnti di bearing	35
5.1.1 Aggiornamento dell'algoritmo per le deviazioni delle correnti di bearing	35
5.1.2 Prove di stima con compensazione di corrente	35
5.2 Validazione con compensazione delle correnti di T.....	36
5.2.1 Formulazione di tre diversi tipi di compensazione delle correnti di coppia.....	37
5.2.2 Prove di stima con deviazione costante	37
5.2.3 Prove di stima con deviazione costante e dipendente dall'angolo di rotore.....	39
5.2.4 Prove di stima con deviazione costante, parte dipendente dall'angolo di rotore e aggiornamento dell'angolo.....	40
6 Algoritmo di stima robusto rispetto alle deviazioni	43
6.1 Analisi sensitività	43
6.1.1 Analisi per ogni sensore	44
6.1.2 Analisi con somma $x + y$	47
6.1.3 Analisi con la Jacobiana	48
6.2 Confronto fra 4 possibili varianti	51
6.2.1 Soluzione 1	52
6.2.2 Soluzione 2	53

6.2.3	Soluzione 3	54
6.2.4	Soluzione 4	54
6.3	Analisi degli effetti delle correnti di bearing.....	54
6.3.1	Senza compensazione	54
6.3.2	Con compensazione costante.....	55
6.4	Analisi degli effetti delle correnti di coppia	58
6.4.1	Senza compensazione.....	58
6.4.2	Con compensazione costante.....	60
6.4.3	Con compensazione costante e parte con contributo di angolo	61
6.4.4	Con compensazione iterativa	61
6.5	Criteri di valutazione e scelta della variante migliore	61
7	Verifiche simulative dell’algoritmo di stima selezionato.....	63
7.1	Trasformazione in formato fixed point a 16 bit.....	63
7.1.1	Procedura di trasformazione in fixed point a 16 bit	64
8	Verifiche sperimentali con l’algoritmo di stima selezionato.....	66
9	Conclusioni.....	68
10	Bibliografia.....	69
11	Indice Figure.....	69

Introduzione

Il problema affrontato in questa tesi è stato l'utilizzo di sensori a effetto Hall per la ricostruzione della posizione e dell'orientamento di un motore sincrono bearingless.

La tesi è stata svolta al LAR (Laboratory of Automation and Robotics) in collaborazione con l'azienda di Budrio MediCon Ingegneria, la quale ha fornito il prototipo del motore completo di disposizione dei sensori a effetto Hall, le schede elettroniche, il software per la compilazione e l'IDE. Il lavoro è stato affrontato con il relatore e i correlatori nelle giornate in laboratorio e in autonomia.

Nel primo capitolo viene spiegato cosa si intende per motore sincrono bearingless, sulla base delle indicazioni costruttive e di modellazione riportate in letteratura e in funzione delle applicazioni per le quali sono pesate le caratteristiche di tali dispositivi.

Successivamente, viene affrontata la mappatura del campo magnetico all'interno di una particolare tipologia di motore, ovvero quella fornita dall'azienda MediCon Ingegneria. In questo modo è possibile trovare i parametri caratteristici dei sensori attraverso l'algoritmo ai minimi quadrati.

Nel terzo capitolo si definisce un algoritmo di stima, sfruttando i parametri caratteristici trovati, dell'angolo di rotore e della posizione del motore. Inizialmente si è cercato di validarlo senza correnti di statore e successivamente utilizzando le misure dei sensori influenzate dalle correnti.

Per rendere indipendente la stima dalla presenza delle correnti di statore, nel capitolo quattro vengono ricercati i parametri che costituiscono la parte di deviazione sulle letture dei sensori.

Una volta trovati i parametri, nel capitolo cinque vengono ipotizzati alcuni algoritmi per la compensazione delle deviazioni sui sensori e quindi vengono illustrati i risultati delle diverse stime. Inoltre, vengono trattate separatamente le deviazioni dovute al controllo di posizione e di rotazione.

Nel sesto capitolo viene fatta inizialmente un'analisi di sensitività sui sensori per capire quali siano le misure più adatte per effettuare la stima. Vengono scelti quattro algoritmi che prevedono una differente scelta di combinazioni di sensori per stimare posizione e angolo. I risultati vengono successivamente confrontati per individuare l'algoritmo migliore per quanto riguarda il carico computazionale e la migliore precisione di stima.

Una volta scelto l'algoritmo, viene fatta la simulazione in Simulink con generazione delle misure dei sensori, controllo di rotazione e posizione. In seguito, sono state fatte due

conversioni in formato fixed point per simulare l'utilizzo di un microcontrollore a 16 bit e 32 bit.

Infine, prima delle conclusioni, vengono illustrati i dati sperimentali con implementazione dell'algoritmo di stima e i successivi accorgimenti sul modello reale che si discosta dal modello inizialmente considerato tramite l'analisi a elementi finiti.

1 Motore Bearingless

I motori sincroni bearingless sono motori elettrici che hanno il vantaggio di non avere contatti tra rotore e statore. La levitazione magnetica permette di non avere gli stessi attriti che, ad esempio, sono presenti nei cuscinetti a ricircolo di sfere in un motore elettrico classico.

Un primo vantaggio è la possibilità di poter raggiungere velocità più elevate perché non ci sono limitazioni dovute all'innalzamento della temperatura che producono usura nel motore. Inoltre, non è necessaria una lubrificazione dei contatti e quindi non c'è il pericolo che eventuali impurità si diffondano all'interno del motore. Da queste osservazioni, ne deriva che il loro utilizzo è indicato in ambito medicale per la garanzia di rientrare entro standard di pulizia [2].

La creazione di forze di levitazione non può essere fatta in modo passivo, in quanto il teorema di Earnshaw (1842) afferma che non ci sono configurazioni stabili o statiche nella levitazione di un magnete permanente. In particolare, non esiste un campo magnetico fisso che possa mantenere stabile in ogni direzione un magnete in una qualsiasi configurazione dello spazio.

Un altro problema importante è il controllo di due diversi tipi di correnti che hanno compiti diversi. Sono presenti, infatti, le correnti di rotazione come nei motori elettrici classici ma in aggiunta anche delle correnti di levitazione che possono interferire con le prime. Se questo accade, l'algoritmo di controllo diventa molto complicato.

In un motore a levitazione magnetica sono presenti due tipi di forze, la forza di Lorentz e la forza di Maxwell ([5]). La prima è necessaria per la generazione della coppia come avviene nei motori sincroni a magnete permanente. La forza di Lorentz però produce anche una componente radiale. La forza di Maxwell dipende dal campo di induzione magnetica B e dalla permeabilità magnetica nel vuoto. È una forza che esiste in un circuito magnetico in corrispondenza delle superfici di materiali aventi differenti permeabilità magnetiche.

$$dF = \frac{B^2 dS}{2\mu_0} \quad (1)$$

Fortunatamente in letteratura sono presenti alcuni consigli per rendere indipendente il controllo di rotazione dal controllo di levitazione. Il rotore viene quasi sempre posizionato con l'asse perpendicolare al piano di appoggio, così facendo si riesce a costruire una levitazione passiva per quanto riguarda l'equilibrio di asse verticale (un punto di sella per

l'asse z che diventa instabile per l'asse x e y). In particolare, è necessario che le coppie polari di rotazione (M) differiscano di una coppia polare da quelle di levitazione (B) [4].

$$p_M = p_B \pm 1 \quad (2)$$

In questo modo si riesce a garantire che la generazione delle forze di levitazione non interferiscano con quelle di generazione di coppia. Ci sono diversi metodi costruttivi per formare tale specifica, come ad esempio propone [1] nel quale ci sono 8 denti verticali le cui sporgenze finali formano uno spigolo retto verso l'interno del motore (verso il rotore). Ad ogni dente è avvolta la matassa di levitazione, mentre ogni avvolgimento di coppia è situato attorno a due denti. In questo modo si raggiunge la condizione richiesta.

Altre soluzioni prevedono l'installazione degli avvolgimenti di coppia all'esterno dello statore e quelli di levitazione all'interno e viceversa. L'aspetto costruttivo in comune è che i denti presenti sullo statore sono sempre posizionati in configurazione radiale.

Dato che il numero di coppie polari deve essere differente, [3] introduce una struttura che consiste in macro denti sui quali si trovano gli avvolgimenti di levitazione mentre ci sono denti più piccoli che accolgono gli avvolgimenti di coppia.

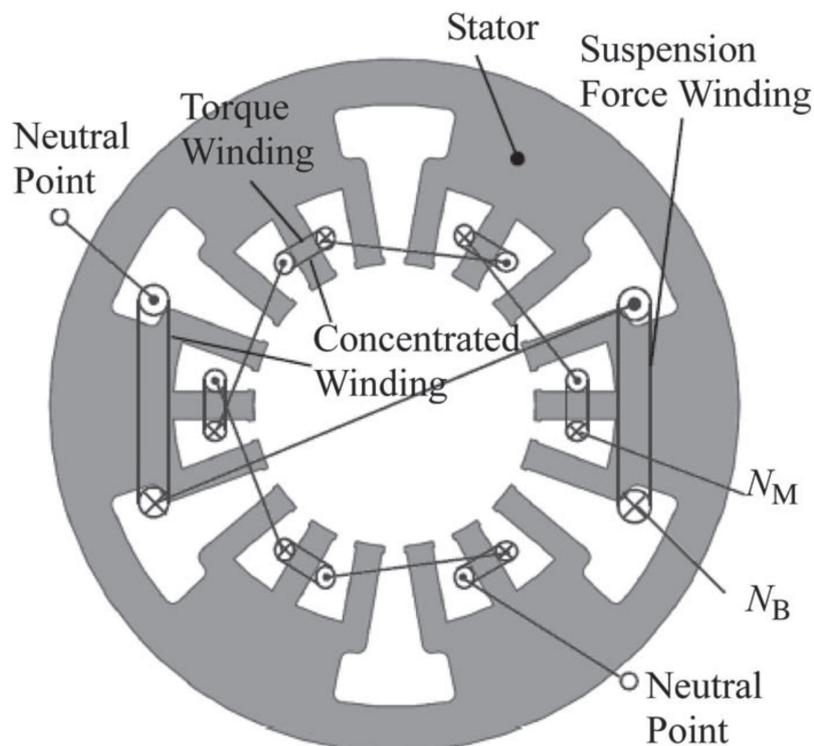


Figura 1. Schema costruttivo statore motore bearingless [3]

Per osservare la posizione radiale del rotore sono molto spesso usati, come in [5], sensori a Eddy Current i quali misurano la distanza da un materiale ferromagnetico. Essi forniscono

una misura di distanza che dipende dalla forza controelettromotrice che le correnti parassite, che si formano nell'oggetto da cui si vuole misurare la distanza, creano. Per quanto riguarda la misura dell'angolo si utilizzano encoder ottici ([3]), con effetto Hall, che sfruttano le correnti di Eddy.

Il problema principale degli encoder è quello del costo che aumenta con la precisione dell'angolo. Infatti, la precisione dell'angolo misurato dipende dal numero di settori dell'encoder, quindi della sua risoluzione.

La configurazione della quale si occupa la tesi è formata da uno statore ferromagnetico formato da 6 denti, i quali sono posizionati radialmente e formano estensioni polari avvolgendo la cavità statorica. Gli avvolgimenti di coppia sono posizionati sui denti e interiormente rispetto agli avvolgimenti di levitazione. Nelle fessure tra i denti sono posizionati radialmente 6 sensori a effetto Hall in modo tale che siano distanti con stesso angolo. Sfruttando le letture dei flussi dispersi di questi sensori, è stato costruito l'algoritmo di stima di posizione angolare e radiale del rotore.

Uno dei problemi che ci si aspetta è la possibile rumorosità delle misure sui sensori perché i flussi dispersi sono molto più bassi rispetto ai flussi che passano attraverso lo statore ferromagnetico.

2 Modellazione dei sensori

Il primo problema affrontato è stato quello di mappare la lettura del campo B dei sensori relazionata alla posizione angolare ϑ del rotore a magnete permanente e l'eccentricità di esso all'interno della cavità statorica.

Nell'attività preparatoria alla tesi è stata fatta una ricerca delle soluzioni esistenti che usassero sensori a effetto Hall e un'analisi qualitativa dell'andamento del campo B con il toolbox di Matlab PDE. Grazie a un articolo che mostra la dipendenza da x e y del campo di induzione magnetica, è stata formulata un'ipotetica equazione per il nostro problema.

Per il sistema di riferimento solidale al sensore generico S l'equazione ipotizzata è la seguente:

$$B_S = (A + K_x X) \left(B(1 - K_y Y^2) \right) \cos \vartheta \quad (4)$$

Una volta formulata la seguente equazione, è stato chiesto a MediCon di fare un'analisi FEM tramite l'azienda SPIN in modo da avere i dati per verificare tramite il metodo dei Minimi Quadrati la correttezza dell'equazione ipotizzata.

2.1 Analisi FEM in collaborazione con SPIN

Spin ha fornito un modello in 2D per l'analisi a elementi finiti del motore reale con la disposizione dei sensori secondo le indicazioni del prototipo di motore. Da questa analisi è risultato che i sensori a effetto Hall misurano i flussi dispersi del campo magnetico che attraversa il traferro. Questo motivo è dovuto al fatto che sono presenti nello statore dei denti con espansioni polari che avvolgono il rotore lasciando un traferro di 1 millimetro.

Tra un piccolo spazio di un dente e quello adiacente è posizionato il sensore. La maggior parte del flusso quindi attraversa il traferro di 1 millimetro passando per le espansioni polari, mentre una piccola parte attraversa lo spazio che è presente tra i denti per richiudersi nel rotore. Le misure sui sensori sono dunque di minima entità rispetto al flusso che attraversa il motore. Inoltre è presente un distanziale di plastica che impedisce il possibile contatto tra magnete e statore. Esso riduce la massima eccentricità del magnete a un massimo di 0.5 mm. Per facilitare il calcolo dei campi di induzione magnetica sui sensori è stata fatta una griglia di

posizioni del magnete per le quali effettuare l'analisi FEM. In particolare, secondo il sistema di riferimento solidale al dente a metà distanza tra sensore 1 e 6 le posizioni variano da -0.5 a 0.5 mm per asse x e ugualmente per asse y con passo tra una posizione e l'altra di 0.1 mm.

In ogni posizione è stato fatto ruotare il magnete di 15 gradi per misura. Queste misure iniziali sono state effettuate senza le correnti di motore e levitazione. Successivamente è stata scelta una griglia più ridotta per diminuire la durata della simulazione per ricavare le misure con introduzione di correnti costanti di bearing e in seguito con correnti di rotazione senza le precedenti. L'ipotesi fatta è che i contributi dei due tipi di correnti siano disaccoppiati.

La griglia scelta è stata fatta variare sempre di passo 0.1 mm ma tra 0 e 0.5 mm per x e per y con granularità angolare di 30 gradi anziché 15 come in precedenza. Una parte dei punti osservati sono fuori dal range di punti in cui può arrivare il rotore e non sono simmetrici rispetto a ogni angolo osservato. Tuttavia questa discretizzazione è accettabile, in quanto le posizioni sono tante e di un passo ritenuto accettabile.

2.2 Stima dei parametri

Una volta eseguite le misure, è necessario validare il modello ipotizzato e affinarlo con la ricerca dei parametri che lo caratterizzano. Sono state fatte diverse prove per evidenziare i diversi risultati di parametri che corrispondono ai punti trovati.

Il metodo per la ricerca dei parametri caratteristici è quello dei minimi quadrati. Grazie alla grande quantità di misure fatte, questo metodo è in grado di approssimare i parametri caratteristici dell'equazione caratteristica che genera le misure di campo di induzione magnetica ricavate dai sensori.

Il metodo prevede di avere un numero elevato di equazioni lineari rispetto al numero di parametri da stimare. L'equazione con i parametri da stimare, infatti, deve essere una combinazione lineare di funzioni dipendenti dal parametro K_j e, nel caso in esame, dipendenti dalla posizione angolare e radiale del magnete.

$$y(i) = k_1x_1(i) + k_2x_2(i) + \dots + k_px_p(i) + \dots + k_nx_n(i) + e(i) \quad (5)$$

L'errore considerato nell'equazione non è una variabile stocastica ma dovuta all'approssimazione del modello. Dunque, non è a media nulla mentre il valore della varianza non è data da rumori esterni ma dalla vicinanza o meno dal modello vero, che è

deterministico. Il valore della funzione $y(i)$ corrisponde al valore delle misure sui sensori relazionati alla posizione x , y e ϑ del magnete che compongono le funzioni $x_p(i)$.

Utilizzando un numero elevato di misure dei sensori è possibile scrivere una equazione matriciale che generalizza l'equazione precedente:

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(M) \end{bmatrix} \quad \varphi(i) = \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \\ \vdots \\ x_N(i) \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \vdots \\ \varphi^T(M) \end{bmatrix} \quad \alpha = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_N \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(M) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y = \Phi\alpha + E \quad (7)$$

Le incognite del sistema sono la matrice dei parametri α e la matrice degli errori E . L'obiettivo dei "minimi quadrati" è quello di minimizzare la somma dei quadrati degli errori. Se chiamiamo la funzione di costo $J(\alpha)$ l'obiettivo del metodo è trovare α in modo tale da minimizzarla.

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^M e^2(i) = E^T E = \|E\|^2 \quad (8)$$

Per questo motivo viene espressa la E nel seguente modo.

$$E = Y - \Phi\alpha \quad (9)$$

Successivamente si esprime la funzione di costo $J(\alpha)$ in funzione di E espanso.

$$J(\alpha) = Y^T Y - 2Y^T \Phi\alpha + \alpha^T \Phi^T \Phi\alpha \quad (10)$$

Viene cercato il minimo di questa funzione quindi quando la derivata rispetto a α risulta essere uguale a 0.

$$\frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} = -2Y^T + 2\Phi^T \Phi\alpha = 0 \quad \alpha = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (11)$$

La matrice $(\Phi^T \Phi)$ perché risulti invertibile è necessario che il numero di campioni M sia maggiore del numero di parametri N ($M > N$). Il risultato è α che è la scelta di parametri per minimizzare la somma dei quadrati degli errori delle misure fatte.

Per la ricerca sono state fatte diverse prove che si differenziano tra loro per numero di parametri con i quali rappresentare l'equazione delle misure sui sensori. Inoltre, per evidenziare l'importanza di effettuare misure il più variatamente possibile, è stata fatta la ricerca dei parametri scegliendo particolari configurazioni di rotore.

- 1) Una prima prova è stata effettuata con un singolo sensore utilizzando 4 parametri che corrispondono all'equazione ipotizzata inizialmente.

$$B(i) = a_1 \cos(\vartheta') - a_2 y'^2 \cos(\vartheta') + a_3 x' \cos(\vartheta') - a_4 x' y'^2 \cos(\vartheta') \quad (12)$$

I parametri risultanti dal metodo minimi quadrati sono:

sensore 1: $a_1=0.163, a_2=0.0021, a_3=0.0171, a_4=0.0005$

Trovati i parametri caratteristici dell'equazione considerata si valuta quanto riesca ad approssimare le misure del sensore. Si calcola l'errore tra la misura vera di B e la misura stimata:

$$E = B - \Phi \alpha \quad (13)$$

Dalla figura si percepisce la differenza tra le due curve che rappresenta l'errore di ricostruzione dovuto alla semplificazione del modello.

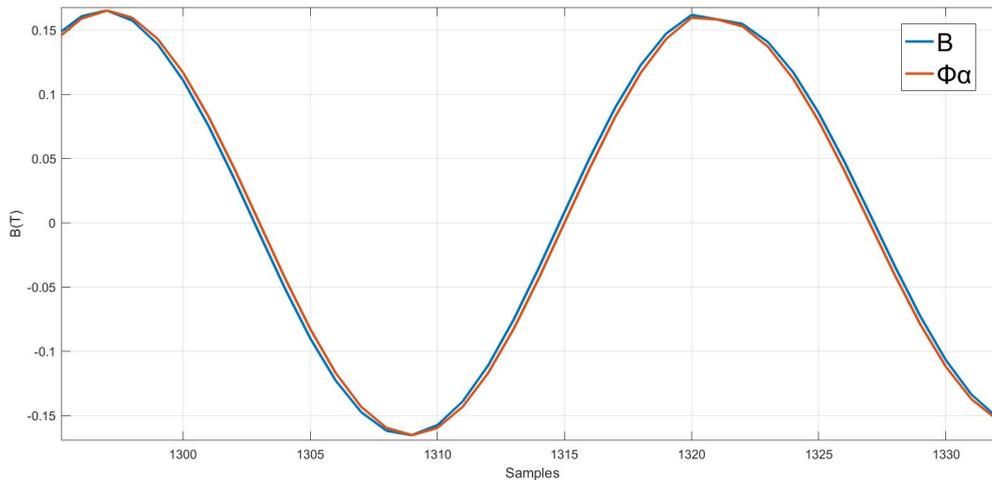


Figura 2 Confronto tra valore stimato con 4 parametri e valore reale

Per confrontare tra le varie prove fatte quale risulta approssimare meglio la misura del sensore, è stato calcolato l'errore medio e la varianza dell'errore (che non è altro che l'obiettivo dei "minimi quadrati").

$$\text{Errore medio} = 1.6069^{-5} \quad \text{varianza} = 1.4849^{-5}$$

- 2) Per migliorare il modello sono stati introdotti altri termini che dipendono dal seno di ϑ .

$$B(i) = a_1 \cos(\vartheta') - a_2 y'^2 \cos(\vartheta') + a_3 x' \cos(\vartheta') - a_4 x' y'^2 \cos(\vartheta') - a_5 y' \sin(\vartheta') - a_6 x' y' \sin(\vartheta') \quad (14)$$

I parametri risultanti dal metodo minimi quadrati sono:

$$a_1=0.163, a_2=0.0021, a_3=0.0171, a_4=0.0005, a_5=0.0172, a_6=0.0027$$

$$\text{Errore medio} = 1.6069^{-5} \quad \text{varianza} = 1.4817^{-8}$$

Osservando che la varianza migliora è stato scartato il primo metodo con solo 4 parametri.

- 3) Il metodo a 6 parametri viene espanso alle misure su tutti e 6 i sensori e i parametri caratteristici rimangono quasi invariati:

$$a_1=0.1629, a_2=0.0022, a_3=0.017, a_4=0.0003, a_5=0.0172, a_6=0.0028$$

$$\text{Errore medio} = 1.2505^{-5} \quad \text{varianza} = 1.126^{-8}$$

4) Vengono ulteriormente aggiunti due parametri che moltiplicano $\cos^3(\vartheta')$ e $x'y'^2\cos(\vartheta')$.

$$a_1=0.1629, \quad a_2=0.002, \quad a_3=0.017, \quad a_4=0.0003, \quad a_5=0.0172, \quad a_6=0.0028, \quad a_7=0.00003, \\ a_8=0.0007$$

$$\text{Errore medio}=1.2505^{-5} \quad \text{varianza}= 1.0464^{-8}$$

5) Avendo notato che la varianza diminuisce aggiungendo parametri è stata creata una equazione che tenesse conto di 30 parametri, con il vettore ϕ contenente le combinazioni di prodotti tra x' , y' , $\cos(\vartheta')$, $\sin(\vartheta')$ e rispettive potenze fino alla terza. Seguendo questa strada sono stati evidenziati i parametri più significativi per il modello. I risultati di valore medio dell'errore e varianza sono i seguenti.

$$\text{Errore medio}=1.6063^{-5} \quad \text{varianza}= 6.1733^{-9}$$

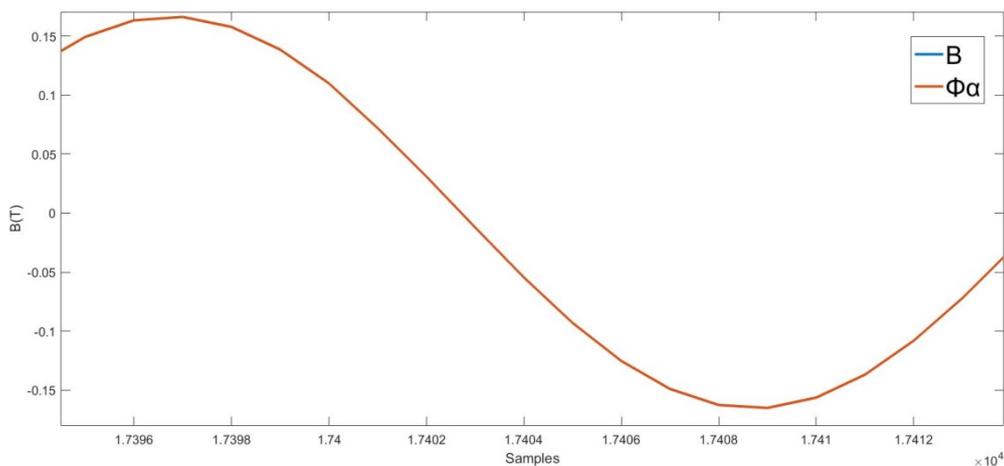


Figura 3 Confronto tra valore stimato con 30 parametri e valore reale

Dalla figura si può vedere che la stima di B e B stesso sono sovrapposti con la varianza precedentemente indicata. L'equazione con 30 parametri è quella che approssima meglio la misura stimata rispetto ai metodi visti fino adesso. Il metodo utilizzato ha l'obiettivo di trovare i parametri che meglio approssimano l'andamento del modello.

Per evidenziare la forte dipendenza dal tipo di misure effettuate sono state fatte due prove semplificate prendendo in esame due tipi di misure:

- Le misure con spostamenti del rotore con angolo fisso a 90°
- Le misure con spostamenti del rotore con angolo fisso a 0°

Dato che le misure effettuate sono su una griglia quadrata, la simulazione di spostamento sui due assi può essere fatta solamente per il sensore 2 o sul sensore 5 in quanto sono posizionati rispettivamente a 90° e 270° rispetto al sistema di riferimento globale.

Per questa prova è stato scelto di utilizzare le misure sul sensore 2. Gli angoli scelti sono 90° rispetto al sistema di riferimento globale in modo che il magnete sia allineato all'asse x del sensore 2 e 180° del sistema di riferimento globale che corrisponde all'asse y del sensore 2. Nella prima equazione con angolo a 0° rispetto al sensore viene scelta la seguente equazione:

$$B(i) = a_1 \cos(\vartheta') - a_2 y'^2 \cos(\vartheta') + a_3 x' \cos(\vartheta') - a_4 x' y'^2 \cos(\vartheta') \quad (15)$$

Essa è identica alla prova iniziale effettuata con i 4 parametri e i parametri risultanti dai minimi quadrati sono:

$$a_1=0.163, a_2=0.0017, a_3=0.0171, a_4=0.0003$$

I risultati ottenuti sono quasi gli stessi della prima prova dove l'angolo variava tra 0° e 315° e le misure erano effettuate sul sensore 1.

La seconda equazione viene costruita con i termini dipendenti dal seno dell'angolo in quanto il coseno è 0.

$$B(i) = a_1 \sin(\vartheta') + a_2 x' y' \sin(\vartheta') + a_3 y' \sin(\vartheta') + a_4 x' \sin(\vartheta') + a_5 x' y'^2 \sin(\vartheta') \quad (16)$$

I parametri sono:

$$a_1=-0.0004, a_2=0.0027, a_3=0.017, a_4=-0.0001, a_5=0.0006$$

Dalle due prove risulta che ci sono tre parametri prevalenti e sono gli stessi che risultano dagli altri modelli sulle prove generali su tutti i sensori.

2.3 Scelta parametri principali e validazione

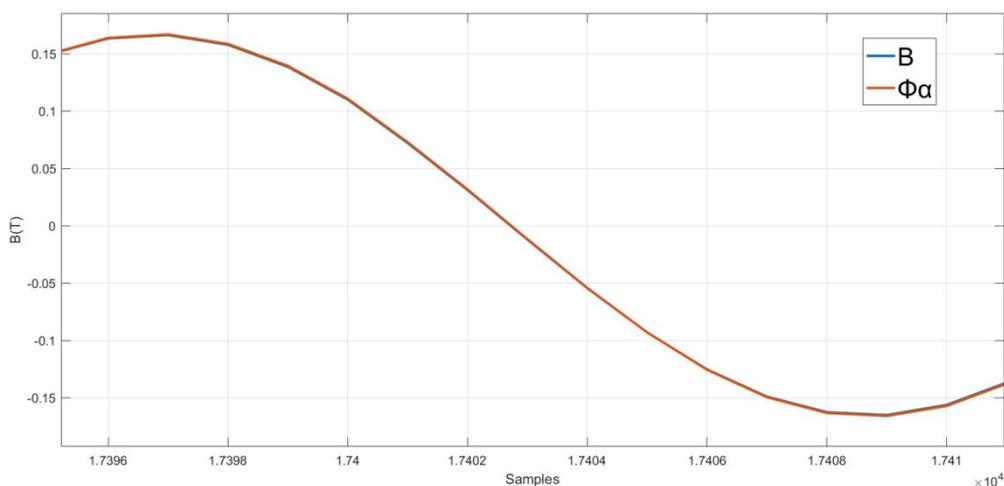
Osservando i risultati analizzati, la migliore approssimazione risulta essere quella effettuata tramite l'utilizzo di un'equazione di 30 parametri. Il problema diventa la risoluzione di un sistema non lineare nelle variabili x e y . Tuttavia all'interno del gruppo di parametri stimati si possono evidenziare 3 parametri principali in quanto sono più elevati degli altri. Sono stati scelti quindi i tre parametri principali e di conseguenza costruita la nuova equazione dei sensori. Un'ulteriore stima dei parametri viene eseguita per verificare che anche con una equazione così semplificata i risultati siano gli stessi.

$$B(i) = a_1 \cos(\vartheta') + a_2 x' \cos(\vartheta') - a_3 y' \sin(\vartheta') \quad (17)$$

I risultati rivelano quello che ci si aspettava, infatti i parametri di questa prova sono i seguenti:

$$a_1=0.1628, a_2=0.017, a_3=0.0172 \quad \text{errore medio}= 1.6069^{-5} \quad \text{varianza}= 6.2392^{-8}$$

Inoltre si può vedere dalla figura che rappresenta le misure di B e le rispettive stime che l'approssimazione non è peggiorata molto.



La semplificazione dell'equazione risulta essere una buona scelta in quanto rende il sistema lineare nelle variabili x' e y' . Questo accorgimento risulterà utile nella successiva stima della posizione del rotore all'interno della cavità statorica.

3 Algoritmo di stima di posizione e orientamento

Completata la ricerca dei parametri caratteristici che costituiscono il modello semplificato delle misure sui sensori, è necessario invertire il problema e quindi trovare le coordinate x, y, ϑ data la misura sui 6 sensori.

Le misure eseguite si riferiscono ai sistemi di riferimento solidali ai rispettivi sensori quindi è necessario, ai fini della formulazione dell'algoritmo di stima, effettuare un cambio di coordinate cosicché le variabili indipendenti che costituiscono ciascuna equazione siano le stesse. Inizialmente l'angolo nel riferimento di ogni sensore è l'angolo nel riferimento assoluto meno l'angolo in cui è posizionato il sensore.

$$\vartheta' = \vartheta - \vartheta_s \quad (18)$$

- Chiamiamo $R(\vartheta_s)$ la matrice di rotazione che permette di passare dal sistema di riferimento di ogni sensore al sistema di riferimento globale.

$$R(\vartheta) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_s) & \sin(\vartheta_s) \\ -\sin(\vartheta_s) & \cos(\vartheta_s) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R(\vartheta) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (20)$$

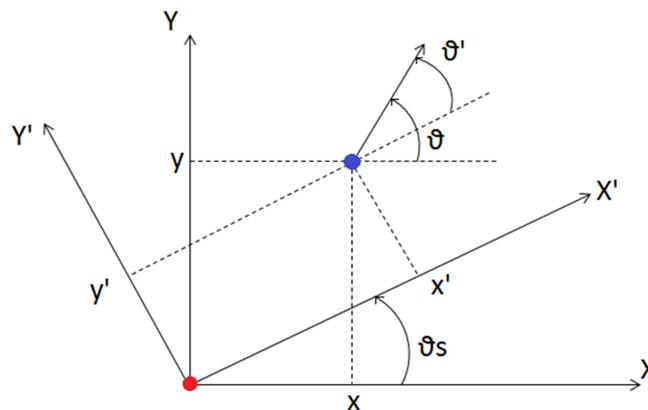


Figura 4. Schema dei due sistema di riferimento (globale e di sensore)

Con ϑ_S si intende l'angolo tra il sistema di riferimento globale e il sistema di riferimento del sensore S. In questo modo si ha un sistema non lineare di 6 equazioni in 3 incognite.

I parametri scelti sono i tre principali che risultano dal metodo dei minimi quadrati con l'utilizzo dei 30 parametri.

3.1 Stima dell'angolo di rotore

Un accorgimento può aiutare a ricavare semplicemente l'angolo di rotore, infatti se vengono prese due misure fatte da sensori diametralmente opposti e viene fatta la differenza si nota che la dipendenza da x e da y scompare. Prendendo due sensori S_i e S_j simmetrici rispetto al centro della cavità statorica si ha

$$B_{S_i} = a_1 \cos(\vartheta'_i) + a_2 x'_i \cos(\vartheta'_i) - a_3 y'_i \sin(\vartheta'_i) \quad (21)$$

$$B_{S_j} = a_1 \cos(\vartheta'_i + \pi) + a_2 (-x'_i) \cos(\vartheta'_i + \pi) - a_3 (-y'_i) \sin(\vartheta'_i + \pi) \quad (22)$$

quindi

$$\Delta = B_{S_i} - B_{S_j} = 2a_1 \cos(\vartheta'_i) \quad (23)$$

Questo procedimento si può svolgere per ogni coppia di sensori opposti rispetto all'origine del sistema di riferimento. In seguito si costruisce un sistema trifase caratterizzato dagli assi dei sensori 1, 3 e 5 per ricavare 3 coseni.

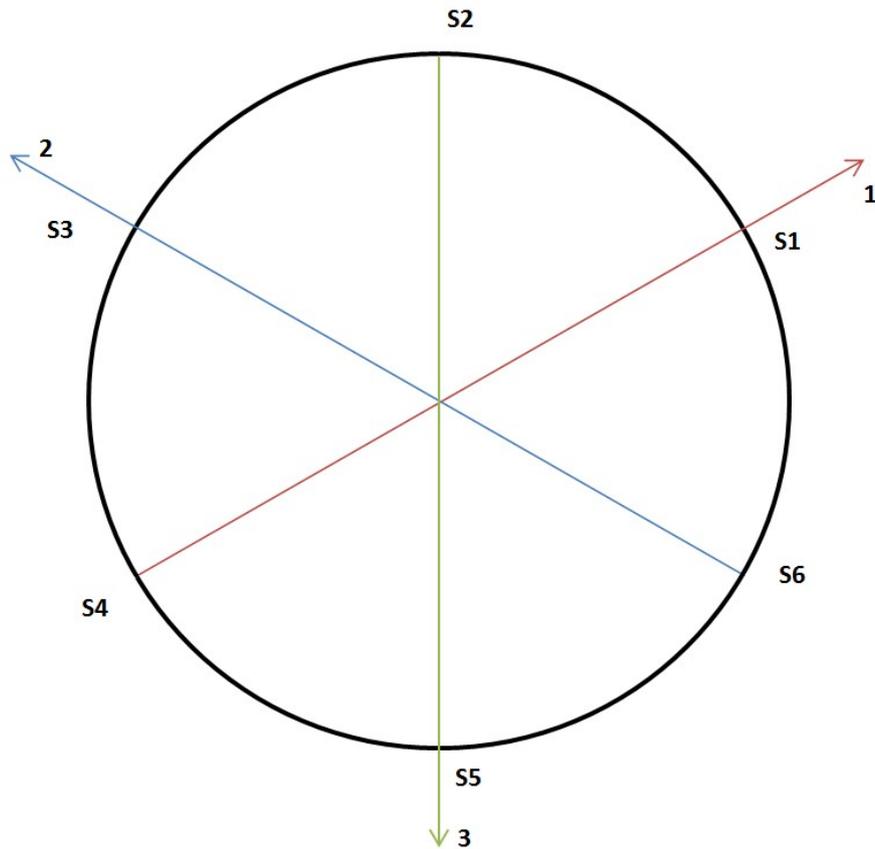


Figura 5. Sistema trifase per il calcolo dell'angolo di cotore

Le tre misure sui tre assi sono le misure delle differenze dei sensori opposti:

$$\Delta_1 = S_1 - S_4 \quad \Delta_2 = S_3 - S_6 \quad \Delta_3 = S_5 - S_2 \quad (24)$$

Successivamente i tre valori vengono trasportati in un sistema bifase tramite la trasformata di Clarke. Viene omessa la costante $2/3$ perché ai fini dell'obiettivo non cambia il risultato dell'angolo stimato.

$$\begin{bmatrix} \Delta_\alpha \\ \Delta_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

I due valori ottenuti possono essere utilizzati per calcolare l'angolo stimato

$$\hat{\vartheta} = \text{atan2}(\Delta_\beta, \Delta_\alpha) + \vartheta_{S1} \quad (26)$$

L'aggiunta di ϑ_{S_1} è necessaria per avere la stima dell'angolo di rotore nel sistema di riferimento globale in quanto il risultato dell'arcotangente si riferisce a un sistema bifase allineato al sistema di riferimento del sensore 1.

3.2 Stima della posizione del rotore

Il prossimo passo è quello della stima di posizione del rotore sfruttando l'angolo stimato. Con questa scelta si riesce ad avere un sistema lineare nelle incognite x e y in quanto la parte non lineare che era costituita dal $\cos(\vartheta)$ e dal $\sin(\vartheta)$ che ora si conoscono grazie alla stima. Dato che le equazioni sono 6 e le incognite 2 è possibile sfruttare diverse combinazioni di equazioni per costituire dei sistemi lineari di 2 equazioni in 2 incognite per avere le stime di x e y . Non possono essere scelti i sensori diametralmente opposti per costituire un sistema perché le due equazioni che lo compongono non sarebbero linearmente indipendenti e quindi non si riuscirebbe a trovare un'unica soluzione. Per semplicità vengono scelti i sensori adiacenti per formare le coppie per il sistema lineare. In questo modo risultano 3 sistemi lineari che stimano le medesime coordinate. In un primo approccio per la stima finale della posizione è stata fatta la media aritmetica tra le tre misure di \hat{x}_p e \hat{y}_p (p corrisponde ai risultati dei tre sistemi 1,2,3). L'equazione che viene utilizzata per il sistema lineare per due sensori i e j è la seguente:

$$B_{S_K} - a_1 \cos(\hat{\vartheta} - \vartheta_{S_K}) = [a_2 \cos(\hat{\vartheta} - \vartheta_{S_K}) \quad -a_3 \sin(\hat{\vartheta} - \vartheta_{S_K})] R(\vartheta_{S_K})^T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (27)$$

Con ($K=i, j$ e $i \neq j$)

Il sistema considerato è nella forma

$$A_{S_i-S_j} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = b_{S_i-S_j} \quad (28)$$

È quindi invertibile se la matrice $A_{S_i-S_j}$ non è singolare (caso in cui si scelgono sensori diametralmente opposti).

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = A_{S_i-S_j}^{-1} b_{S_i-S_j} \quad (29)$$

Il risultato del sistema lineare sono le stime di x e y per una coppia di sensori. Utilizzando tutti i sensori disponibili si ricavano 3 stime delle stesse misure. In una prima prova è stata

fatta la media dei valori stimati risultanti dalle tre coppie di sensori adiacenti senza escludere la possibilità di ricercare le coppie che presentano una migliore stima.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} [\hat{x}_1] \\ [\hat{y}_1] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [\hat{x}_2] \\ [\hat{y}_2] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [\hat{x}_3] \\ [\hat{y}_3] \end{pmatrix}}{3} \quad (30)$$

3.3 Validazione stima senza correnti

L'algorithmo di stima viene valutato effettuando le prove su tutte le misure dei sensori nelle posizioni che sono servite per la ricerca dei parametri. Le prove vengono inizialmente fatte sui valori di B senza la presenza di correnti. I parametri scelti per l'equazione caratteristica sono i 3 principali dell'analisi fatta con 30 parametri.

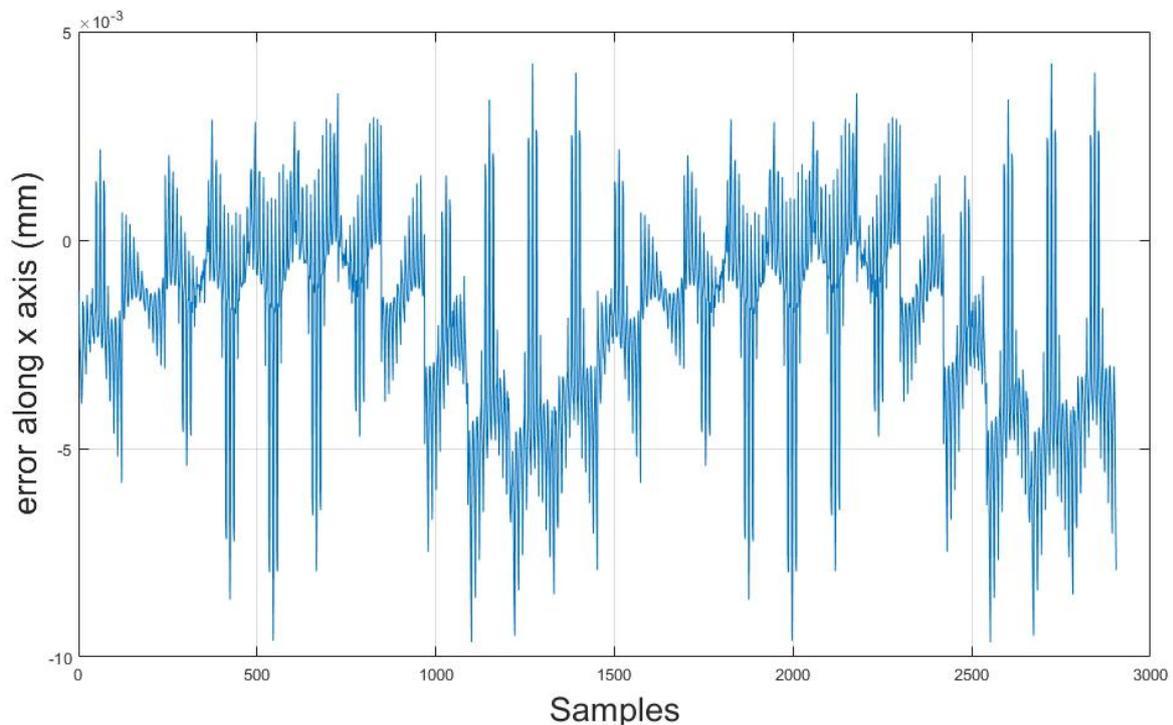


Figura 6. errore di stima della posizione x

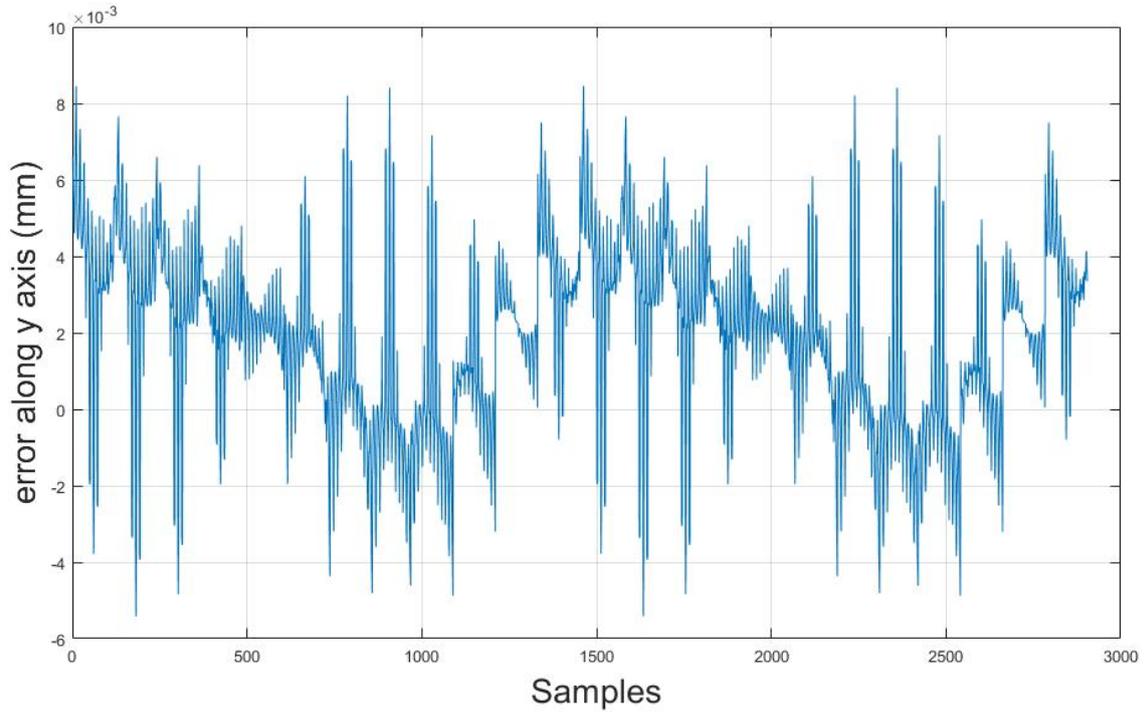


Figura 7. errore di stima della posizione y

Come si può osservare dalle due figure l'errore massimo è dell'ordine dei μm in particolare per x e per y i valori statistici sono i seguenti:

e_x : media=-0,002mm varianza=0.000005 errore massimo=0,0096mm

e_y : media=0,0019mm varianza=0,000005 errore massimo=0,0085mm

Inoltre per completezza i dati della stima di angolo sono i seguenti:

e_θ : media=-0,0317° varianza=0,00013 errore massimo=0,05°

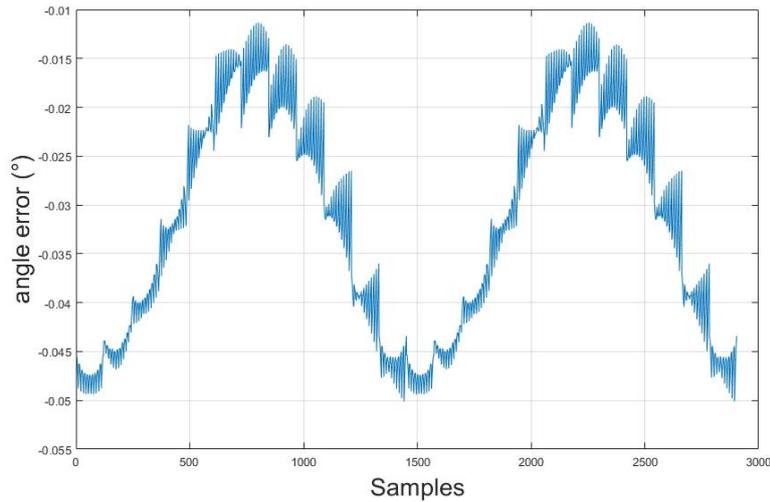


Figura 8. errore di stima dell'angolo di rotazione del rotore

Per provare l'algoritmo di stima in posizioni che siano diverse da quelle della griglia di prove FEM è possibile effettuare una generazione di misure dei sensori sfruttando il modello con 30 parametri. In quel caso fornendo la posizione x , y e ϑ nel sistema di riferimento globale l'equazione è in grado di fornire i valori di B secondo il modello che approssima il sistema reale. Questa approssimazione è accettabile per quanto visto nel capitolo 2 dove è stato evidenziato che il modello a 30 parametri approssima molto bene la misura reale del sensore.

3.4 Validazione stima con correnti di bearing o di coppia

Una volta esaminata la correttezza delle stime nelle varie posizioni è necessario valutare la stima con i risultati FEM derivanti dall'applicazione delle correnti costanti di coppia e di levitazione. Le correnti creano dei campi di induzione magnetica che si concatenano con quello già esistente del rotore magnetico e quindi è possibile che le stime eseguite dall'algoritmo siano disturbate dalla presenza di deviazioni delle misure dei sensori.

La prima verifica è stata effettuata introducendo i valori dei sensori delle prove con le correnti di Coppia.

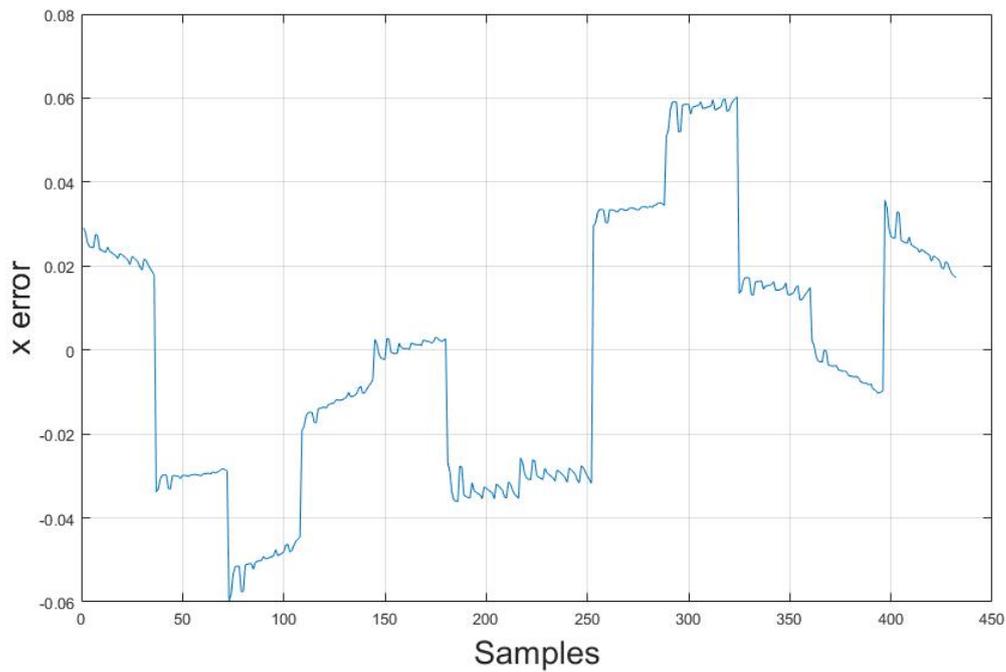


Figura 9. errore di stima di x con presenza di correnti di coppia

Si nota che l'errore della stima della posizione in x raggiunge un massimo di circa 0,06mm che è il 12% del massimo spostamento del rotore lungo l'asse x prima che ci sia in contatto con il rotore. In particolare si ha un aumento significativo della varianza dell'errore rispetto alle stime effettuate senza correnti di coppia:

e_x : media:-0,0006mm varianza=0,00095 errore massimo=0,06mm

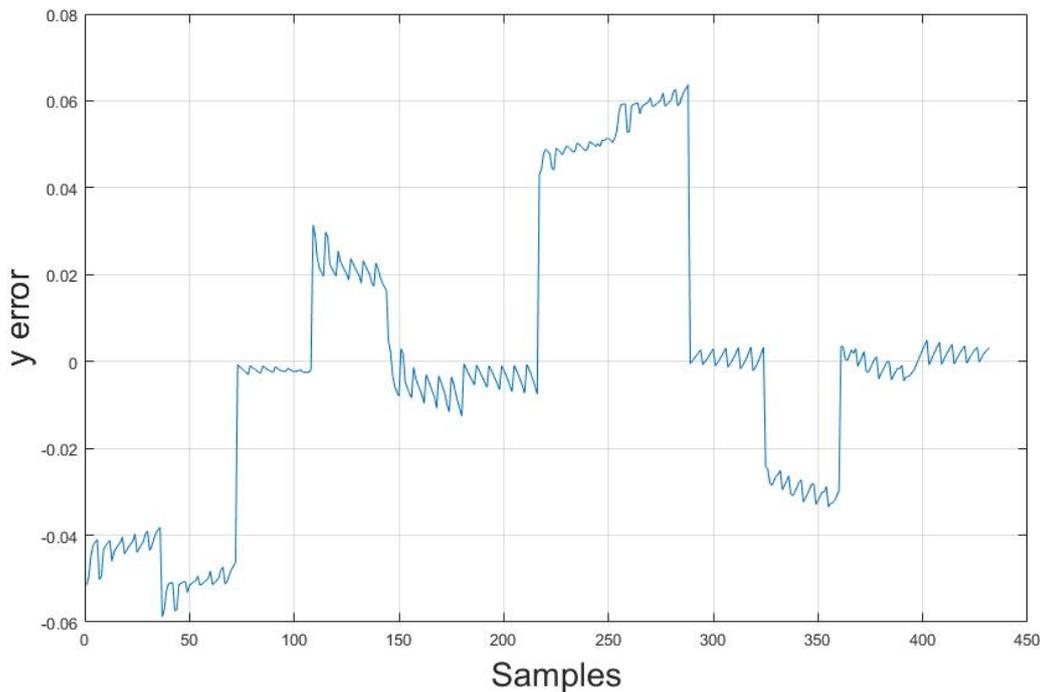


Figura 10. errore di stima di y in presenza di corrente di coppia

Analogamente anche per le misure dello spostamento in y accade il medesimo fatto:

e_y : media=-0,00026mm varianza=0,00098 errore massimo=0,064mm

Dalle prove risulta un errore di stima di posizione ritenuto non accettabile e quindi viene fatta una ricerca dei parametri che costituiscono il modello della deviazione delle correnti. Al contrario si nota che l'errore di angolo è limitato ai centesimi di grado quindi molto piccolo. Per quanto riguarda la stima dell'angolo risultano delle misure più accettabili perché l'errore rimane sempre al di sotto del grado.

e_θ : media=0,048° varianza=0,2158 errore massimo=0,71°

Per quanto riguarda quindi l'introduzione dei contributi causati dalle correnti di coppia è necessario effettuare una compensazione. Ciò significa cercare una equazione che rappresenti questi deviazioni dalla misura senza la presenza di correnti.

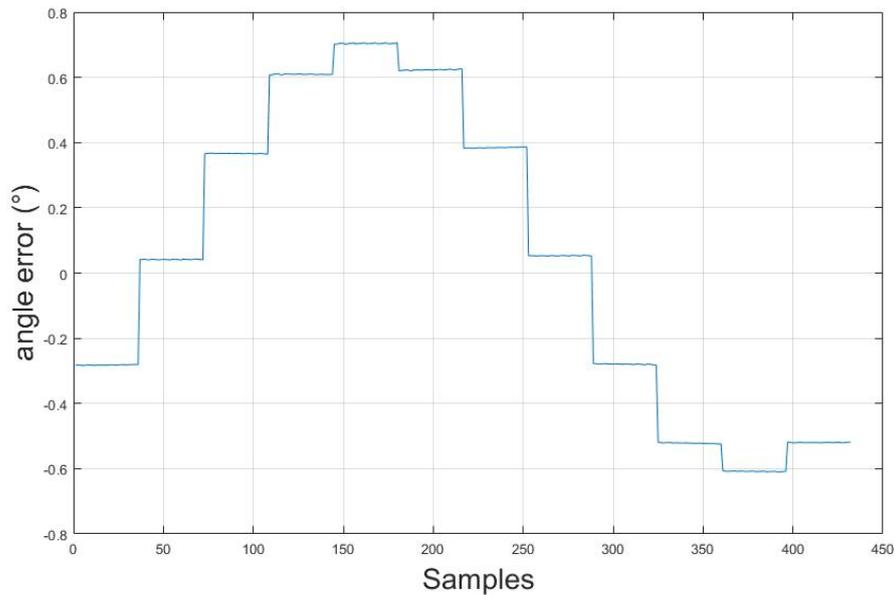


Figura 11. errore di stima di angolo in presenza di correnti di coppia

La seconda prova effettuata è la valutazione dell’algoritmo di stima in presenza di correnti di levitazione.

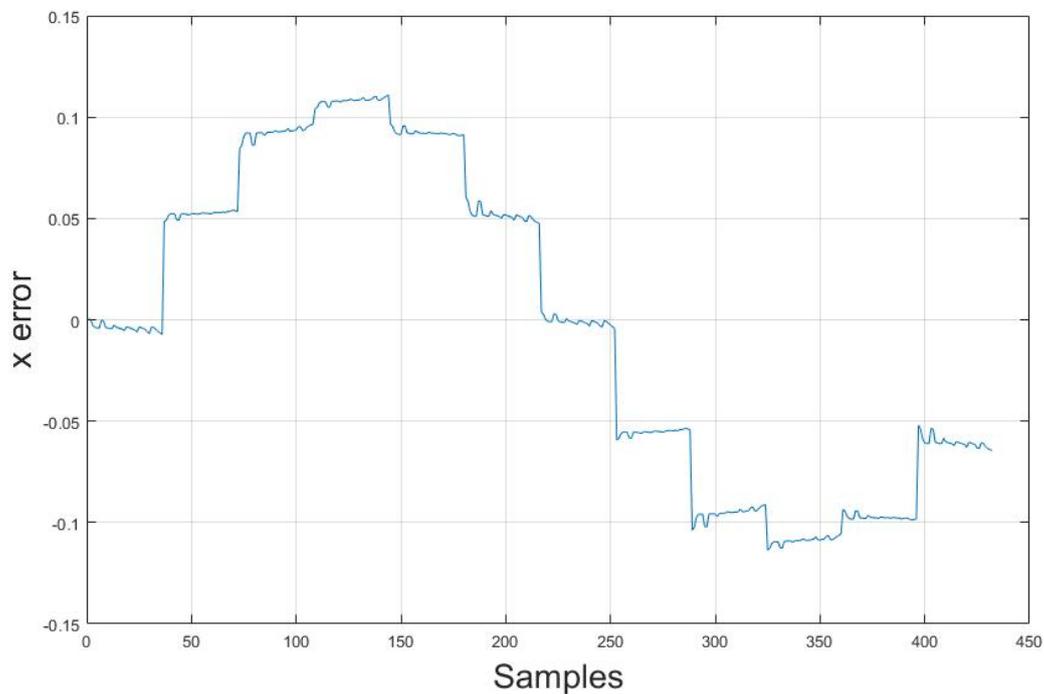


Figura 12. errore di stima di x in presenza di corrente di bearing

Il risultato della stima con le correnti di sospensione evidenzia un netto errore che non può essere accettato perché raggiunge più del 20% dello spostamento massimo. Analogamente per l’errore in y come si può vedere dalla figura successiva.

e_x : media=-0,0022mm varianza=0,006 errore massimo=0,114mm

e_y : media=0,0013mm varianza=0,006 errore massimo=0,115mm

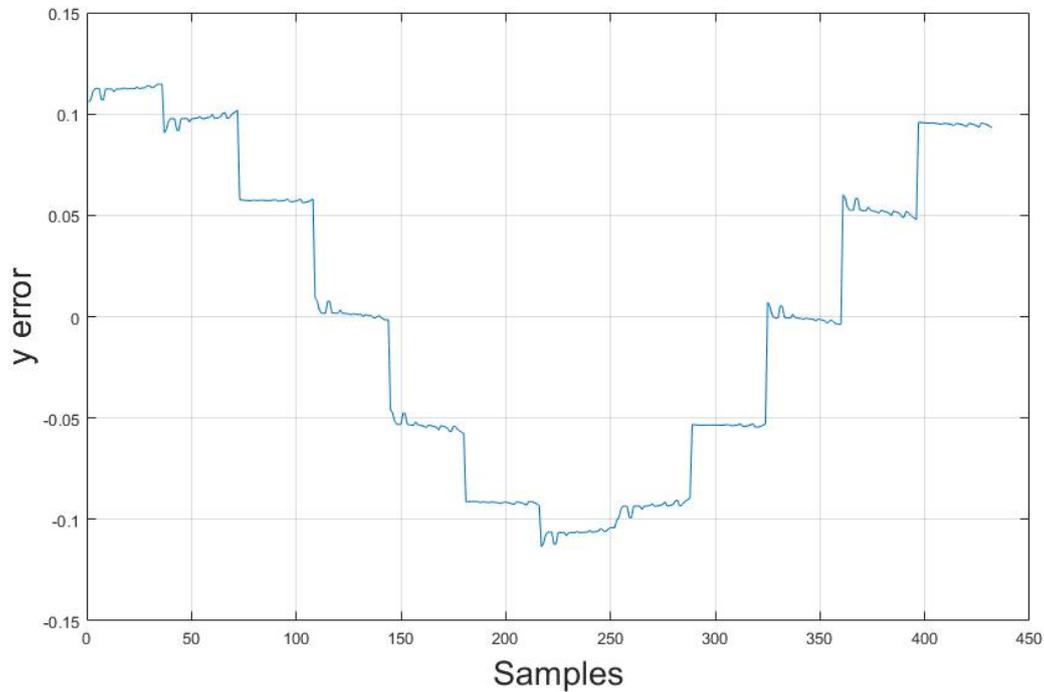


Figura 13.errore di stima di y in presenza di corrente di bearing

Una particolarità che si può notare è l'andamento sinusoidale sia dell'errore in x che quello in y. Osservando le due figure si notano 12 gradini nell'andamento dell'errore che corrispondono, per come sono stati organizzati i campioni, ai diversi angoli di rotore magnetico. Contrariamente al peggioramento inaccettabile delle due stime di x e y l'errore dell'angolo è contenuto.

e_θ : media=-0,0305° varianza=0,00018 errore massimo=0,05°

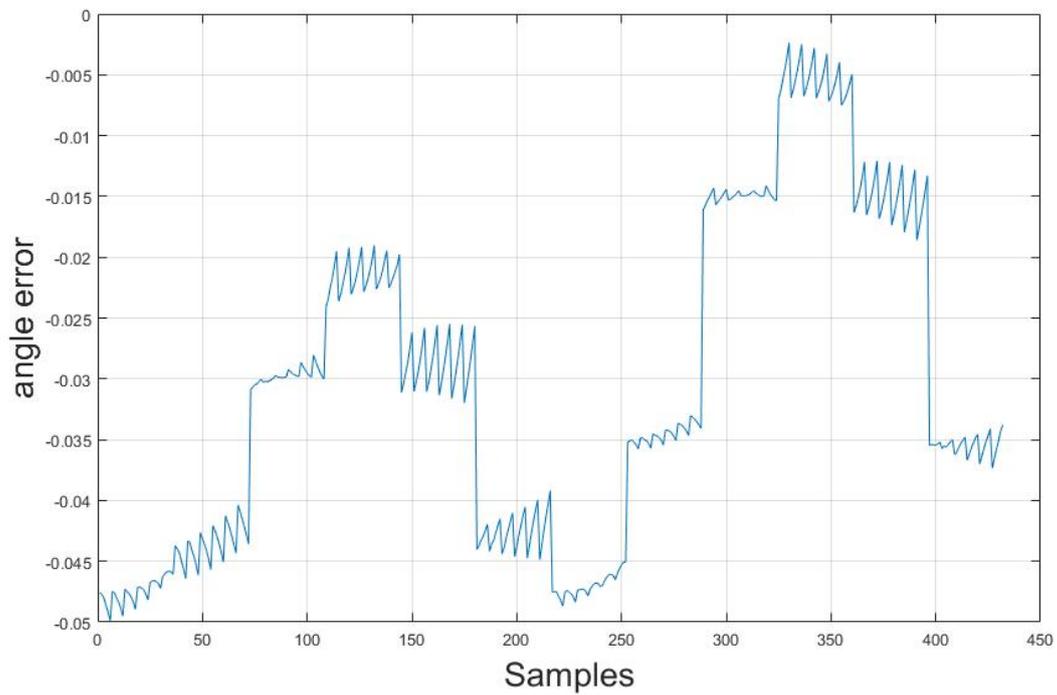


Figura 14.errore di stima dell'angolo di rotore in presenza di corrente di bearing

I risultati delle stime nella realtà andrebbero sommate perché quando il motore bearingless è attivo lo sono anche entrambi i controlli di bearing e di coppia agiscono sul rotore generando correnti che creano campi magnetici. Volendo prendere il caso peggiore delle stime fatte si ha una stima finale che può avere un errore massimo di x , di y e di θ :

$$e_x=0,17\text{mm} \quad e_y=0,17\text{mm} \quad e_\theta=0,76^\circ$$

Da questa verifica risulta necessario modellare la deviazione delle correnti per poterle sottrarre e riuscire a migliorare la stima.

4 Deviazioni delle misure dovute alle correnti di coppia e di bearing

Il problema iniziale è stato stimare i parametri che costituiscono il modello delle misure sui sensori senza l'applicazione di correnti esterne. Il modello che è stato ipotizzato dipende dalla posizione x , y e ϑ del rotore. Con l'introduzione delle correnti il nuovo modello ha dei contributi che dipendono oltre che dalla posizione dall'intensità delle correnti.

$$B(i) = f_1(x, y, \vartheta) + f_2(\vec{I}_B(I_B, \alpha), x, y, \vartheta) + f_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha), x, y, \vartheta) + e(i) \quad (30)$$

I parametri trovati in precedenza rimangono tali ipotizzando che siano disaccoppiati dai valori delle correnti. Le misure effettuate sono state fatte ipotizzando un certo modulo e angolo dei due rispettivi vettori corrente. Dato che la funzione f_l è conosciuta e non serve trovare nuovamente i parametri e quindi viene sottratto al valore di $B_{current}$ affetto da corrente il valore di B non affetto dalle correnti nella stessa configurazione di magnete. Quindi la nuova equazione diventa:

$$B_{current}(i) - B(i) = f_2(\vec{I}_B(I_B, \alpha_B), x, y, \vartheta) + f_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta) + e(i) \quad (31)$$

Le prove effettuate si riferiscono a una massima corrente con un determinato angolo vettoriale e quindi successivamente sarà necessario una nuova analisi FEM per introdurre diversi tipi di corrente. Sfruttando il disaccoppiamento tra correnti di statore e di rotore sono state fatte le prove in maniere indipendente. Inizialmente applicando solamente la corrente massima di coppia e successivamente la corrente massima di bearing.

Consideriamo le nuove misure come:

$$Dev_T(i) = B_{current_T}(i) - B(i) \quad (32)$$

$$Dev_B(i) = B_{current_B}(i) - B(i) \quad (33)$$

La ricerca dei parametri si divide in due applicazioni dei minimi quadrati per trovare le funzioni:

$$Dev_T(i) = f_3(\vec{I}_T(I_T, \alpha), x, y, \vartheta) + e_T(i) \quad (34)$$

e

$$Dev_B(i) = f_2(\vec{I}_B(I_B, \alpha), x, y, \vartheta) + e_B(i) \quad (35)$$

4.1 Parametrizzazione delle deviazioni dovute alle correnti di coppia

L'equazione parametrica è stata scelta considerando un termine costante e le combinazioni di termini moltiplicati per x , y , $\cos(\vartheta)$ e $\sin(\vartheta)$ fino al secondo grado. In questo modo si ricavano 17 parametri.

$$\begin{aligned} Dev_T = & a_1 + a_2x' + a_3y' + a_4 \cos(\vartheta') + a_5 \sin(\vartheta') + a_6x' \cos(\vartheta') + & (36) \\ & a_7y' \cos(\vartheta') + \\ & a_8x' \sin(\vartheta') + a_9x' \sin(\vartheta') + a_{10}x'^2 + a_{11}y'^2 + a_{12} \cos(\vartheta')^2 + \\ & a_{13} \sin(\vartheta')^2 + a_{14}x'^2 + a_{15}y'^2 + a_{16}x'y' + a_{17} \cos(\vartheta') \sin(\vartheta') \end{aligned}$$

Per ogni sensore vanno trovati i parametri separatamente perché la corrente nel riferimento di ogni sensore non è la stessa per tutti. I risultati indicano una presenza di tre parametri caratteristici per ogni sensore. In particolare un parametro costante, un parametro moltiplicato per il $\sin(\vartheta')$ e uno per il $\cos(\vartheta')$. Quindi per ogni sensore:

$$\Delta B_1 = 0.0016$$

$$\Delta B_2 = 0.0016 - 0.0003\cos(\vartheta)$$

$$\Delta B_3 = -0.0002 \sin(\vartheta) - 0.0001\cos(\vartheta)$$

$$\Delta B_4 = -0.0016 - 0.0002 \sin(\vartheta) + 0.0001\cos(\vartheta)$$

$$\Delta B_5 = -0.0016$$

$$\Delta B_6 = -0.0016 + 0.0002 \sin(\vartheta) + 0.0001\cos(\vartheta)$$

4.2 Parametrizzazione delle deviazioni dovute alle correnti di levitazione

Analogamente alla parametrizzazione delle deviazioni dovute alle correnti di rotazione è stata ipotizzata una equazione identica perché il motivo della ricerca è lo stesso.

$$\begin{aligned}
Dev_B = & a_1 + a_2x' + a_3y' + a_4 \cos(\vartheta') + a_5 \sin(\vartheta') + a_6x' \cos(\vartheta') & (37) \\
& + a_7y' \cos(\vartheta') \\
& + a_8x' \sin(\vartheta') + a_9x' \sin(\vartheta') + a_{10}x'^2 + a_{11}y'^2 + a_{12} \cos(\vartheta')^2 \\
& + a_{13} \sin(\vartheta')^2 + a_{14}x'^2 + a_{15}y'^2 + a_{16}x'y' \\
& + a_{17} \cos(\vartheta') \sin(\vartheta')
\end{aligned}$$

In questa applicazione dei minimi quadrati è risultato un parametro caratteristico prevalente rispetto agli altri : il parametro del termine costante.

$$\Delta B_1 = -0.0009$$

$$\Delta B_2 = -0.0009$$

$$\Delta B_3 = 0.0018$$

$$\Delta B_4 = -0.0009$$

$$\Delta B_5 = -0.0009$$

$$\Delta B_6 = 0.0018$$

5 Algoritmo di stima con compensazione delle misure

Ai fini dell'algoritmo di stima è stato necessario generalizzare il contributo delle correnti in modo da avere una compensazione da applicare a seconda della diversa intensità di corrente e dall'angolo del vettore corrente. Sia per le correnti di coppia che per le correnti di bearing risulta necessario ipotizzare quali siano le deviazioni per correnti che si discostano dai valori utilizzati nell'analisi FEM. L'obiettivo è quindi di mappare la funzione $f_2(\vec{I}_B(I_B, \alpha_B), x, y, \vartheta)$ e la funzione $f_3(\vec{I}_T(I_T, \alpha_T), x, y, \vartheta)$ per tutti le possibili configurazioni dei vettori corrente.

Le correnti di bearing:

$$I_B \in [0, I_{B_Max}] \text{ e } \alpha_B \in [0, 2\pi]$$

Le correnti di coppia:

$$I_T \in [0, I_{T_Max}] \text{ e } \alpha_T \in [0, 2\pi]$$

Una prima ipotesi è quella di considerare il contributo causato dalla corrente lineare con l'ampiezza del vettore e moltiplicata per un termine che dipende dall'angolo del vettore corrente e dal sensore considerato.

$$\Delta B = \frac{I}{I_{Max}} Dev_S \quad (38)$$

Per costruire l'algoritmo viene diviso l'angolo giro in 6 settori, ogni settore è delimitato dai denti sporgenti dello statore sui quali ci sono gli avvolgimenti di bearing e coppia e vengono applicate le correnti. Per simmetria possiamo sapere come si comportano tutti i sensori solamente se si riproduce il caso semplificato che conosciamo tramite le misure fatte con SPIN. In particolare la corrente di coppia nella simulazione fatta viene applicata a 60° rispetto al nostro sistema di riferimento quindi possiamo conoscere i comportamenti dei sensori solamente se il vettore corrente ha la stessa intensità e angoli multipli di 60° . Da qui parte il ragionamento dell'algoritmo. Se una corrente ha angolo non multiplo di 60° non si può conoscere in base alle prove che abbiamo come saranno fatti i parametri sui sensori. Per risolvere questo problema si ipotizza che i parametri di ogni sensore dovuti alla corrente siano

una somma di due contributi pesati dei parametri che ci sarebbero se la corrente fosse allineata agli estremi del settore considerato. Viene analizzato il procedimento uno step alla volta:

- 1) Viene calcolato il modulo e l'angolo del vettore corrente
- 2) Si calcolano gli estremi che delimitano il settore contenente la corrente per ogni sensore

$$\alpha_S = \alpha - \vartheta_S \quad (39)$$

In questo modo si trova l'angolo del vettore corrente in riferimento al sensore.

Chiamiamo con f_s l'estremo inferiore del settore e c_s l'estremo superiore.

$$f_s = \text{floor}\left(\frac{\alpha_S}{\pi/3}\right) \quad (40)$$

$$c_s = f_s + 1 \quad (41)$$

- 3) Si trova l'angolo α' nel sistema di riferimento del settore individuato

$$\alpha = \alpha_S - \frac{\pi}{3} f_s \quad (42)$$

- 4) Si effettua una media pesata con peso proporzionale alla posizione dell'angolo α' nel settore. Quindi la deviazione risultante è il contributo della deviazione causata dal vettore corrente se esso giacesse sull'estremo inferiore e se giacesse sull'estremo superiore.

$$Dev_S = \text{weight}_{f_s} + \text{weight}_{c_s} \quad (43)$$

- 5) Infine la deviazione sul sensore è mappata moltiplicando il risultato del peso per il rapporto tra il modulo della corrente e il massimo modulo utilizzato nelle misure.

Sono necessari alcuni accorgimenti riguardanti l'utilizzo di questo algoritmo per le correnti di coppia in quanto la deviazione sfrutta l'angolo stimato e quindi senza compensazione effettuata. Vedremo in seguito come si possa migliorare la deviazione modificando l'algoritmo.

5.1 Validazione con compensazione delle correnti di bearing

Le misure sulle quali viene valutato l'algoritmo di stima sono il risultato dell'applicazione di una unica corrente di bearing utilizzata dall'analisi *FEM*. Perciò non è possibile in base ai dati posseduti valutare l'algoritmo per le diverse correnti che possono essere generate dagli avvolgimenti di levitazione. A prescindere da ciò si conosce sempre il vettore corrente di levitazione in quanto è il controllo di levitazione che la genera. Questa è l'informazione utile che serve all'algoritmo per creare una compensazione da sommare ai valori letti sui sensori.

5.1.1 Aggiornamento dell'algoritmo per le deviazioni delle correnti di bearing

La compensazione considerata è formata da una componente costante che dipende dal sensore su cui si vuole effettuare la compensazione.

$$B_S = B_{Detected} - f_2(\vec{I}_B(I_B, \alpha), x, y, \vartheta)_S = B_{Detected} - a_S \quad (44)$$

5.1.2 Prove di stima con compensazione di corrente

L'equazione (44) riassume in modo semplice il compito dell'algoritmo di compensazione, ossia quello di compensare una deviazione introdotta dalla corrente di levitazione sulla misura del sensore S ($S \in [1,6]$).

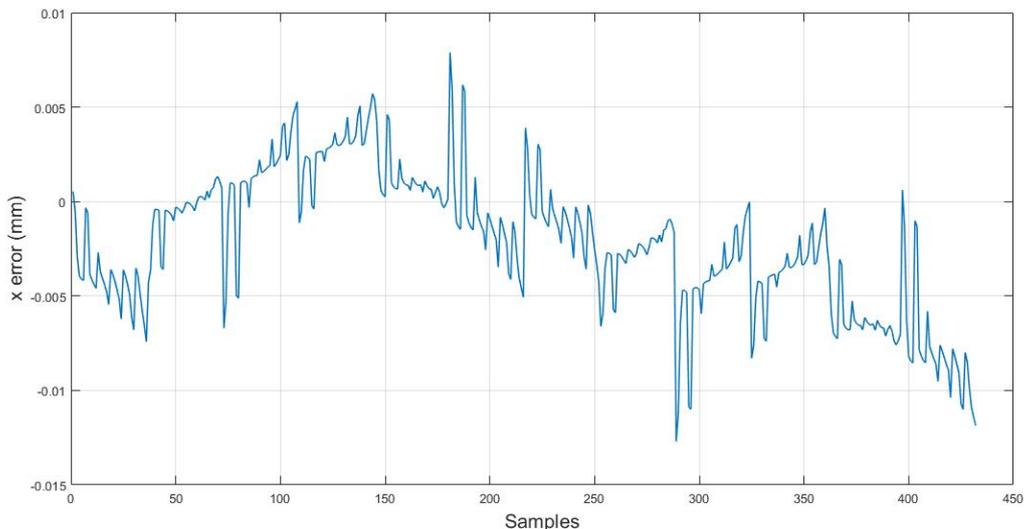


Figura 15.errore di stima di x con compensazione della deviazione di corrente di bearing

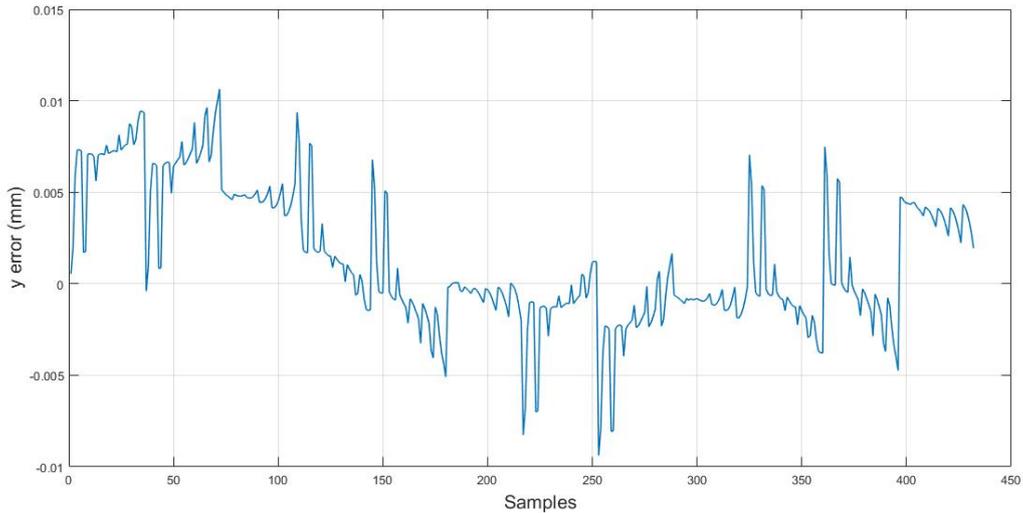


Figura 16. errore di stima di y con compensazione della deviazione di corrente di bearing

Dalle due figure (15 e 16) si vede il netto miglioramento di stima delle due posizioni lungo l'asse x e y. La compensazione della deviazione parametrizzata con una costante per ogni sensore è quindi necessaria per ridurre significativamente l'errore di stima.

e_x : media=-0,0022mm varianza=0,000014 errore massimo=0,013mm

e_y : media=0,0014mm varianza=0,000014 errore massimo=0,011mm

L'angolo stimato non cambia perché è stato scelto di non eseguire la stima dopo aver effettuato la compensazione. Il motivo è stato indicato dal fatto che l'angolo stimato non subisce significativamente l'effetto della deviazione introdotta dalla corrente di levitazione.

5.2 Validazione con compensazione delle correnti di T

Le stime risultanti dalle misure disturbate dalle deviazioni di corrente di coppia sono state considerate errate e di conseguenza è stata parametrizzata la deviazione che ogni sensore subisce dalla presenza del disturbo della misura. Inizialmente l'angolo viene stimato con i valori ricavati dai sensori senza aver applicato la compensazione. La deviazione di corrente di coppia è risultato essere mappata con tre componenti, una costante e due dipendenti dall'angolo di rotore.

$$f_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta)_S = a_{1s} + a_{2s} \sin(\vartheta) + a_{3s} \cos(\vartheta) \quad (45)$$

5.2.1 Formulazione di tre diversi tipi di compensazione delle correnti di coppia

Con l'obiettivo di raggiungere risultati accettabili semplificando i calcoli computazionali è stato scelto di introdurre gradualmente i coefficienti. In questo modo si riesce a capire la differenza tra diversi tipi di compensazione applicata.

Il primo tipo di compensazione è solamente con il termine costante tralasciando i termini che dipendono dall'angolo che comportano ulteriori calcoli.

$$f'_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta)_S = a_{1S} \quad (46)$$

Il secondo tipo è con la forma parametrizzata completa con i termini dipendenti dall'angolo di rotore.

$$f_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta)_S = a_{1S} + a_{2S} \sin(\vartheta) + a_{3S} \cos(\vartheta) \quad (47)$$

La terza prova è stata effettuata con la deviazione completa dei termini dipendenti da ϑ ma eseguendo l'aggiornamento della stima dell'angolo per rieffettuare la deviazione con l'angolo corretto dalla prima iterazione.

5.2.2 Prove di stima con deviazione costante

Le misure dei sensori sono rielaborate con una compensazione costante che dipende dal vettore corrente di coppia

$$B_S = B_{Detected} - f'_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta)_S = B_{Detected} - a_{1S} \quad (48)$$

La misura così ottenuta viene utilizzata per l'algoritmo di stima di posizione.

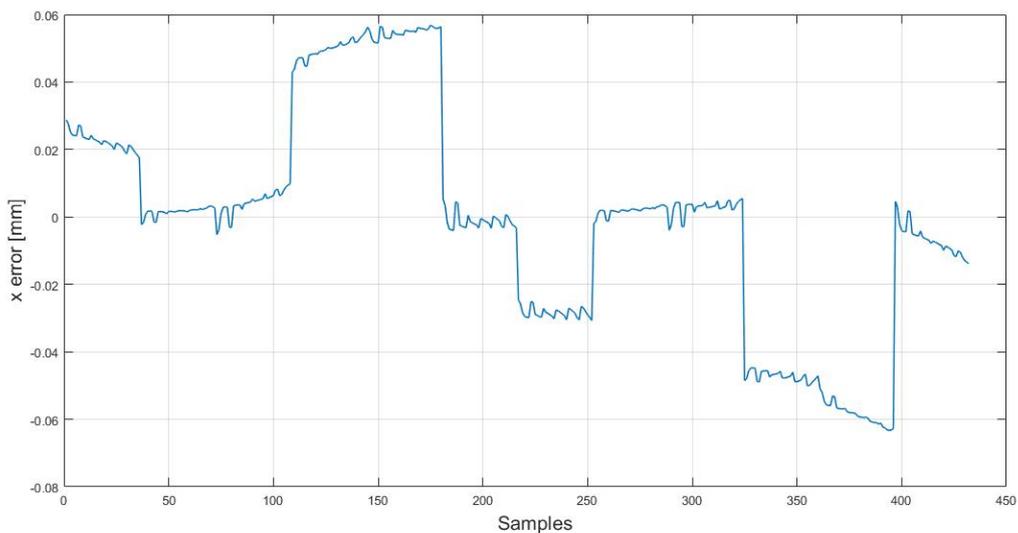


Figura 17.errore di stima di x con compensazione costante della deviazione di corrente di coppia

I risultati statistici delle due stime in x e y sono i seguenti:

e_x : media=-0,00041mm varianza=0,0011 errore massimo=0,063mm

e_y : media=0,0005mm varianza=0,001 errore massimo=0,061mm

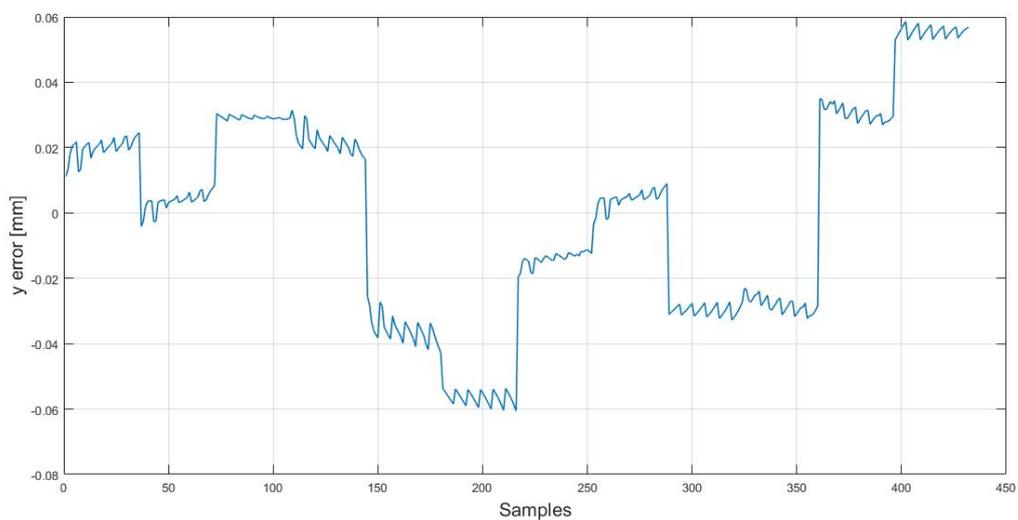


Figura 18.errore di stima di y con compensazione costante della deviazione di corrente di coppia

Come si può notare dalle due figure l'errore rimane elevato come per le stime effettuate prima della compensazione costante. L'andamento degli errori rispetto ai campioni effettuati cambia rispetto al caso senza compensazioni.

5.2.3 Prove di stima con deviazione costante e dipendente dall'angolo di rotore

Dato che la prima stima non è soddisfacente viene considerata la compensazione formata dall'equazione completata dei due parametri che moltiplicano i termini dipendenti dall'angolo di rotore. Questa prova rivela quanto l'errore di stima di angolo influisce sulla giusta compensazione della deviazione.

$$\begin{aligned} B_S &= B_{Detected} - f'_3(\vec{I}_M(I_M, \alpha_M), x, y, \vartheta)_S \\ &= B_{Detected} - a_{1S} - a_{2S} \sin(\vartheta) - a_{3S} \cos(\vartheta) \end{aligned} \quad (49)$$

Tutti e tre i parametri sono diversi per ogni sensore.

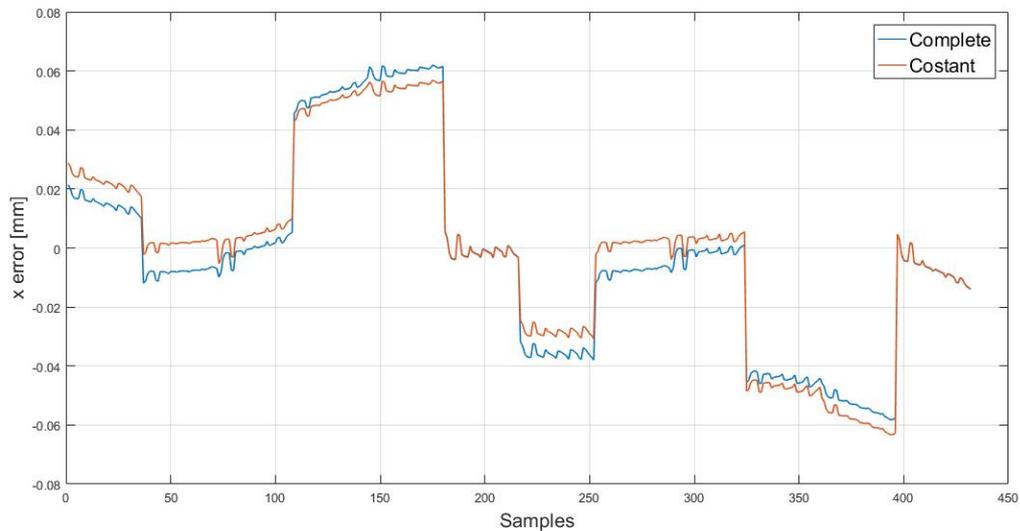


Figura 19. errore nella stima di x confronto tra compensazione costante e compensazione con termini dipendenti dall'angolo di rotazione

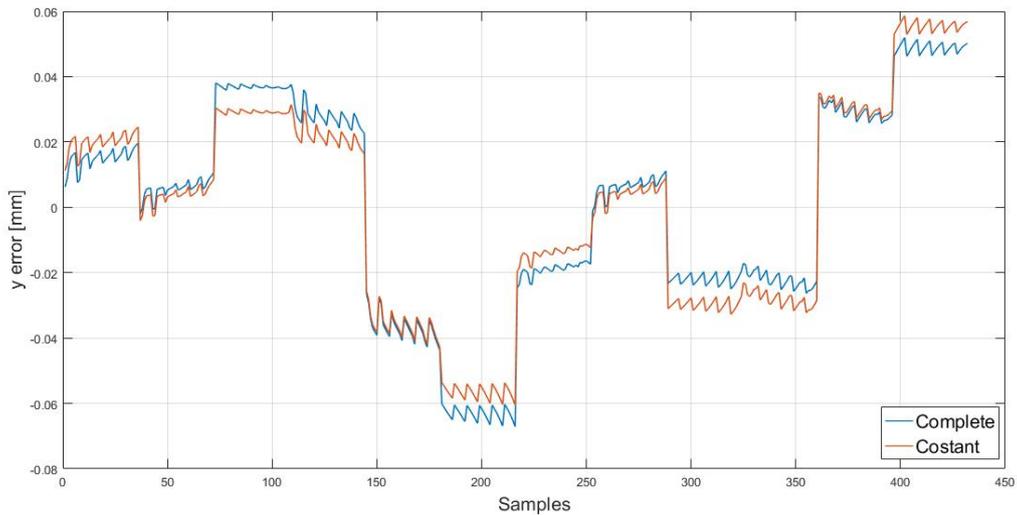


Figura 20. errore nella stima di y confronto tra compensazione costante e compensazione con termini dipendenti dall'angolo di rotazione

Come si può osservare dall'andamento degli errori non si apprezza un miglioramento come ci aspettavamo ma al contrario la compensazione della deviazione risente molto dell'errore di stima di angolo.

e_x : media=-0,0026mm varianza=0,0011 errore massimo=0,062mm

e_y : media=0,00057mm varianza=0,0011 errore massimo=0,067mm

5.2.4 Prove di stima con deviazione costante, parte dipendente dall'angolo di rotore e aggiornamento dell'angolo

Nell'ultima prova di stima viene aggiunto l'aggiornamento dell'angolo stimato. Inizialmente l'algoritmo effettua una prima stima di ϑ che serve alla parte creazione della deviazione. Analogamente alla prova precedente viene effettuata una compensazione utilizzando l'equazione con la componente costante e le due parti dipendenti dall'angolo di rotazione appena stimato. Una volta eseguita la compensazione della misura di B viene effettuata nuovamente la stima dell'angolo con i nuovi valori compensati. Il nuovo angolo risulta essere più preciso di quello stimato con i valori di B disturbati dalle correnti e di conseguenza la il calcolo di compensazione dipendente dall'angolo risulta essere maggiormente precisa. Successivamente è stato scelto di eseguire per altre 9 volte l'iterazione di aggiornamento dell'angolo. Le prove che seguono illustrano il netto miglioramento della stima a valle di un utilizzo del metodo iterativo.

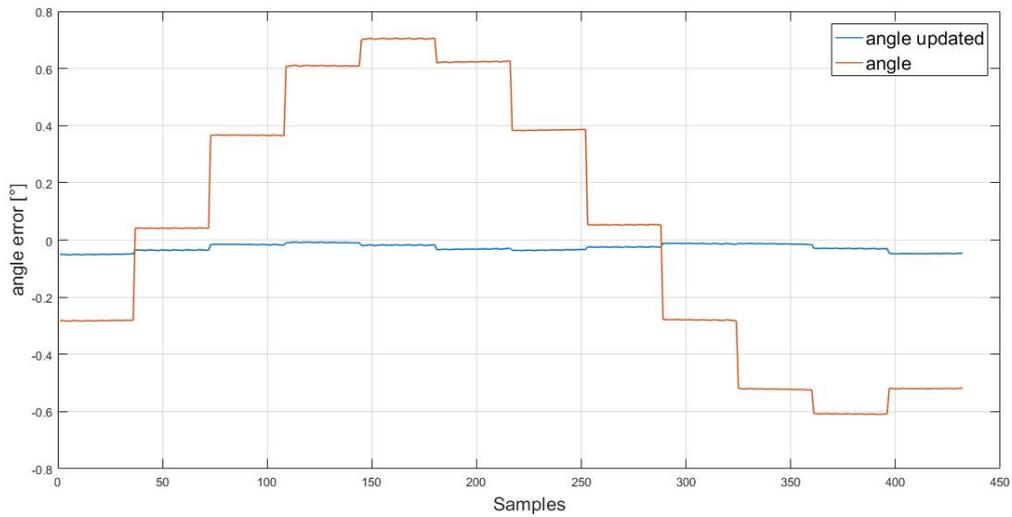


Figura 21. errore di stima dell'angolo di rotore con misure di sensore compensate dalla deviazione di corrente di coppia e senza aggiornamento

La figura () mostra il netto miglioramento rispetto alla stima effettuata precedentemente con i valori disturbati. L'errore dell'angolo ricavato dall'utilizzo delle misure compensate ha i seguenti dati statistici:

eg: media=-0,0269° varianza=0,0002 errore massimo=0,052°

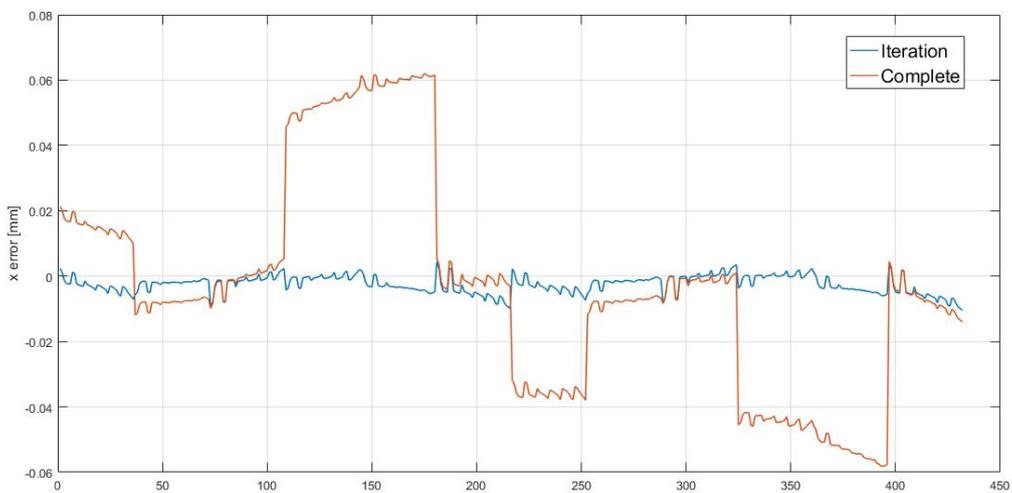


Figura 22. stima di posizione x per il metodo con Iterazione della compensazione di correnti di coppia

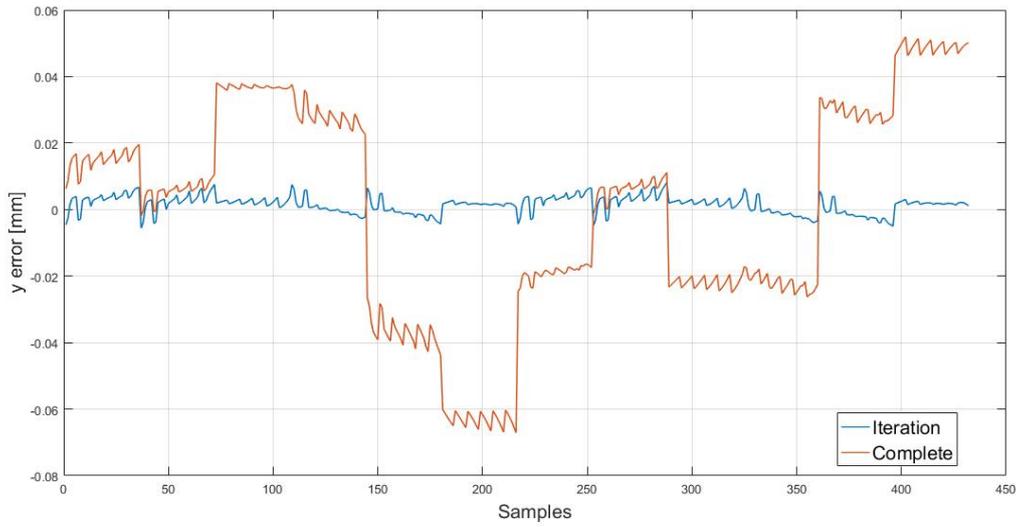


Figura 23. errore di stima di y per il metodo con Iterazione della compensazione di correnti di coppia

Dai risultati si riconosce che il metodo iterativo migliora significativamente i risultati della stima.

e_x : media=-0,0025mm varianza=0,000007 errore massimo=0,01mm

e_y : media=0,0015mm varianza=0,000007 errore massimo=0,008mm

6 Algoritmo di stima robusto rispetto alle deviazioni

I dati risultanti dalle misure dei sensori sono 6 per ogni posizione quindi si ha una certa ridondanza in quanto ne servirebbero solo due per la stima della posizione e per l'angolo. Per sfruttare al meglio questa opportunità è stato scelto di fare una analisi sulla sensitività delle misure, quindi dei sensori.

6.1 Analisi sensitività

L'analisi di sensitività serve a capire quanto una misura è sensibile alla variazione delle variabili. Se una misura è molto sensibile alle variazioni significa che la presenza di un disturbo può modificare significativamente il risultato. L'idea è rappresentata nella figura seguente dove si ipotizza di avere due rette B1 e B2 che dipendono dalla variabile x. La differente inclinazione di esse corrisponde a due differenti risultati a fronte di una variazione di x.

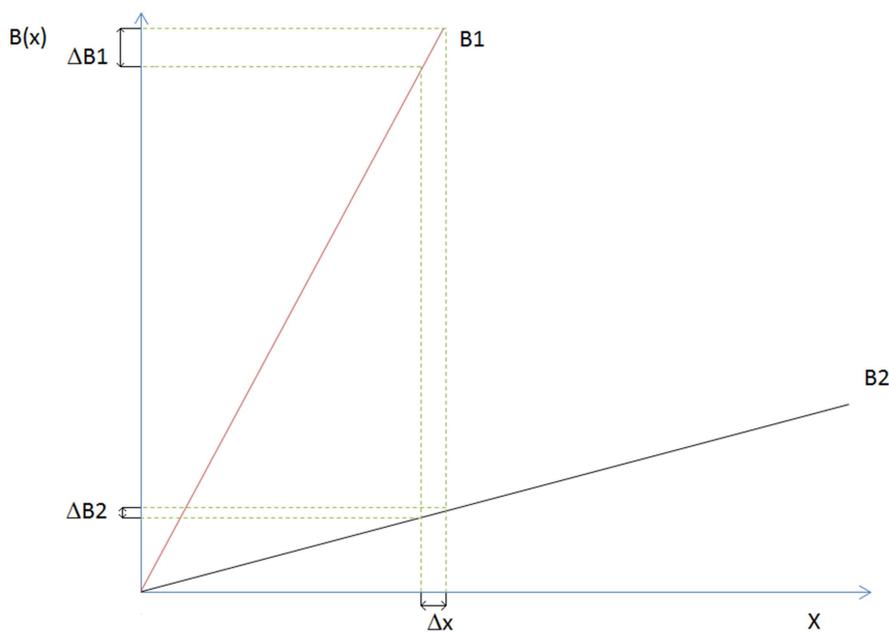


Figura 24. Differenti intervalli che corrispondono alla stessa variazione di x

L'inclinazione della retta indica quanto la misura di B(x) varia al variare della x. Il nostro interesse è quello di trovare il problema opposto. Quanto una variazione di B condiziona la stima della posizione x.

$$\frac{\delta B}{\delta x} \rightarrow \frac{\delta x}{\delta B} \quad (50)$$

Successivamente si cerca dare un significato in termini di peso al valore trovato per confrontarlo con altri. La nostra ricerca si orienta nel cercare quando questa funzione abbia valori più bassi perché corrisponde a una minore sensibilità. Per questo motivo viene introdotto un peso che sia inversamente proporzionale al valore della derivata parziale.

$$Weight = \frac{1}{\frac{\delta x}{\delta B}} \quad (51)$$

Questo serve per ottimizzare la scelta delle coppie con cui viene stimata la posizione. L'obiettivo è trovare le combinazioni di sensori che abbiano poca sensibilità alle variazioni di misura. Il motivo è cercare di diminuire l'errore di stima in presenza di disturbi che possono essere esterni sui sensori oppure disturbi dovuti all'approssimazione del modello. Inoltre le deviazioni delle misure dovute alle correnti possono essere considerate dei disturbi quindi l'analisi di sensibilità potrebbe essere utile a evitare di compensare i contributi delle correnti e quindi diminuire il carico computazionale. L'analisi si basa sul calcolo della derivata parziale dell'equazione ricavata dai minimi quadrati con 3 parametri. Avendo notato dalle stime fatte che l'errore di angolo stimato è accettabile, è stato scelto di dare per conosciuto l'angolo di rotore.

6.1.1 Analisi per ogni sensore

Inizialmente viene fatta l'analisi di sensibilità su ogni sensore che consiste nel calcolare il gradiente rispetto allo spostamento in x e in y dell'equazione con 3 parametri considerata.

$$\frac{\delta B(i)}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} (a_1 \cos(\vartheta') + a_2 x' \cos(\vartheta') - a_3 y' \sin(\vartheta')) \quad (52)$$

$$\frac{\delta B(i)}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta y} (a_1 \cos(\vartheta') + a_2 x' \cos(\vartheta') - a_3 y' \sin(\vartheta')) \quad (53)$$

$$\vartheta' = \hat{\vartheta} - \vartheta_S \quad (54)$$

Quindi espandendo la x' e la y' in modo tale che siano nel sistema di riferimento globale per fare il giusto gradiente:

$$\frac{\delta B(i)}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} (a_1 \cos(\vartheta') + a_2(x \cos \vartheta_S + y \sin \vartheta_S) \cos(\vartheta') - a_3(y \cos \vartheta_S - x \sin \vartheta_S) \sin(\vartheta')) \quad (55)$$

$$\frac{\delta B(i)}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta y} (a_1 \cos(\vartheta') + a_2(x \cos \vartheta_S + y \sin \vartheta_S) \cos(\vartheta') - a_3(y \cos \vartheta_S - x \sin \vartheta_S) \sin(\vartheta')) \quad (56)$$

Le due derivate parziali sono:

$$B_x = \frac{\delta B(i)}{\delta x} = a_2(x \cos \vartheta_S) \cos(\vartheta') - a_3(-x \sin \vartheta_S) \sin(\vartheta') \quad (57)$$

$$B_y = \frac{\delta B(i)}{\delta y} = a_2(y \sin \vartheta_S) \cos(\vartheta') - a_3(y \cos \vartheta_S) \sin(\vartheta') \quad (58)$$

Dato che l'obiettivo è avere l'inverso della derivata parziale della funzione $\delta x(B_x)/\delta B_x$, il peso diventa semplicemente la funzione B_x . Analogamente per B_y il peso per la sensitività di y . Si traccia l'andamento del peso con l'angolo ϑ_S . Si osserva che i sensori opposti hanno identico andamento del peso della sensitività in x e y .

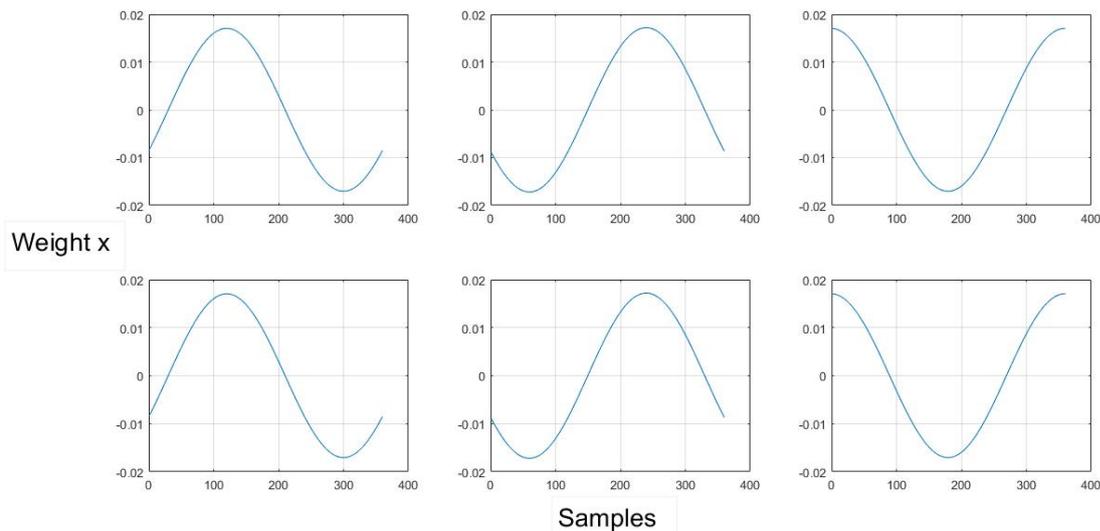


Figura 25. Pesì delle sensitività di x dei sei sensori

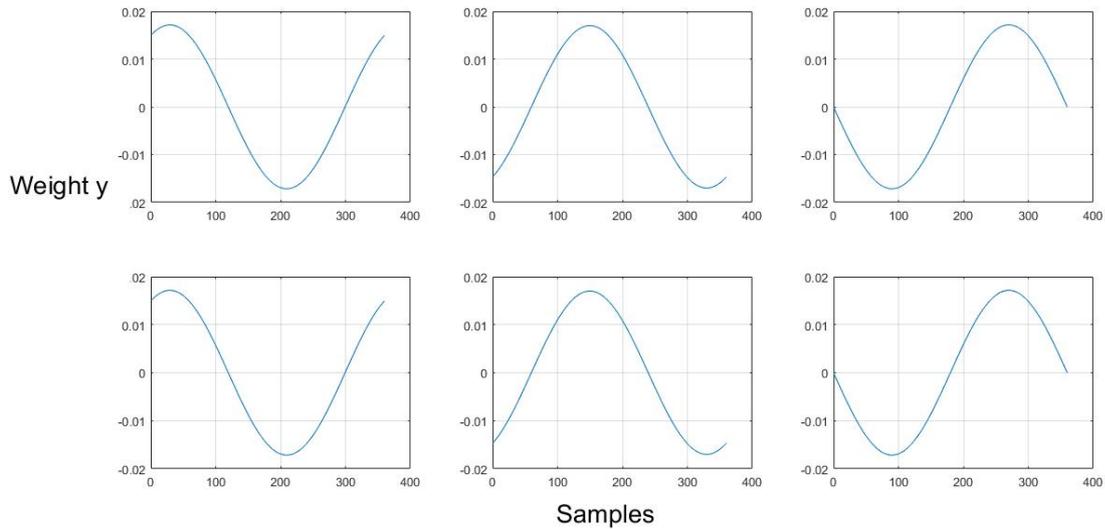


Figura 26. Pesì delle sensitività in y dei 6 sensori

Successivamente si controlla la sensitività delle coppie di sensori rispetto allo spostamento in x e analogamente si cerca per lo spostamento in y. Prendendo due sensori i e j ($i, j=1..6, i \neq j$) la sensitività della coppia di sensori è la seguente per x e y rispettivamente:

$$Weight_{x_{i,j}} = \frac{1}{\frac{\delta x}{\delta B_i} + \frac{\delta x}{\delta B_j}} = \frac{1}{\frac{\delta B}{\delta x_i}} + \frac{1}{\frac{\delta B}{\delta x_j}} = \frac{\frac{\delta B}{\delta x_i} \frac{\delta B}{\delta x_j}}{\frac{\delta B}{\delta x_i} + \frac{\delta B}{\delta x_j}} \quad (59)$$

Cioè viene fatta la somma della sensitività dei due sensori e quindi l'inverso per trovare il peso della stima di x che risulta dalle due coppie. L'obiettivo è quello di avere un peso che diventa zero quando anche solo una sola delle due sensitività di x tende all'infinito. Per il risultato ottenuto in precedenza è possibile limitare le possibili combinazioni di prove perché i primi tre sensori hanno gli stessi andamenti del 4°, 5° e 6° rispettivamente. Vengono considerate le seguenti uguaglianze ai fini dello studio della sensitività combinata:

$$S4=S1, S5=S2, S6=S3$$

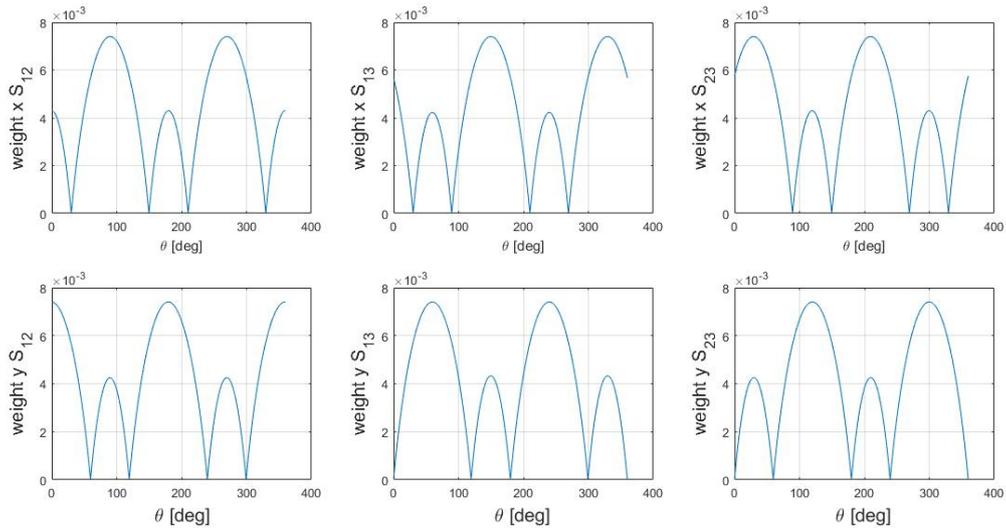


Figura 27. Pesi delle combinazioni di coppie per x e per y

6.1.2 Analisi con somma x + y

La stima della posizione x e y viene eseguita risolvendo un sistema lineare di due equazioni e due incognite, quindi il peso dato alla coppia di sensori deve tenere in considerazione della sensitività per x in contemporanea a quella per y. Per questo scopo è stato pensato un metodo che scegliesse la coppia di sensori da utilizzare per la stima in base alla somma dei pesi della sensitività in x e in y.

$$Weight_{Composed} = Weight_{x_{i,j}} + Weight_{y_{i,j}} \quad (60)$$

Con questo metodo si cerca di garantire che le coppie selezionate abbiano minore sensitività tenendo in considerazione gli intervalli di angolo migliori per la somma dei pesi rispetto alle due stime da effettuare. Si può pensare di effettuare una media pesata tra le stime delle possibili combinazioni di sensori oppure di individuare dei settori di angolo nei quali i pesi di alcune coppie siano maggiori rispetto ad altre. Di conseguenza è necessario selezionare le coppie ritenute migliori per stimare e non utilizzare le coppie peggiori.

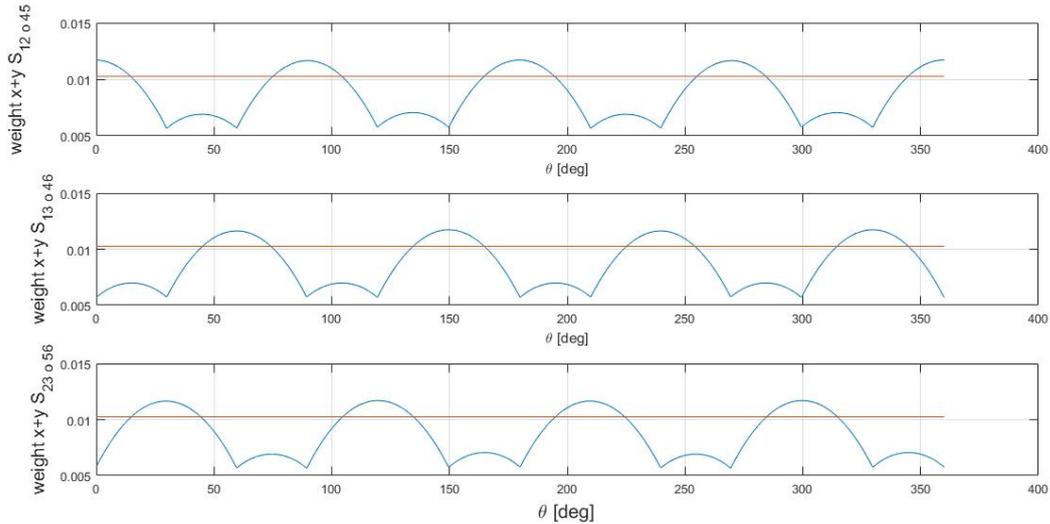


Figura 28. Somma dei pesi con un limite in rosso

Nella figura 9 si nota che ci sono due coppie di sensori che riescono sempre a garantire un certo livello (indicato in rosso in figura) di peso. La stima della posizione x e y può essere quindi sempre effettuata utilizzando due coppie di sensori a seconda dell'angolo in cui il rotore si trova. A questo fine si può dividere l'angolo giro in 3 macro settori che identificano l'utilizzo di alcune determinate coppie. Per esempio nel settore che comprende l'angolo tra 335° e 15° possono essere prese tutte o soltanto una delle coppie 12, 45, 15, 42 per effettuare la stima finale.

6.1.3 Analisi con la Jacobiana

La soluzione precedente non permette di ottenere una verosimiglianza accettabile per l'applicazione di interesse. Le stime di x e y sono il risultato di un sistema lineare di due equazioni in due incognite dove

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = A_{S_i - S_j}^{-1} \begin{bmatrix} B_i - a_1 \cos(\hat{\vartheta} - \vartheta_{S_i}) & B_j - a_1 \cos(\hat{\vartheta} - \vartheta_{S_j}) \end{bmatrix} \quad (61)$$

Di conseguenza per valutare la stima effettuata è necessario studiare una sensibilità che prenda in considerazione l'interlacciamento tra le due stime. La soluzione è quella di valutare la matrice jacobiana che contiene le derivate parziali dei due sensori rispetto ai due spostamenti in x e in y.

$$\vartheta'_i = \hat{\vartheta}_i - \vartheta_{S_i} \quad (62)$$

$$\vartheta'_j = \hat{\vartheta}_j - \vartheta_{Sj} \quad (63)$$

$$\frac{\delta B_i}{\delta x} = a_2(x \cos \vartheta_{Si}) \cos(\vartheta'_i) - a_3(-x \sin \vartheta_{Si}) \sin(\vartheta'_i) \quad (64)$$

$$\frac{\delta B_i}{\delta y} = a_2(y \sin \vartheta_{Si}) \cos(\vartheta'_i) - a_3(y \cos \vartheta_{Si}) \sin(\vartheta'_i) \quad (65)$$

$$\frac{\delta B_j}{\delta x} = a_2(x \cos \vartheta_{Sj}) \cos(\vartheta'_j) - a_3(-x \sin \vartheta_{Sj}) \sin(\vartheta'_j) \quad (66)$$

$$\frac{\delta B_j}{\delta y} = a_2(y \sin \vartheta_{Sj}) \cos(\vartheta'_j) - a_3(y \cos \vartheta_{Sj}) \sin(\vartheta'_j) \quad (67)$$

Considerate le 4 equazioni la matrice Jacobiana J è la seguente:

$$J_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\delta B_i}{\delta x} & \frac{\delta B_i}{\delta y} \\ \frac{\delta B_j}{\delta x} & \frac{\delta B_j}{\delta y} \end{pmatrix} \quad (68)$$

Questa matrice contiene le informazioni sulla risposta delle misure dei due sensori a valle di una variazione degli spostamenti. Il problema dell'analisi è però l'opposto, cioè cercare la risposta di stima a valle di una piccola perturbazione dei valori dei sensori. Per questo motivo viene scelta l'inversa della matrice jacobiana.

$$J_{i,j}^{-1} \quad (69)$$

Di questa matrice interessa il massimo valore assoluto degli auto valori che corrisponde a una sensibilità della stima combinata di x e y. Quando il valore è elevato significa che una piccola variazione di uno dei sue sensori si ripercuote sulla stima di entrambe le misure anche se l'altro sensore non è affetto a perturbazioni. Di conseguenza il peso della stima della coppia di sensori i, j è:

$$Weight_{i,j} = \frac{1}{\|J_{i,j}^{-1}\|} \quad (70)$$

Il calcolo del peso è stato fatto per tutte le combinazioni di sensori in modo tale da sfruttare al meglio la ridondanza data dai 12 sensori.

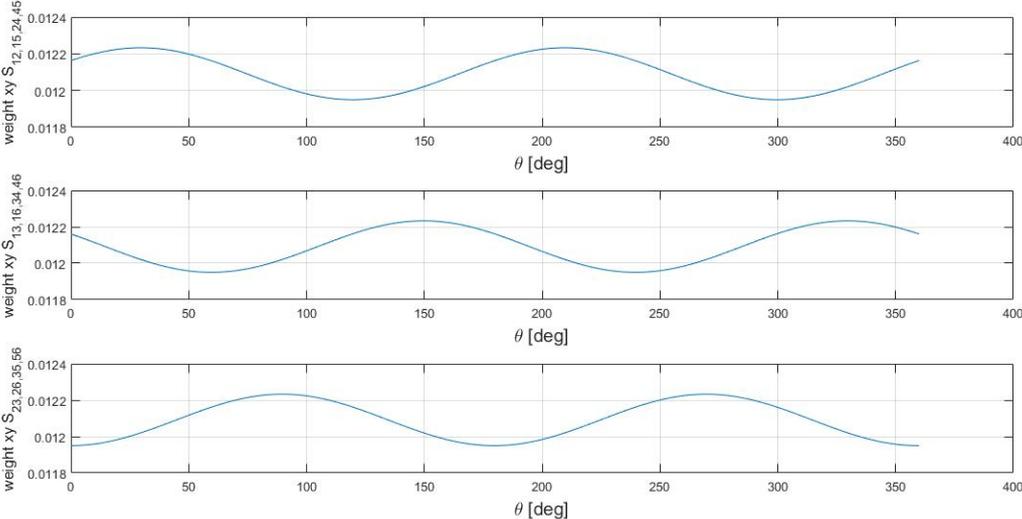


Figura 29 Andamento dei pesi delle stime di posizione

Dall’analisi fatta sull’andamento del peso rispetto all’angolo di rotore, risulta che ci sono 3 tipi di forme d’onda alle quali appartengono gruppi di coppie di sensori. Da queste informazioni è possibile scegliere quali coppie utilizzare per avere una stima di misure meno soggette a perturbazioni.

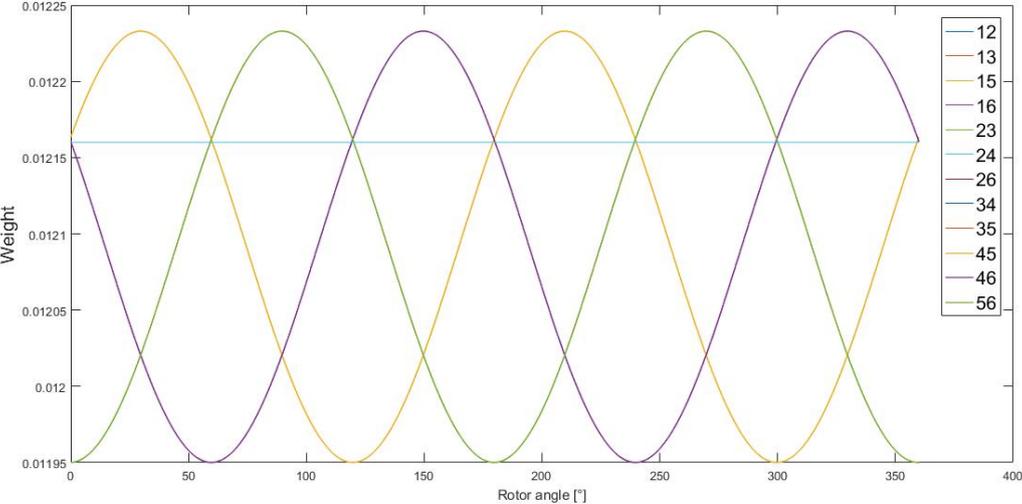


Figura 30. Pesi delle 12 coppie realizzabili con ipotesi peso limite per la selezione

Dalla figura si può notare che sono presenti sempre 4 coppie, che derivano dalla combinazione di 4 sensori, con le quali si può garantire un livello di peso. Inoltre, si può suddividere l'angolo giro in 3 macro settori i quali sono caratterizzati dalla possibilità di utilizzare 4 specifici sensori su 6. Due sensori sono sempre scartati per garantire una minore sensibilità alle perturbazioni. Da queste informazioni è possibile scegliere quante coppie utilizzare per effettuare la stima.

Per massimizzare l'utilizzo dei risultati ottenuti si può pensare di fare una media aritmetica dalle stime che provengono dai 4 sensori del settore in cui si trova l'angolo di rotore. Oppure, come vedremo in seguito, la stima può essere fatta dalla media delle stime di due coppie contenenti sensori differenti tra loro. Un'ulteriore possibilità è quella di calcolare sempre tre stime con tre coppie di sensori fisse ed eliminare la coppia che in quel momento ha il peso più basso.

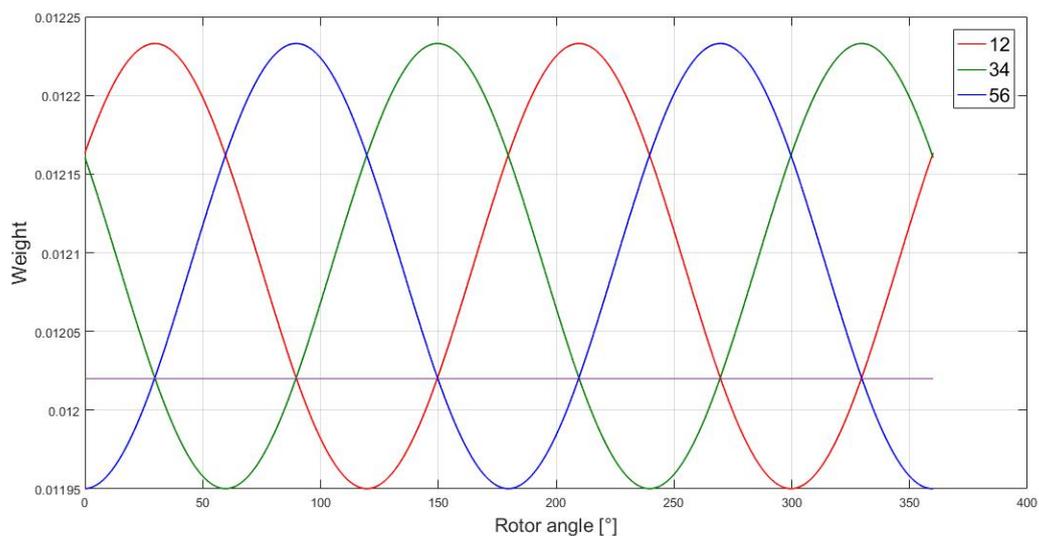


Figura 31. Pesì riferiti alle coppie utilizzate nell'algoritmo del capitolo 3

In figura è stato tracciata una linea che rappresenta il limite oltre il quale la stima risultante di una delle tre coppie utilizzate viene scartata.

6.2 Confronto fra 4 possibili varianti

Viste le innumerevoli possibilità di realizzare diversi algoritmi che tengano conto dell'analisi di sensibilità studiata è stato pensato di implementarne alcuni per avere dei dati su cui fare delle valutazioni adeguate. La ricerca è stata fatta su 4 principali algoritmi di stima.

- 1) Il primo sfrutta tutte e 12 le possibili coppie.

- 2) Il secondo utilizza due coppie selezionate dalle 12 disponibili in relazione all'angolo ϑ
- 3) Il terzo solamente 3 coppie con i sensori adiacenti l'uno all'altro che formano una coppia
- 4) L'ultimo utilizza due delle coppie dell'algoritmo 3 mentre scarta la terza in base all'analisi di sensitività studiata nel paragrafo precedente.

Inoltre per ogni algoritmo sono state effettuate diverse prove per valutare il diverso comportamento:

- a) Prove senza correnti
- b) Prove con correnti di bearing ma senza compensazione
- c) Prove con correnti di bearing e compensazione
- d) Prove con correnti di coppia senza compensazione
- e) Prove con correnti di coppia con costante
- f) Prove con correnti di coppia con equazione completa con dipendenza dall'angolo
- g) Prove con correnti di coppia con equazione completa e aggiornamento angolo ϑ

Tutte le prove precedenti sono state ripetute con l'introduzione di un disturbo additivo sui valori delle letture dei sensori. Un disturbo a distribuzione uniforme di ampiezza massima pari al 20% della misura minima presente nella raccolta dati FEM.

L'obiettivo dei confronti è quello di verificare quale sia l'algoritmo che dia i risultati di stime più preciso. Dato che una volta scelta una tipologia di algoritmo sarà necessario implementarlo su un microcontrollore che avrà dei tempi massimi di calcolo, è stata fatta una valutazione del carico computazionale di ciascun algoritmo. Inoltre si vuole osservare come si comportano le stime a valle dell'introduzione di un disturbo.

La scelta finale dell'algoritmo sarà una valutazione complessiva di quanto appena esposto.

6.2.1 Soluzione 1

Dato che la stima della posizione x e y può essere fatta solamente dalle misure di due sensori è stato costruito un algoritmo che sfruttasse tutta la quantità di informazioni disponibili. Dato che i sensori opposti al centro dello statore non possono essere utilizzati per una stima, le coppie possibili sono 12. Le dodici soluzioni, al medesimo problema, sono state mediate e il risultato fornisce la stima della posizione ricercata.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i,j}^{i < j, i,j \in [1,6]} \begin{bmatrix} \hat{x}_{i,j} \\ \hat{y}_{i,j} \end{bmatrix}}{12} \quad (71)$$

6.2.2 Soluzione 2

Il secondo algoritmo simulato si basa sull'analisi di sensitività per la scelta delle due coppie meno sensibili ai disturbi. Dall'analisi di sensitività effettuata utilizzando la matrice jacobiana è risultato che l'angolo giro si può dividere in 3 macro settori che codificano l'utilizzo di due particolari coppie di sensori.

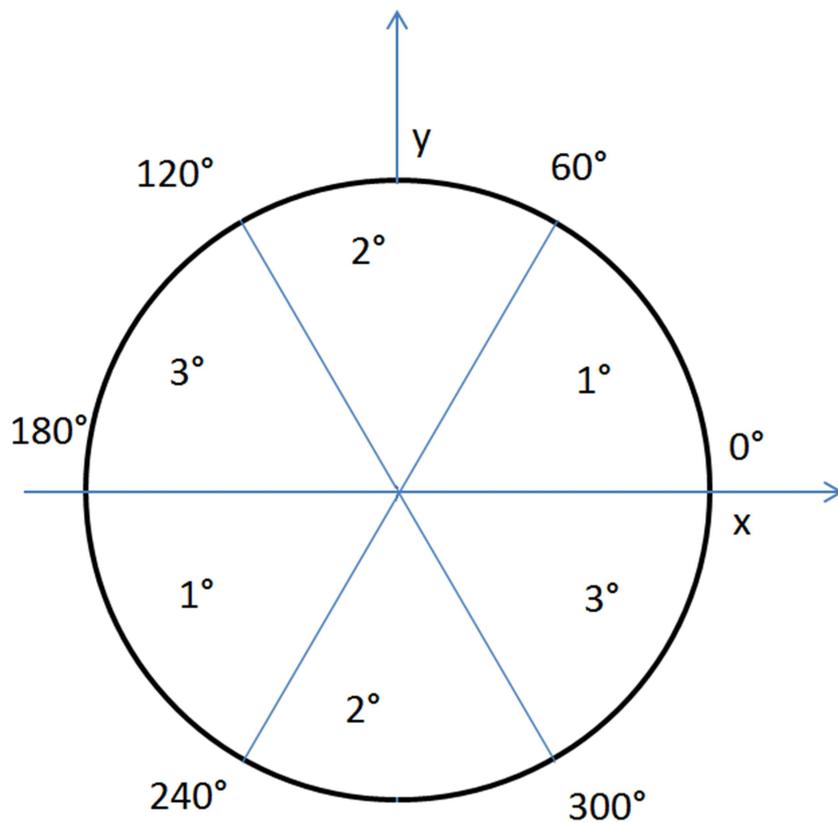


Figura 32. Divisione della cavità statorica in 6 parti secondo le indicazioni dell'analisi di sensitività

Come si vede dalla figura la posizione angolare del rotore causa una scelta opportuna di sensori per la realizzazione della stima di x e y.

Prima di effettuare la stima con due coppie all'interno dell'algoritmo di stima è necessario effettuare una valutazione nel blocco decisionale che decide in quale settore si trova il rotore. Successivamente avviene la stima con le coppie che sono caratteristiche di quel settore.

6.2.3 Soluzione 3

Il metodo del terzo tipo di algoritmo di stima è lo stesso affrontato fino al capitolo 5. Dopo aver fatto un'analisi di sensitività ci si aspetta che i risultati di questo algoritmo siano peggiori rispetto ad altri che sfruttano quell'informazione.

6.2.4 Soluzione 4

L'ultimo metodo che si è deciso analizzare è quello che prevede l'eliminazione del risultato meno "credibile" dal punto di vista dell'analisi di sensitività. Questo algoritmo consiste nell'effettuare la stima con le tre coppie di sensori nella stessa maniera in cui sono utilizzati nel tipo 3 ma invece di effettuare la media tra tutti e 3 le stime la viene fatta tra le due migliori.

6.3 Analisi degli effetti delle correnti di bearing

Ogni algoritmo è stato validato con le correnti di levitazione, con l'aggiunta della compensazione della deviazione. Inoltre sono state prove con l'aggiunta di un disturbo per osservare la differente robustezza della stima.

6.3.1 Senza compensazione

Viene applicata la compensazione secondo l'algoritmo illustrato nel capitolo 5

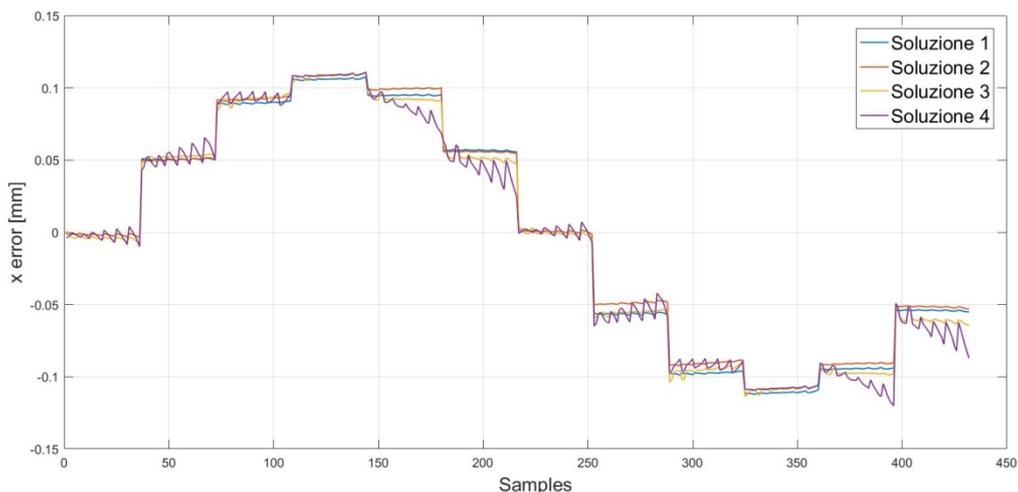


Figura 33. errore della stima di x per le 4 soluzioni, senza applicare compensazione costante della deviazione di corrente di levitazione

I gradini di errore che sono presenti in figura corrispondono all'avanzamento dell'angolo di rotore di 30° .

Come di può vedere in figura il macro andamento delle 3 stime è simile ma si nota che la soluzione 4 ha una forte variazione per ogni misura mentre le altre hanno un errore dipendente dall'angolo.

6.3.2 Con compensazione costante

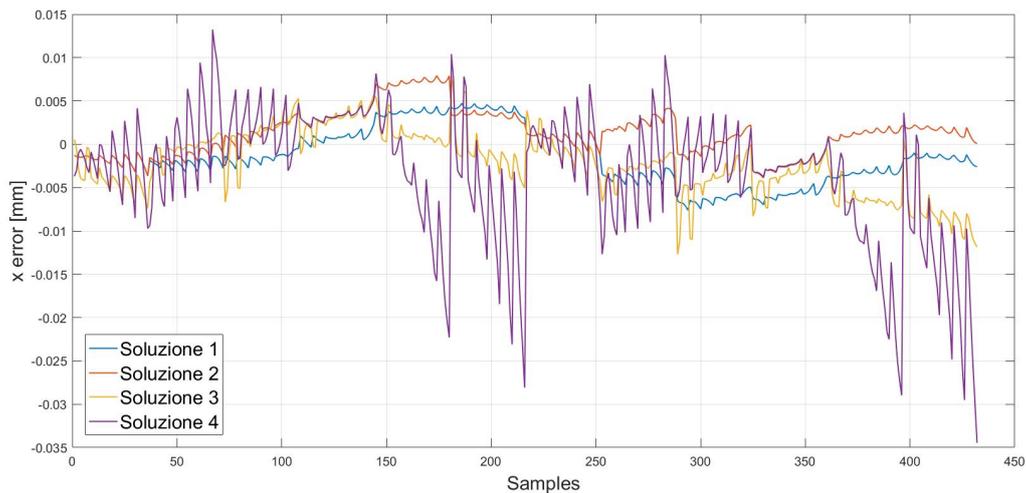


Figura 34. errore della stima di x dopo avere applicato una compensazione di corrente di levitazione

Si osserva il netto miglioramento rispetto alla non applicazione della compensazione per tutti le soluzioni. La soluzione 4 continua ad avere degli errori molto più elevati rispetto agli altri algoritmi. Le 4 figure seguenti indicano la distribuzione degli errori per le soluzioni .

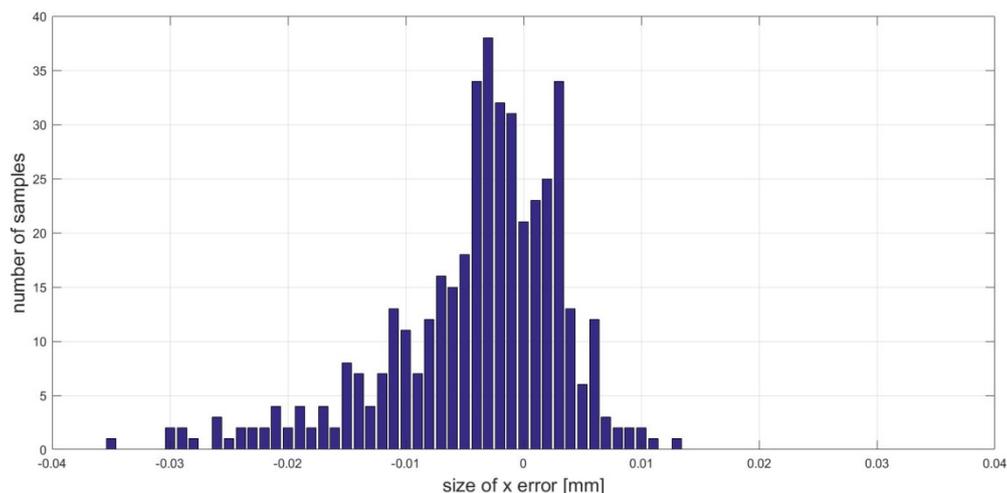


Figura 35. istogramma della soluzione 4 dopo l'aggiunta di compensazione costante

Dalla figura si apprezza che la media dell'errore, per la soluzione considerata meno precisa, sia prossima allo zero ma l'errore massimo di stima dell'errore è comunque più elevato

rispetto alle altre soluzioni. Inoltre la varianza (σ) più elevata si traduce in una dilatazione dell'istogramma.

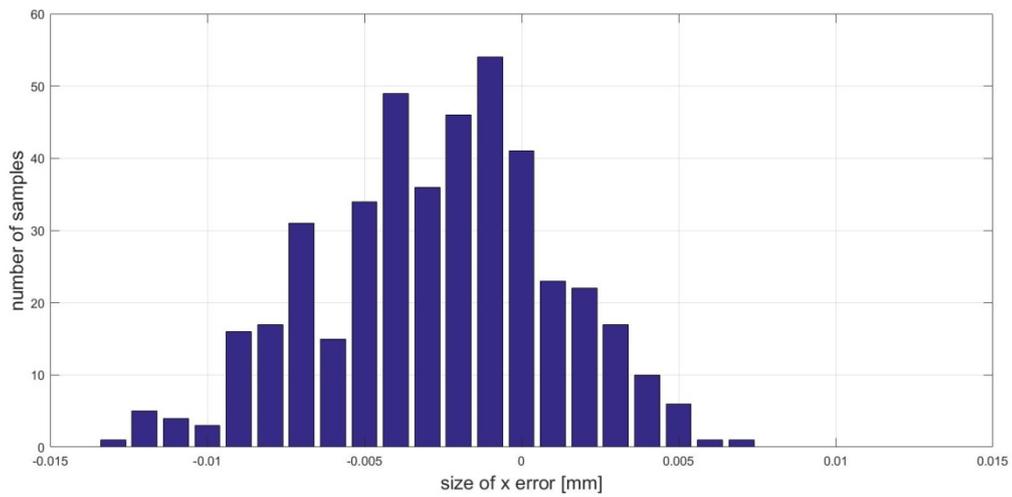


Figura 36. stima di posizione x per la soluzione 3 dopo aver applicato la compensazione costante

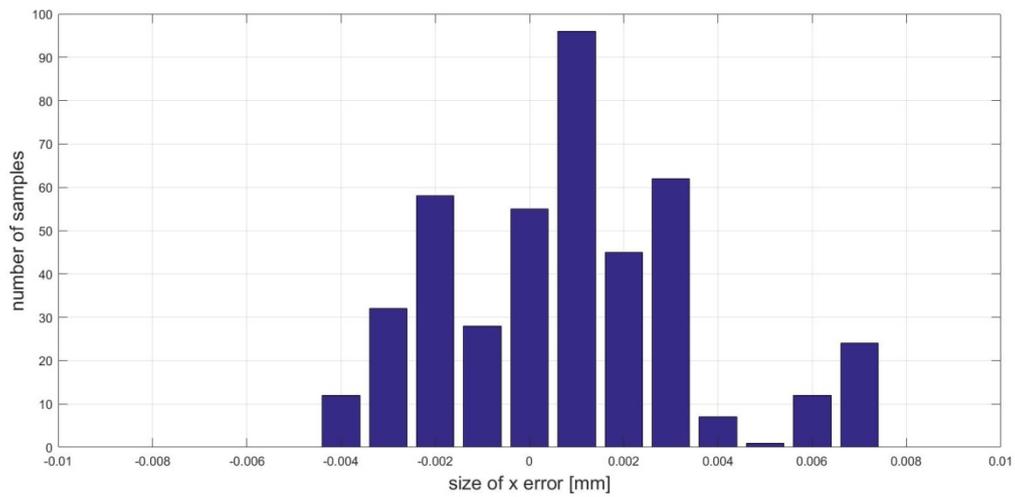


Figura 37. errore della stima di x per la soluzione 2 dopo aver applicato la compensazione

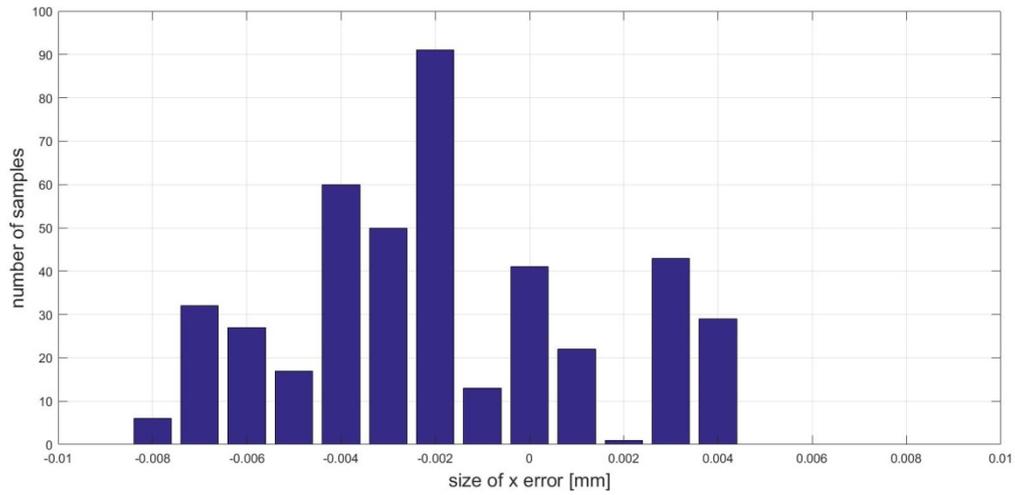


Figura 38. stima della posizione x per la soluzione 1 dopo aver applicato la compensazione costante

I seguenti istogrammi sono inerenti alle prove di stima con le misure dei sensori disturbate

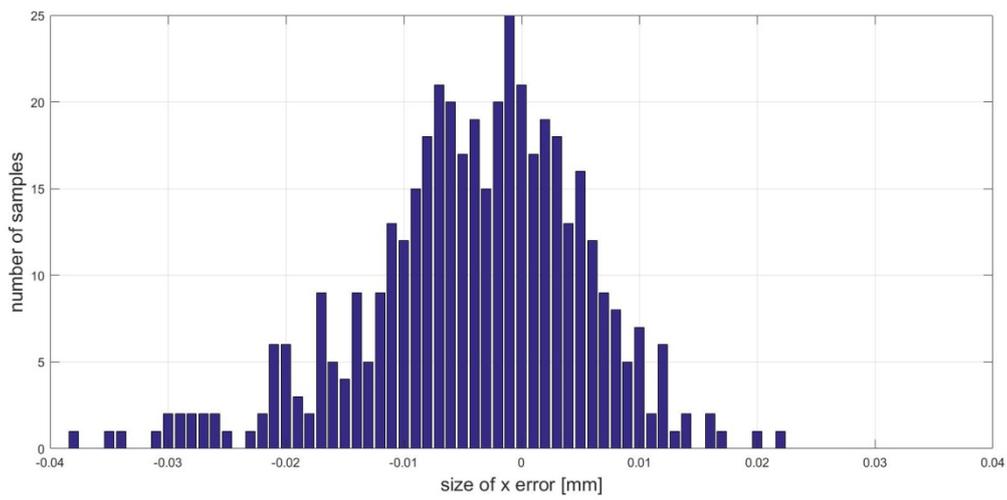


Figura 39. stima della posizione di x con le misure disturbate, soluzione 4

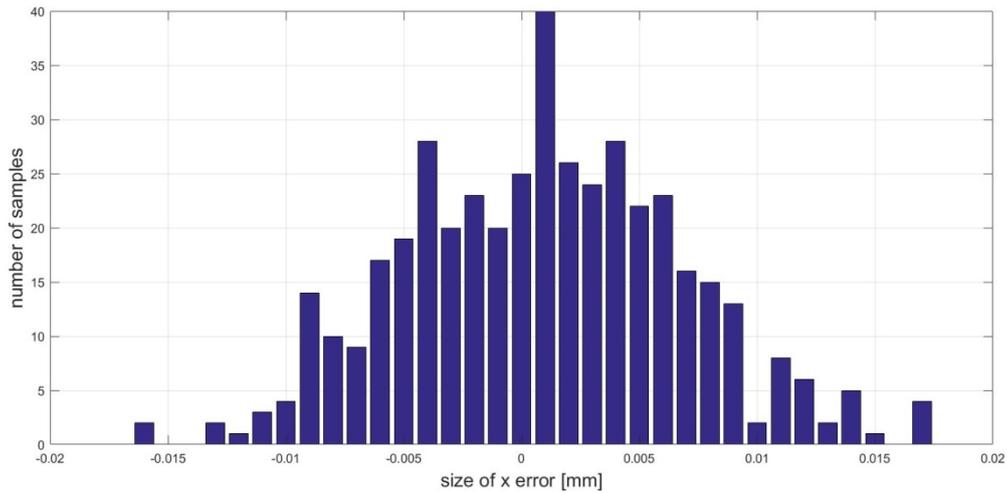


Figura 40. stima della posizione x con misure dei sensori disturbate. soluzione 2

Le soluzioni 2 e 4 sono state volute mettere a confronto con le figure 20 e 21 per illustrare che la presenza di un disturbo di misura causa un peggioramento di entrambe le stime. Tuttavia, mentre la stima della soluzione 4 ha un errore massimo che supera 0,03 mm, la soluzione 2 riesce a mantenere un errore massimo che è circa la metà.

6.4 Analisi degli effetti delle correnti di coppia

6.4.1 Senza compensazione

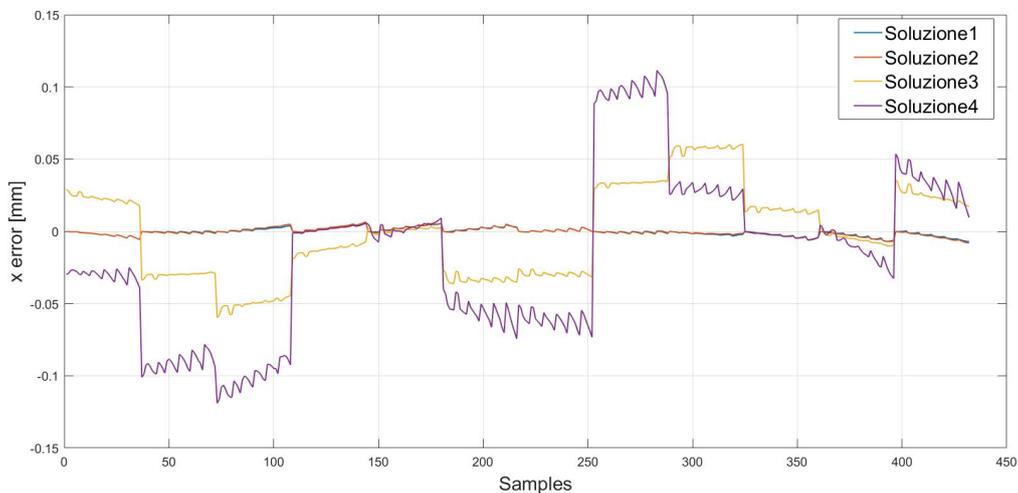


Figura 41. stime disturbate dall'introduzione di correnti di coppia.

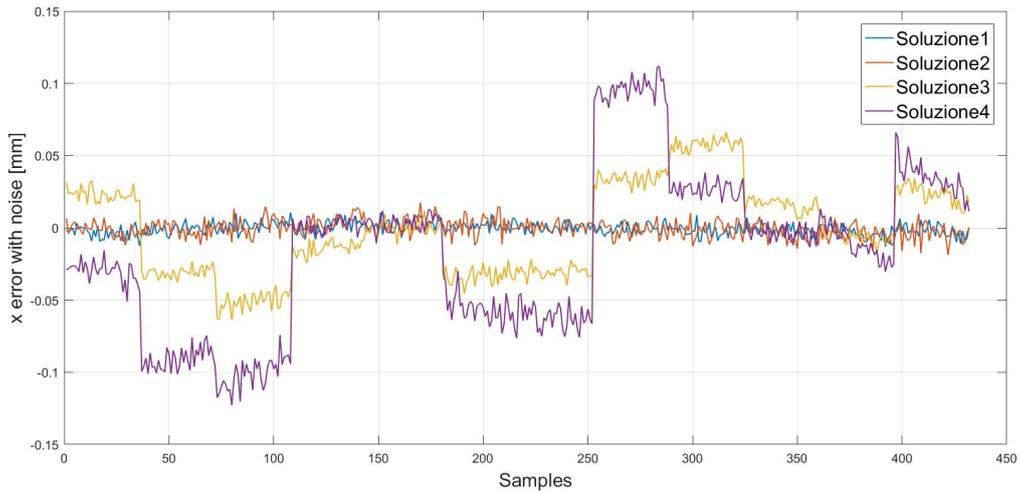


Figura 42. Stime di x senza compensare la deviazione di misura dovuta alla corrente di coppia e di un disturbo

Dalla figura 22 e 23 si nota come due delle soluzioni abbiano errori sempre bassi anche senza applicare una compensazione della deviazione di misura introdotta dalle correnti di rotazione. È un risultato importante perché grazie a una scelta opportuna di coppie si riesce a ridurre drasticamente l'errore di misura che altrimenti ci sarebbe.

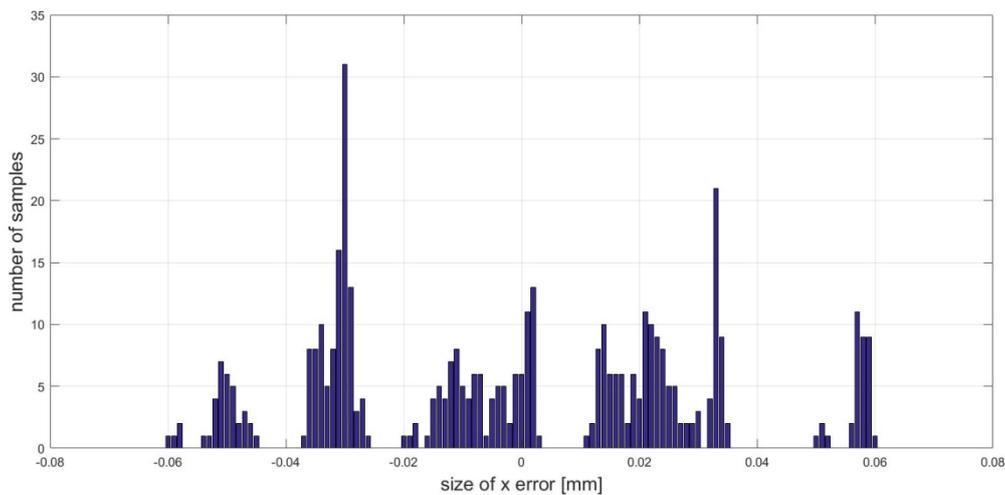


Figura 43. errore di misura di x per la soluzione 4 senza la compensazione della deviazione di corrente di coppia

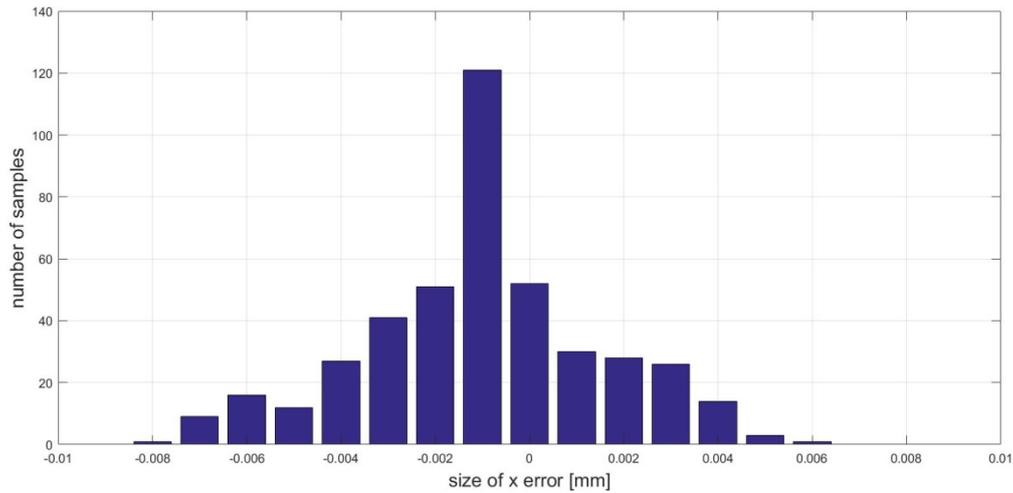


Figura 44. stima di posizione x per la soluzione 2 senza la compensazione di corrente di coppia

Anche dai grafici sulla distribuzione dell'errore si vede chiaramente che l'errore della soluzione 2 sia centrato circa in 0 mentre la soluzione 4 presenti una distribuzione più ampia.

6.4.2 Con compensazione costante

È stata introdotta la compensazione costante della deviazione dell'errore

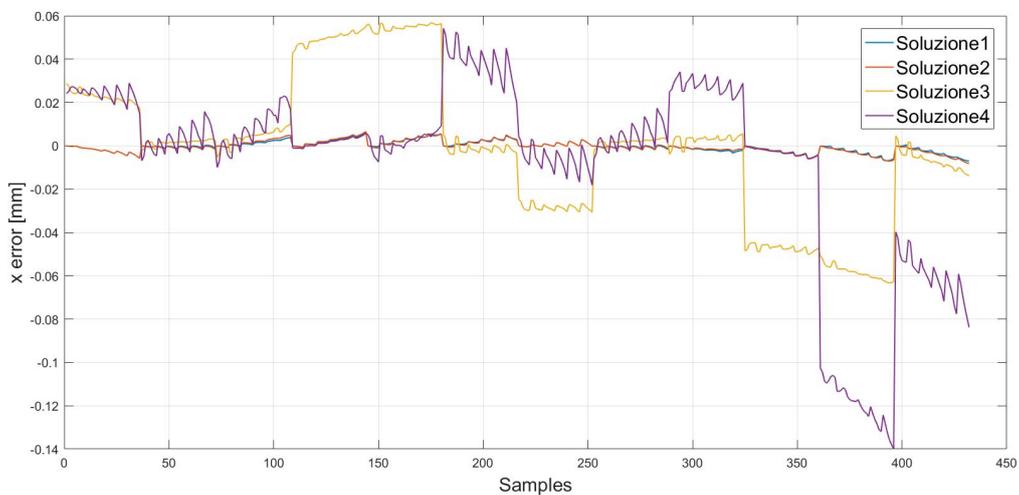


Figura 45. errore di stima di x con compensazione costante

Il contributo costante non compensa completamente l'errore di misura

6.4.3 Con compensazione costante e parte con contributo di angolo

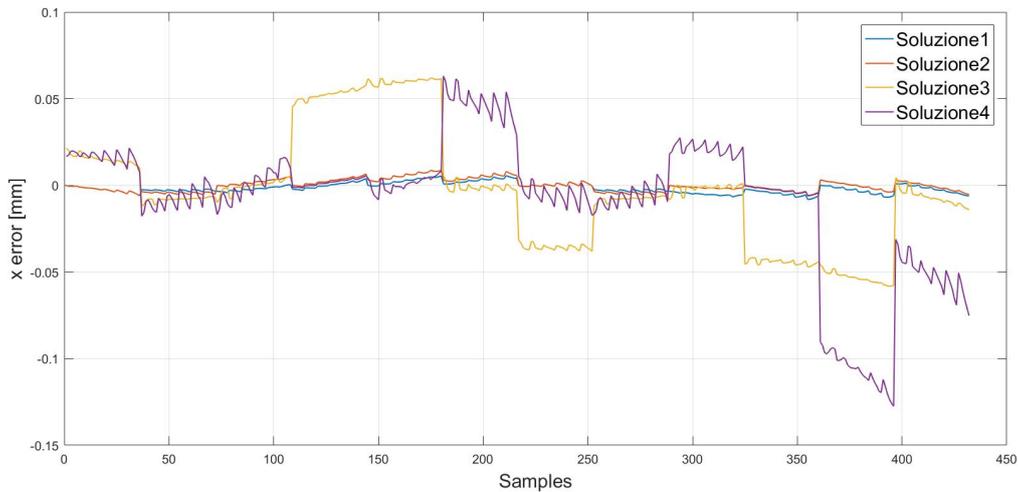


Figura 46. Errore della stima di x risultante dall'utilizzo di una compensazione costante e con termine dipendente dall'angolo di rotore

I miglioramenti rispetto all'utilizzo della sola componente costante non sono significativi e quindi è necessario aggiornare l'angolo con le misure compensate e ricalcolare la compensazione.

6.4.4 Con compensazione iterativa

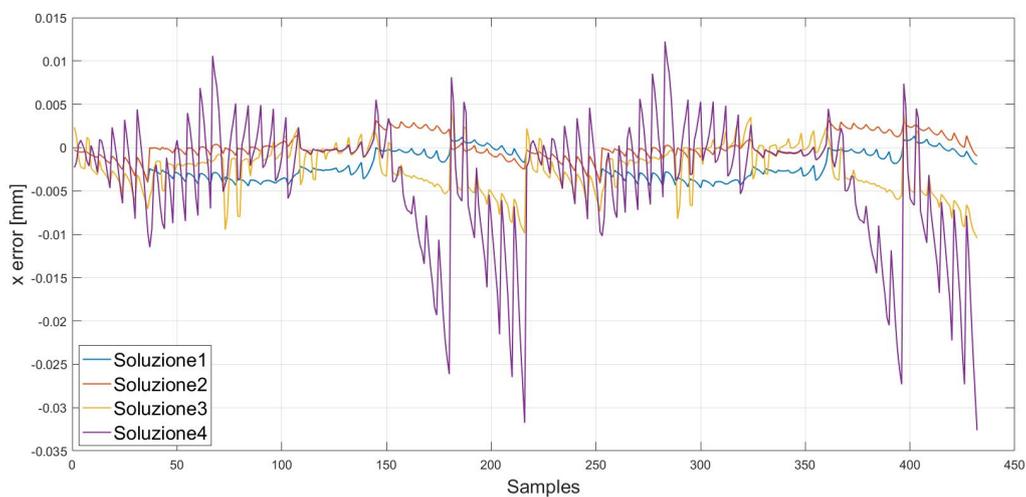


Figura 47. errore di posizione x con metodo iterativo

L'aggiornamento dell'angolo ha permesso di calcolare meglio le stime per gli algoritmi.

6.5 Criteri di valutazione e scelta della variante migliore

Dai risultati ottenuti è stato confermato che sia necessario compensare le deviazioni delle correnti di bearing con una componente costante che dipende dal sensore, o meglio, dal

vettore corrente rispetto al sensore. Dopo le prove fatte con le correnti di coppia si è valutato di scegliere l'algoritmo che sfrutta due coppie selezionate secondo la sensitività. In questo modo non è necessario compensare le correnti per avere degli errori accettabili e quindi significa avere minor carico computazionale. L'algoritmo più preciso in termini di varianza dell'errore, errore medio e massimo è quello che prevede un aggiornamento dell'angolo. Tuttavia per avere un miglioramento da una varianza di 0,000007 a una di 0,000002 (dati della Soluzione 2 con correnti di coppia) è necessario moltiplicare il numero delle operazioni di compensazione e stima di angolo pari al numero di iterazioni che si intende eseguire. Si è deciso quindi di utilizzare la soluzione 2 con compensazione costante delle correnti di bearing e senza compensazione delle correnti di coppia.

7 Verifiche simulative dell’algoritmo di stima selezionato

L’algoritmo scelto è stato tradotto in un modello Simulink contenente il modello del motore. È stato effettuato anche un controllo di rotazione e di levitazione per poter avere delle dinamiche e dei disturbi di corrente realistici ma non saranno argomento di questa tesi.

È stata introdotto un blocco per la generazione di misure dei sensori che sfrutta l’equazione trovata dal metodo dei minimi quadrati con 30 parametri perché, da quello che si è evidenziato nel capitolo 2, approssima molto bene l’andamento delle misure sui sensori.

Inizialmente le variabili del modello del sistema Simulink sono state tenute in formato double e in elaborazione a tempo continuo. Sono state effettate diverse prove per simulare l’accensione del motore elettrico impostando una rampa di velocità che termina a “5000” rpm facendo partire il rotore in una posizione casuale all’interno della cavità statorica. L’algoritmo utilizzato è la “soluzione 2” con la compensazione costante di correnti di levitazione ma senza la compensazione dei contributi di corrente di coppia. I primi risultati simulativi hanno rivelato che le correnti che si generano per la levitazioni sono molto inferiori alla corrente massima che era stata messa nell’analisi ad elementi finiti. Di conseguenza a ciò è stato provata una simulazione dopo aver tolto la compensazione delle deviazioni di corrente. Il comportamento del motore rimane praticamente invariato in quanto le correnti rimangono basse nel transitorio iniziale e quindi non generano un campo magnetico abbastanza grande da interferire con la stima delle misure di posizione.

7.1 Trasformazione in formato fixed point a 16 bit

La rappresentazione numerica a virgola fissa è un metodo per interpretare dei numeri con un numero fisso di bit in modo tale che la scelta della posizione della virgola sia fissa in una posizione data. Il formato 16 bit prevede la rappresentazione di un numero in formato binario utilizzando 16 unità. La posizione della virgola divide in due il numero binario rispettivamente in parte intera a sinistra di essa e parte decimale a destra. La scelta della posizione della virgola è di fondamentale perché corrisponde alla precisione della rappresentazione del numero. Se ci sono molti bit considerati decimali il numero avrà una precisione decimale più alta ma se non vengono lasciati abbastanza bit per la rappresentazione intera del numero si può rischiare di mandare in overflow la rappresentazione che comporta la

totale perdita di informazione. Questa rappresentazione serve al microcontrollore per interpretare e gestire i numeri e le operazioni tra di essi.

Es. 58,57 → 111010,1000111010

che nel formato da indicare in Simulink è fixed(0,16,10) con precisione di $2^{-10} = 0,00097656$ e numero massimo rappresentabile dalla parte intera $2^6 - 1 = 63$

Se si vuole rappresentare il numero con il segno, i bit disponibili alla rappresentazione del numero non sono più 16 ma 15 perché un bit deve contenere l'informazione sul segno.

7.1.1 Procedura di trasformazione in fixed point a 16 bit

Matlab fornisce un fixed point toolbox che realizza la trasformazione fixed. Questo toolbox non è stata utilizzato perché bisognerebbe simulare tutte le possibili situazioni e non garantisce che, una volta effettuata la trasformazione, non ci siano combinazioni di valori che facciano andare fuori range le rappresentazioni. Ogni rappresentazione delle variabili di ingresso a un modello fixed point a 16 bit deve essere costruita conoscendo i valori minimi e massimi che la variabile può assumere. In Simulink è possibile indicare gli estremi del range di valori e il formato (nel nostro caso 16bit unsigned oppure 16bit signed) di ogni variabile o risultato di un'operazione. Dai valori di ingresso sono stati espansi i range per ogni operazione e quindi scelta l'opportuna rappresentazione. Una volta generato il codice, specificando il tipo di microcontrollore, si è constatato che il coder di matlab non usa librerie ma si basa solamente sull'Instruction-Set del microcontrollore selezionato.

L'arcotangente presente per il calcolo della stima dell'angolo è stato costruito utilizzando il metodo CORDIC utilizzando 11 iterazioni. Successivamente è stato trovato un metodo alternativo per evitare di effettuare l'arcotangente.

Evitando di effettuare questo metodo si è notato che la generazione di codice creava il 40% di righe in meno. Il risultato non cambia a livello di stima mentre fornisce un notevole vantaggio a livello computazionale: lo stesso risultato a valle di una esecuzione di codice nettamente inferiore.

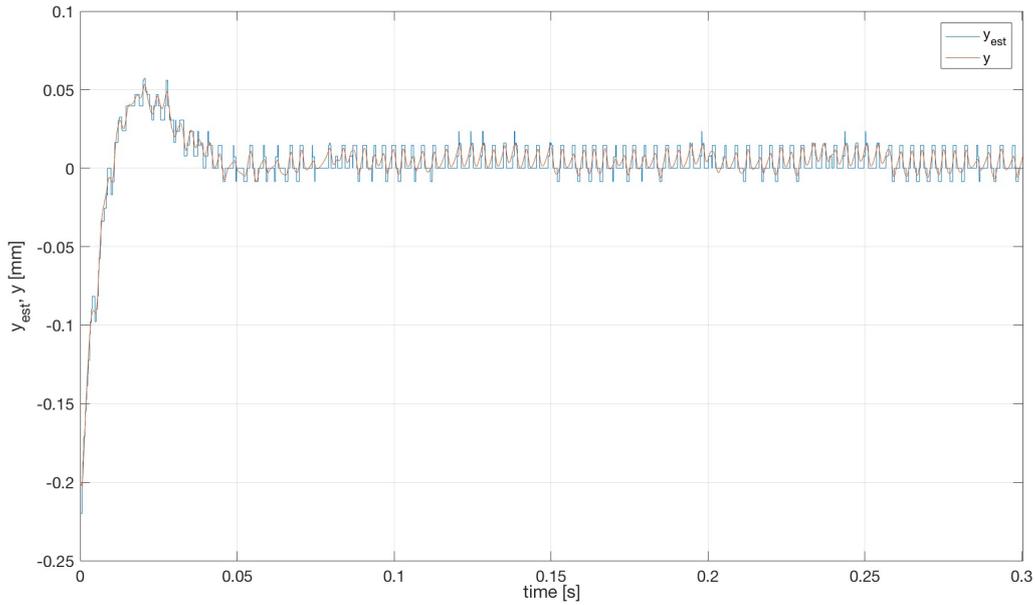


Figura 48. andamento della y effettiva e di quella stimata dall' algoritmo

Facendo partire da una posizione qualsiasi la x (nel range di ammissibilità), si osserva che dopo un piccolo transitorio il motore va in levitazione nella posizione centrale. La stima è corretta con una precisione con la granularità della rappresentazione a virgola fissa a 16 bit.

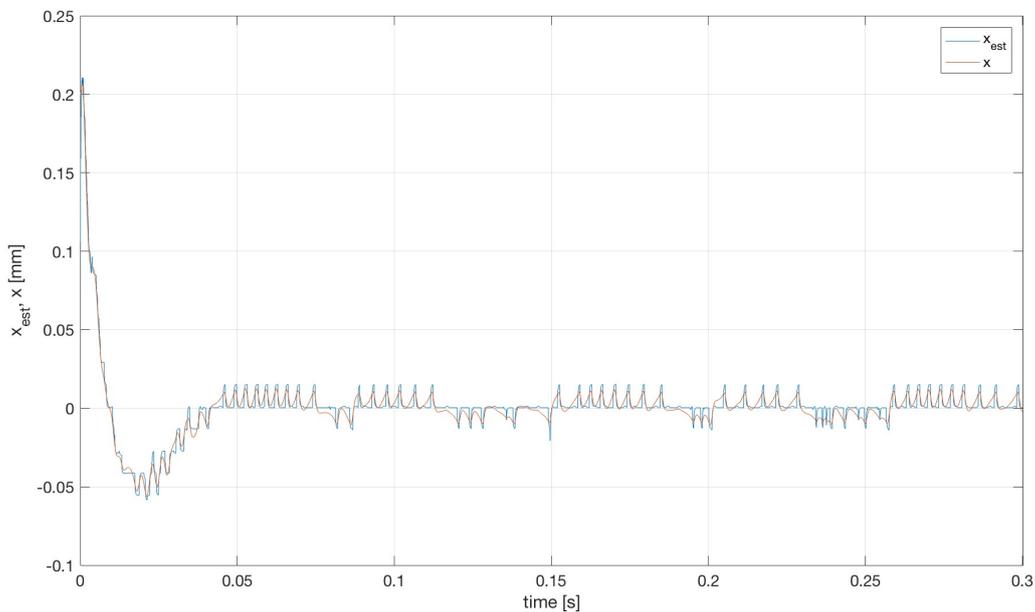


Figura 49. transitorio della posizione x vera e stimata

Come si può vedere nella figura 34 la posizione stimata oscilla intorno allo 0 per causa della rappresentazione a 16 bit che comporta dei gradini di valori stimati.

8 Verifiche sperimentali con l'algoritmo di stima selezionato

Confrontando il modello della simulazione FEM del motore con il prototipo fornito è risultato che i sensori sono più distanti dalla cavità statorica. Si è verificato ciò confrontando le letture massime dei sensori che arrivano fino a 0.13 invece di 0.18. Sono stati scalati i 3 parametri caratteristici in modo tale da simulare delle misure realistiche dei sensori. Quindi, è stata necessaria una nuova scalatura dei formati fixed point a 16 bit in quanto i range ammissibili sono cambiati. Dopo avere generato il codice per la stima della posizione e dell'angolo del rotore è stato aggiunto il codice alla soluzione creata da MediCon. Per le prime prove non si è azionato il sistema di controllo di levitazione così da verificare visivamente la correttezza della stima. È stato incluso il file generato, tramite il coder di matlab, parallelamente al sistema di stima di MediCon. Sono state effettuate le prove utilizzando MpLab. Dalle misure effettuate è risultato che la stima di angolo era corretta mentre la stima della posizione era sbagliata.

Il passo successivo è stato quello di effettuare delle misurazioni dei sensori tramite la lettura effettiva dei sensori sul prototipo. Per fare ciò è stato spostato tutto il setup sotto una macchina utensile per il posizionamento del rotore all'interno della cavità statorica. È stato costruito un oggetto di plastica per agganciare il rotore magnetico all'utensile. Il primo problema è stato identificare lo "zero" del sistema di riferimento. Per fare ciò è stato utilizzato un metodo empirico che consiste nella ricerca del centro in base alle distanze attuali dai bordi. Una volta settato il centro del sistema di riferimento sono state fatte alcune prove per ricavare le misure sui 6 sensori. Le prime prove sono state poche perché per ogni posizione è stato necessario spostare il magnete e stimare. Dopo avere raccolto 34 letture corrispondenti ad altrettante posizioni è stato necessario utilizzare nuovamente il metodo dei minimi quadrati con le nuove misure.

Sono state fatte le prove con 30 parametri e scoperto che ve ne erano alcuni prevalenti che dipendevano da termini di secondo grado. Inoltre è stata fatta una prova con l'utilizzo dell'equazione con 3 parametri utilizzata per le prove di simulazione. Entrambe le equazioni sono state validate per osservare la precisione della stima del valore di B generato.

Inoltre è stata fatta una nuova analisi di sensitività utilizzando la nuova equazione a 3 parametri e il risultato è che è necessaria una divisione in settori della cavità statorica per la

scelta di coppie per la stima. La differenza è che i settori risultanti sono traslati di 90° rispetto ai settori illustrati dal capitolo 6.

Dato che l'algoritmo di stima illustrato al capitolo 3 prevedeva tre parametri e dipendenti da termini di primo grado, è stato utilizzato per verificare le stime di x , y e ϑ con i tre nuovi parametri.

Per simulare la stima dell'algoritmo è stato utilizzato lo schema Simulink in formato fixed point 16 bit in modo tale da validare i risultati e poter così facilmente usare il coder di matlab per tradurre velocemente in codice da caricare nel microcontrollore.

9 Conclusioni

Il primo approccio alla soluzione è stato quello di servirsi di uno studio a elementi finiti per ricavare dati da analizzare pur non avendo a disposizione il prototipo del motore elettrico. I dati ricevuti sono serviti per ricavare un modello approssimato del sistema fisico. Per rendere il sistema di misurazione più robusto ai disturbi è stata fatta una analisi di sensitività sui sensori. Sono stati studiati successivamente scelto un algoritmo di stima delle 3 misure richieste. È stato simulato il sistema motore con un controllo di levitazione, rotazione e il sistema di misura inizialmente in ambiente continuo e successivamente con sempre più non idealità introdotte dal ADC e dalla rappresentazione a virgola fissa a 16 bit. Una volta ottenuto il prototipo è stato validato l'algoritmo di stima. È stato utilizzato una macchina utensile per posizionare il magnete in alcune posizioni per raccogliere nuovi dati per ricavare una nuova equazione caratteristica. Per validare al meglio la nuova equazione di mappatura dei sensori è necessario rilevare molte più misure sui sensori. Inoltre è necessario misurare un offset, presente sui sensori in assenza del magnete nella cavità statorica, che varia nel tempo. In accordo con MediCon si è passati a un microcontrollore con parallelismo 32 bit per aumentare la precisione dei calcoli. Il passo successivo alla validazione dei parametri è quella di implementare nel microcontrollore il controllo di levitazione e mettere il levitazione magnetica il controllore.

10 Bibliografia

1. Nussbaumer. (22-23 Ottobre 2007). Comparison of Winding Concept for Bearingless Pumps. *International Conference of Power Electronics*, (p. 8).
2. TORU MASUZAWA, H. O.-J. (2002). Magnetically Suspended Centrifugal Blood Pump with a Self Bearing Motor. *ASAIO Journal*.
3. Xiaodong Sun, M. I. (12, DECEMBER 2013). Overview of Bearingless Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*.
4. Yohji Okada, S. M. (1996). levitation and Torque Control of Internal Permanent Magnet Typer Bearingless Motor. *IEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*.
5. Zhu, H. (2010). Mathematical Method and control Tecnology of Bearingless PMSM., (p. 5).

11 Indice Figure

Figura 1. Schema costruttivo statore motore bearingless [3].....	8
Figura 2 Confronto tra valore stimato con 4 parametri e valore reale	14
Figura 3 Confronto tra valore stimato con 30 parametri e valore reale	15
Figura 4. Schema dei due sistema di riferimento (globale e di sensore)	18
Figura 5. Sistema trifase per il calcolo dell'angolo di cotore.....	20
Figura 6. errore di stima della posizione x	22
Figura 7. errore di stima della posizione y	23
Figura 8. errore di stima dell'angolo di rotazione del rotore	24
Figura 9. errore di stima di x con presenza di correnti di coppia	25
Figura 10. errore di stima di y in presenza di corrente di coppia.....	26
Figura 11. errore di stima di angolo in presenza di correnti di coppia	27
Figura 12. errore di stima di x in presenza di corrente di bearing	27
Figura 13. errore di stima di y in presenza di corrente di bearing	28
Figura 14. errore di stima dell'angolo di rotore in presenza di corrente di bearing	29
Figura 15. errore di stima di x con compensazione della deviazione di corrente di bearing.....	35
Figura 16. errore di stima di y con compensazione della deviazione di corrente di bearing	36
Figura 17. errore di stima di x con compensazione costante della deviazione di corrente di coppia ...	38
Figura 18. errore di stima di y con compensazione costante della deviazione di corrente di coppia ...	38
Figura 19. errore nella stima di x confronto tra compensazione costante e compensazione con termini dipendenti dall'angolo di rotazione.....	39

Figura 20. errore nella stima di y confronto tra compensazione costante e compensazione con termini dipendenti dall'angolo di rotazione.....	40
Figura 21. errore di stima dell'angolo di rotore con misure di sensore compensate dalla deviazione di corrente di coppia e senza aggiornamento.....	41
Figura 22. stima di posizione x per il metodo con iterazione della compensazione di correnti di coppia	41
Figura 23. errore di stima di y per il metodo con iterazione della compensazione di correnti di coppia	42
Figura 24. Differenti intervalli che corrispondono alla stessa variazione di x.....	43
Figura 25. Pesi delle sensitività di x dei sei sensori	45
Figura 26. Pesi delle sensitività in y dei 6 sensori.....	46
Figura 27. Pesi delle combinazioni di coppie per x e per y	47
Figura 28. Somma dei pesi con un limite in rosso	48
Figura 29. Andamento dei pesi delle stime di posizione.....	50
Figura 30. Pesi delle 12 coppie realizzabili con ipotesi peso limite per la selezione.....	50
Figura 31. Pesi riferiti alle coppie utilizzate nell'algorithmo del capitolo 3	51
Figura 32. Divisione della cavità statorica in 6 parti secondo le indicazioni dell'analisi di sensitività ..	53
Figura 33. errore della stima di x per le 4 soluzioni, senza applicare compensazione costante della deviazione di corrente di levitazione	54
Figura 34. errore della stima di x dopo avere applicato una compensazione di corrente di levitazione	55
Figura 35. istogramma della soluzione 4 dopo l'aggiunta di compensazione costante.....	55
Figura 36. stima di posizione x per la soluzione 3 dopo aver applicato la compensazione costante ...	56
Figura 37. errore della stima di x per la soluzione 2 dopo aver applicato la compensazione	56
Figura 38. stima della posizione x per la soluzione 1 dopo aver applicato la compensazione costante	57
Figura 39. stima della posizione di x con le misure disturbate, soluzione 4	57
Figura 40. stima della posizione x con misure dei sensori disturbate. soluzione 2.....	58
Figura 41. stime disturbate dall'introduzione di correnti di coppia.....	58
Figura 42. Stime di x senza compensare la deviazione di misura dovuta alla corrente di coppia e di un disturbo	59
Figura 43. errore di misura di x per la soluzione 4 senza la compensazione della deviazione di corrente di coppia	59
Figura 44. stima di posizione x per la soluzione 2 senza la compensazione di corrente di coppia.....	60
Figura 45. errore di stima di x con compensazione costante.....	60
Figura 46. Errore della stima di x risultante dall'utilizzo di una compensazione costante e con termine dipendente dall'angolo di rotore	61
Figura 47. errore di posizione x con metodo iterativo	61
Figura 48. andamento della y effettiva e di quella stimata dall'algorithmo	65
Figura 49. transitorio della posizione x vera e stimata	65