

CAMPIONAMENTO COMPRESSO DI UN MODELLO TAYLOR-FOURIER PER LA STIMA DEI SINCR OFASORI

G. Frigo⁽¹⁾, C. Narduzzi⁽¹⁾, C. Muscas⁽²⁾, P.A. Pegoraro⁽²⁾

⁽¹⁾Dip. di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova,
Via Gradenigo 6B - 35131 Padova

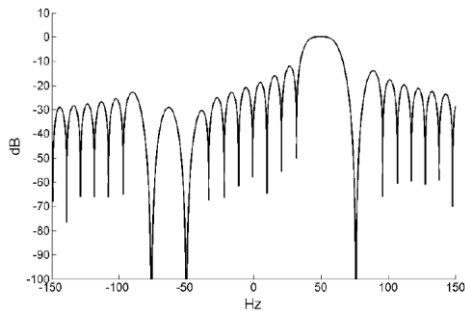
⁽²⁾Dip. di Ingegneria Elettrica ed Elettronica, Università degli Studi di Cagliari,
Piazza d'Armi - 09123 Cagliari
frigogug@dei.unipd.it

1. INTRODUZIONE

L'impiego di *phasor measurement units* (PMUs) va diffondendosi nelle applicazioni di monitoraggio delle reti dei sistemi di potenza. Gli standard di settore definiscono le condizioni di test per verificare la conformità delle PMU, indicando due classi prestazionali a seconda che il dispositivo sia destinato ad applicazioni di protezione (classe P) o di misura (classe M). Molteplici sono gli algoritmi apparsi in letteratura e capaci di soddisfare le specifiche richieste in condizioni stazionarie e non. Tuttavia, la pratica sperimentale ha evidenziato come segnali interarmonici, quasi ignorati dallo standard, possano degradare l'accuratezza delle stime in maniera molto marcata e del tutto imprevedibile. Un innovativo approccio alla stima spettrale dei segnali è stato tratto dalla teoria del campionamento compresso (CS) e successivamente applicato alle misure fasoriali mediante un modello multi-frequenziale basato sulla trasformata di Taylor-Fourier (CSTFM). Si possono così individuare le componenti spettrali attive in una data finestra di osservazione, costruire un corrispondente modello del segnale provvisto di termini derivativi di ordine superiore, e stimare con sufficiente accuratezza il fasore di interesse, senza gravi interferenze da parte di eventuali contributi spuri (armonici o interarmonici). L'algoritmo, dapprima presentato in [1], è stato dettagliatamente caratterizzato dal punto di vista metrologico in [2].

2. METODO PROPOSTO

L'algoritmo CSTFM consta di due passaggi consecutivi. Nel primo, una tecnica di super-risoluzione nel dominio della trasformata discreta di Fourier determina le componenti spettrali significative. In tal senso, la tecnica si ispira alla teoria CS e riesce ad ottenere un ordine di grandezza di incremento della risoluzione pur lavorando su intervalli di osservazione dell'ordine di 3 o 5 cicli della fondamentale. Nel secondo passaggio, le frequenze individuate nel passaggio precedente vanno a definire il modello multi-frequenziale del segnale, ove sono compresi non solo i termini di ordine 0, ma anche le derivate prime e seconde. I termini di ordine superiore consentono, infatti, di ottenere stime accurate anche in presenza di condizioni marcatamente non stazionarie. A titolo di esempio, la Figura 1(a) fornisce una rappresentazione dell'algoritmo come filtro in frequenza, in presenza di una interarmonica a 76 Hz. È interessante osservare come la risposta sia piatta ed unitaria nell'intorno della fondamentale, mentre la reiezione sia massima proprio in corrispondenza della sua immagine e delle interarmoniche.



(a)

Modelled phasors	Avg TVE [%]	Std TVE [%]
f_1	1.315	0.203
f_1 and f_{ih}	0.749	0.221
$f_1, 2f_1$ and f_{ih}	0.272	0.075
$f_1, 2f_1, 3f_1$ and f_{ih}	0.072	0.021

(b)

Figura 1: Esempio di risposta istantanea del filtro CSTFM nel dominio della frequenza, in presenza di una interarmonica a 76 Hz, con secondo ordine di derivazione per ciascuna componente (a); TVE al variare del numero di componenti modellate, in presenza di una interarmonica a 76 Hz e cinque armoniche (b).

Maggiore è il dettaglio del modello multi-frequenziale, maggiore è l'accuratezza delle stime che se ne possono dedurre. A tal proposito, la Figura 1(b) dimostra come, al crescere delle componenti incluse nel modello, decresca l'errore della stima sulla fondamentale, d'ora in poi identificato come TVE.

3. RISULTATI SPERIMENTALI

Lo scopo dell'algoritmo CSTFM è riuscire a fornire prestazioni conformi allo standard di riferimento, anche in condizioni non previste dallo stesso, ma comunque realistiche e suffragate dai risultati della pratica sperimentale. Pertanto, le condizioni di test sono state ulteriormente aggravate, includendo un certo numero di componenti armoniche ed interarmoniche.

Al fine di apprezzare il vantaggio offerto dal modello multi-frequenziale, i risultati ottenuti sono stati confrontati con due approcci analoghi, ispirati ad una decomposizione di Taylor-Fourier del segnale. In particolare, l'approccio TFF considera la sola fondamentale, nominalmente fissata a 50 Hz; mentre, la f-TFF aggiorna, in modo adattativo, la frequenza della fondamentale. Per tutti gli algoritmi l'ordine di derivazione è stato arrestato al secondo, in quanto rappresenta un buon compromesso tra carico computazionale e accuratezza delle stime.

In Figura 2(a) è rappresentato l'andamento del TVE relativo alle tre tecniche in presenza di una rampa lineare della frequenza della fondamentale, da 45 a 55 Hz. Il segnale è ulteriormente distorto da una componente interarmonica a 76 Hz. È interessante osservare come la CSTFM fornisca un TVE sotto la soglia dell'1%, laddove le altre tecniche, che non modellano i contributi spuri, si attestino attorno al 1.5% con picchi superiori al 3.5%. Il dettaglio in scala logaritmica permette di constatare come siano due gli ordini di grandezza di cui è possibile ridurre l'errore.

La Figura 2(b) presenta analoghi risultati in presenza di un gradino in ampiezza (10%) o in fase (10°) della fondamentale. Anche qui, il segnale è ulteriormente distorto dall'interarmonica a 76 Hz. Si può osservare come il tempo di risposta, ossia il tempo per riportare il TVE sotto la soglia dell'1%, valga 32 e 88 ms, rispettivamente, mentre non possa essere definito nel caso della f-TFF perché il TVE non scende mai sotto la soglia, indipendentemente dalla perturbazione introdotta dal gradino.

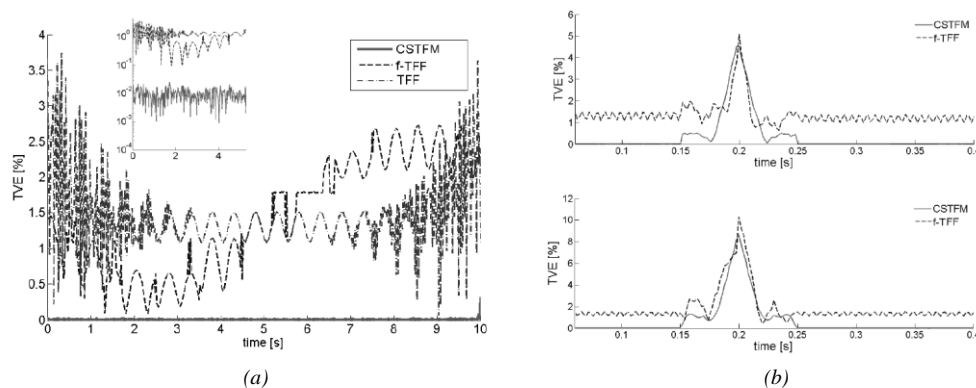


Figura 2: Andamenti del TVE al variare del modello utilizzato per la stima fasoriale, durante un test di rampa lineare della frequenza fondamentale da 45 a 55 Hz (a); analoghi andamenti del TVE durante un test di gradino in ampiezza, sopra, e in fase, sotto (b).

In conclusione, l'approccio CSTFM offre ottime prestazioni in ogni test previsto dallo standard ed è, ad oggi, l'unico algoritmo esplicitamente progettato per operare in presenza di componenti spurie, quali armoniche ed interarmoniche, in totale assenza di informazioni a priori sul supporto del segnale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] M. Bertocco, G. Frigo, C. Narduzzi, C. Muscas, P.A. Pegoraro, "Compressive Sensing plus Taylor-Fourier Transform for Synchrophasor Estimation," in *Proc. of 2014 IEEE AMPS*, September 24-26, 2014, pp. 29-33
- [2] M. Bertocco, G. Frigo, C. Narduzzi, C. Muscas, P.A. Pegoraro, "Compressive Sensing of a Taylor-Fourier Multifrequency Model for Synchrophasor Estimation" in *IEEE Trans. IM*, in press