



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Impatto dei Trasformatori Voltmetrici nella Misura delle Subarmoniche di Rete in Accordo con le Norme Internazionali

*Original*

Impatto dei Trasformatori Voltmetrici nella Misura delle Subarmoniche di Rete in Accordo con le Norme Internazionali / Crotti, G.; D'Avanzo, G.; Giordano, D.; Letizia, P. S.; Luiso, M.; Signorino, D.. - (2023), pp. 409-410. (Intervento presentato al convegno VII Forum nazionale delle misure tenutosi a BOLOGNA nel 13-15 SETTEMBRE 2023).

*Availability:*

This version is available at: 11696/80562 since: 2024-03-08T13:41:30Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

GMEE

Copyright degli Autori

(Article begins on next page)

## Impatto dei Trasformatori Voltmetrici nella Misura delle Subarmoniche di Rete in Accordo con le Norme Internazionali

G. Crotti(1), G. D'Avanzo(2), D. Giordano(1), P. S. Letizia(1), M. Luiso(3), D. Signorino(3)

(1) Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, INRIM, Strada delle Cacce, 91 - 10135 Torino

(2) Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A, Via Rubattino 54 - 20134 Milano

(3) Dip. di Ingegneria, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Via Roma 29 - 81031 Aversa (CE)

mail autore di riferimento: p.letizia@inrim.it

### 1. INTRODUZIONE

La diffusione su larga scala di sistemi di generazione distribuita basati su fonti rinnovabili e l'aumento dei carichi elettronici stanno rendendo le reti elettriche sempre più complesse e soggette a disturbi. Il monitoraggio accurato dei parametri di qualità dell'energia (PQ) sta diventando sempre più importante. La misura della PQ in Media Tensione (MT) richiede l'uso di trasformatori voltmetrici (TV) per adattare le tensioni e ai livelli di ingresso degli strumenti di PQ. Tuttavia, la verifica delle prestazioni dei TV in presenza di fenomeni di PQ non sono oggetti di normative e sono un argomento solo parzialmente affrontato in letteratura scientifica. Le armoniche e le interarmoniche sono fenomeni di PQ critici da monitorare poiché possono causare problemi come surriscaldamento, perdite di energia e malfunzionamenti di dispositivi elettrici. Le subarmoniche appartengono alla famiglia delle interarmoniche e sono infatti interarmoniche caratterizzate da frequenze inferiori alla frequenza di rete. Esse possono essere introdotte in rete da sistemi di generazione distribuita come i parchi eolici, le centrali idroelettriche o gli impianti fotovoltaici, e dai carichi, come i forni ad arco e i cicloconvertitori. La misura delle subarmoniche è oggetto della norma internazionale IEC 61000-4-7 che definisce i metodi di misura, gli intervalli di tempo e gli indici di valutazione. In particolare, la norma suggerisce l'utilizzo della Trasformata di Fourier Discreta (DFT) eseguita con una finestra rettangolare su un intervallo di base pari a 10 cicli per i sistemi a 50 Hz.

Questo lavoro analizza gli errori introdotti da TV induttivi e trasformatori di tensione a bassa potenza (LPVT) nella misura delle subarmoniche, quando essa viene eseguita seguendo le indicazioni della norma IEC 61000-4-7. Lo studio viene eseguito sia per mezzo di simulazioni numeriche che attraverso test sperimentali. In particolare, vengono simulati diversi trasformatori di misura per effettuare un'analisi di sensibilità riguardo a come l'errore del introdotto dal TV sia influenzato dalla sua risposta in frequenza. Infine, vengono effettuati test sperimentali su due trasduttori commerciali.

### 2. Analisi numerica dell'impatto dei TV nella misura delle subarmoniche

Questa sezione, attraverso simulazioni numeriche, analizza gli effetti di un TV accoppiato con un misuratore di PQ sulla valutazione del primo gruppo ( $Y_g$ ) e sottogruppo ( $Y_{csg}$ ) armonico. Le norme IEC 61869 per gli IT non specificano i requisiti di prestazione per la misurazione delle subarmoniche. L'unico riferimento in tal senso è fornito dallo standard IEC 61869-6 che fornisce i limiti di errore di rapporto e fase degli LPVT a 1 Hz. Le simulazioni considerano diversi scenari con errori del TV a 0.1 Hz variabili ed errori a 50 Hz costanti e nulli. In particolare, le risposte in frequenza del TV vengono approssimate con linee rette tra i punti a 0.1 Hz e 50 Hz come riportato in Figura 1.

Il segnale numerico generato è costituito da tre toni, un tono fondamentale due subarmoniche come descritto dalla Equazione (1):

$$s_1(t) = A_f \sin(2\pi f_0 t) + A_{\text{sub-h}} \sin(2\pi f_{\text{sub-h}} t + \varphi_{\text{sub-h}}) + A_{\text{sub-h,out}} \sin(2\pi f_{\text{sub-h,out}} t + \varphi_{\text{sub-h,out}}) \quad (1)$$

Il tono fondamentale ha un'ampiezza  $A_f$  pari a 1 V ed una frequenza  $f_0$  fissata a 50 Hz; la prima subarmonica ha un'ampiezza  $A_{\text{sub-h}}$  pari all'1% di  $A_f$  ed una frequenza  $f_{\text{sub-h}}$  variabile nell'intervallo [5, 45] Hz e una fase iniziale  $\varphi_{\text{sub-h}}$  variabile nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ . La seconda subarmonica ha un'ampiezza  $A_{\text{sub-h,out}}$  pari all'1% di  $A_f$ , una frequenza  $f_{\text{sub-h,out}}$  variabile negli intervalli [0,1, 4,9] Hz e [45,1, 49,9] Hz e una fase iniziale  $\varphi_{\text{sub-h,out}}$  variabile casualmente nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ .

I principali risultati delle simulazioni sono riassunti di seguito:

- Quando l'errore di fase del TV è diverso da zero nell'intervallo di frequenza [0.1, 49.9] Hz, si gli errori introdotti dal TV nella misura di  $Y_g$  e  $Y_{csg}$  sono variabili nel tempo.
- I valori massimi di tali errori (indicati come  $\xi_g$  ed  $\xi_{csg}$ ) dipendono fortemente dalle risposte in frequenza dell'errore di fase del TV, mentre i loro valori medi dipendono dagli errori di rapporto.
- L'ampiezza di  $\xi_g$  ed  $\xi_{csg}$  aumenta drasticamente quando il segnale simulato include subarmoniche nell'intervallo di frequenza [0.1, 4.9] Hz.
- Al contrario, la presenza di subarmoniche nell'intervallo di frequenza [45.1, 49.9] Hz nel segnale di ingresso dell'IT ha un impatto minore.

In Figura 2 è riportato  $\xi_g$  in funzione dell'errore di rapporto e fase del TV quando il segnale descritto dall'Equazione (1) prevede  $f_{sub-h}$  a 6 Hz e  $f_{sub-h,out}$  a 4.9 Hz

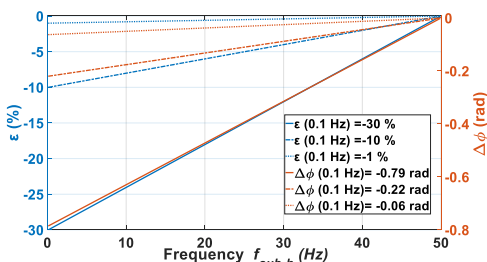


Fig.1 Risposte in frequenza dei TV simulati.

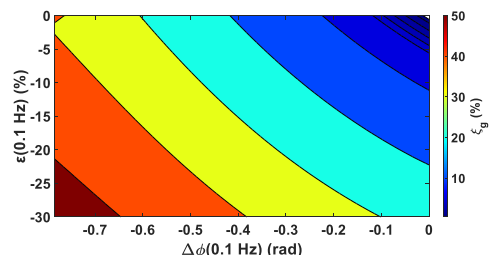


Fig.2:  $\xi_g$  vs errore di rapporto e fase del TV in presenza di  $f_{sub-h}$  a 6 Hz e  $f_{sub-h,out}$  a 4.9 Hz

### 3. Test sperimentali

Per quanto concerne i test sperimentali, sono stati provati due diversi trasduttori di tensione per applicazioni di MT, un TV induttivo ed un LPVT. I trasduttori in prova sono stati prima caratterizzati alle frequenze subarmoniche e successivamente è stato valutato il loro impatto nella misura del primo gruppo e sottogruppo armonico generando il segnale di tensione descritto dall'Equazione (1). Considerando il caso di  $f_{sub-h}$  fissata a 10 Hz, i risultati sperimentali sono riportati in Figura 3 per il TV induttivo ed in Figura 4 per il trasduttore LPVT.

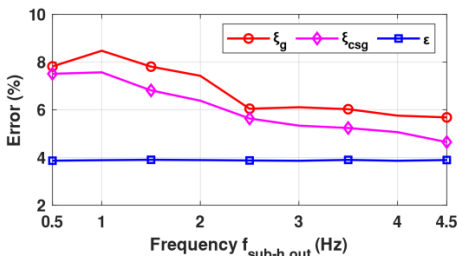


Fig.3: LPVT- errore nella misura del primo gruppo ( $\xi_g$ ) e sottogruppo centrato ( $\xi_{csg}$ ), ed errore di rapporto ( $\epsilon$ ) con subarmoniche nel range [0.5,45] Hz e 10 Hz

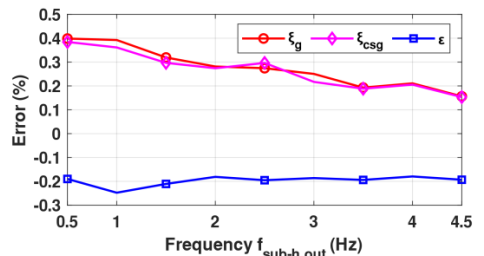


Fig.4: TV- errore nella misura del primo gruppo ( $\xi_g$ ) e sottogruppo centrato ( $\xi_{csg}$ ), ed errore di rapporto ( $\epsilon$ ) con subarmoniche nel range [0.5,45] Hz e 10 Hz

### ACKNOWLEDGMENT

The work here presented has been developed within the EMPIR 19NRM05 IT4PQ project, which has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] G. Crotti, G. D'Avanzo, P. S. Letizia and M. Luiso, "The Use of Voltage Transformers for the Measurement of Power System Subharmonics in Compliance With International Standards," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 1-12, 2022, Art no. 9005912, doi: 10.1109/TIM.2022.3204318.