

Misurazione della potenza assorbita e dell'efficienza in condizioni non sinusoidali

Francesco Grasso, Antonio Luchetta, Stefano Manetti
Università di Firenze
Dipartimento di Ingegneria informatica
DINFO – Via Santa Marta,3 I-50139 Firenze (FI)
francesco.grasso@unifi.it

Franco Cenghialta, Ernesto D'Antuono, Stefano De Giorgis
Energia Europa S.p.A.
R&D Department
Via Trieste, 222/B I-36010 Zanè (VI)
f.cenghialta@energia-europa.com

Abstract—La presenza di armoniche conduce a disturbi e perdite negli impianti elettrici che causano malfunzionamenti e inefficienze. I livelli di emissione armonica sono in progressivo aumento a causa della presenza di carichi non lineari e della generazione distribuita da fonte energetica rinnovabile. La valutazione degli effetti sugli impianti elettrici rappresenta un obiettivo importante per le industrie moderne, dove i disturbi sono causa di danni e di inefficienze. Secondo i dati della Leonardo Power Quality Initiative (LPQI) e in base alla ricerca condotta dall'Electric Power Research Institute (EPRI), si stima che la scarsa qualità dell'energia elettrica costi all'economia europea fino a 150 miliardi di euro all'anno e gli Stati Uniti prevedono perdite comprese tra 119 e 188 miliardi di dollari. L'80% dei disturbi della qualità energetica ha origine all'interno di un impianto. L'utilizzo di sistemi di filtraggio, come ad esempio i filtri passivi di serie, può limitare i malfunzionamenti e le inefficienze. Per valutare l'impatto dei filtri sui disturbi e sulle inefficienze, vengono presentati diversi metodi, sulla base delle definizioni e delle istruzioni riportate nelle norme, come lo standard IEEE 1459. Per attuare le misure necessarie a comprendere l'efficacia dei filtri, è possibile utilizzare misure nell'ambito temporale che, attuate per periodi di tempo limitati, ma con molte ripetizioni, possono offrire una valida risposta all'efficienza raggiunta. Pertanto, per valutare correttamente tutti i valori delle componenti armoniche, come previste dallo IEEE 1459, è necessario implementare misure molto dettagliate e complesse, difficili da ottenere in campo industriale. In questi casi, lo IEEE 1459 propone di misurare i valori associati alle varie componenti di potenza attraverso alcune approssimazioni che possono portare a errori nell'ordine di alcuni punti percentuali. Gli effetti di un filtro possono portare a misurazioni comparabili con le approssimazioni presentate dallo IEEE 1459, pertanto è stato necessario trovare una nuova modalità operativa per ottenere le quantità richieste.

In questo paper viene presentato un metodo per valutare l'efficienza ottenuta grazie a un filtro passivo. Il paper ha la seguente struttura: la sezione II presenta i concetti di base relativi alle quantità da misurare. La sezione III illustra il metodo implementato, mentre nella sezione IV viene presentato un caso reale di misurazione presso un impianto industriale.

Parole chiave— filtro passivo, riduzione di armoniche, efficienza energetica, qualità dell'energia elettrica, potenza armonica.

I. INTRODUZIONE

Attualmente, la qualità dell'energia elettrica e l'efficienza degli impianti elettrici costituiscono una delle questioni globali più importanti, in virtù dell'impatto sulla competitività industriale e su questioni cruciali per l'economia delle nazioni. [1]. I livelli di emissione armonica sono in progressivo aumento a causa della presenza di carichi non lineari e della generazione distribuita da fonte di energia rinnovabile.

Secondo la Leonardo Power Quality Initiative [2], si stima che la scarsa qualità dell'energia elettrica costi all'economia europea fino a 150 miliardi di euro all'anno e gli Stati Uniti prevedono perdite che vanno da 119 a 188 miliardi di dollari, secondo una ricerca dell'Electric Power Research Institute (EPRI). Il dato statistico più importante, probabilmente, è quello rilevato dall'EPRI, ovvero che l'80% dei disturbi della qualità dell'energia elettrica sia generato all'interno di un impianto.

La valutazione degli effetti sugli impianti elettrici rappresenta un obiettivo importante per le industrie moderne, dove i disturbi sono causa di danni e di inefficienze. Per valutare gli effetti dei disturbi armonici nelle reti elettriche esistono degli standard internazionali, quali ad esempio lo standard [3] IEEE 1459-2010, lo standard IEEE 519-2014 [4] e quello ANSI / IEEE 1159-2009 [5]. In molti casi, tuttavia, l'applicazione delle norme, pur ottenendo importanti risultati nell'analisi di impianti elettrici con disturbi armonici, ha evidenziato il limite dovuto al fatto che la misurazione degli effetti di un'energia elettrica più efficiente è legata al tipo di carichi collegati all'impianto [6]–[14].

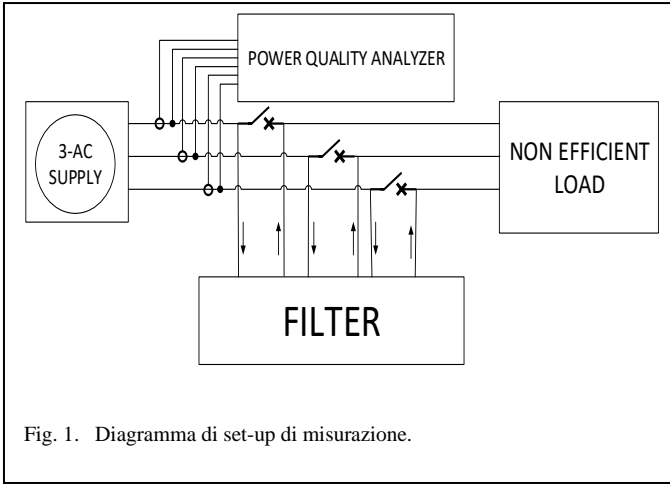
In particolare, si è reso necessario effettuare misurazioni dell'efficacia di un filtro passivo collegato in serie direttamente dopo il trasformatore di potenza di alcuni impianti industriali ad alta potenza, con carichi non lineari/non efficienti (si veda Fig. 1), ma sono stati riscontrati problemi dovuti alla complessità degli impianti e non è stato possibile ottenere condizioni di lavoro stabili e costanti per un intervallo di tempo adeguato. Gli impianti analizzati, infatti, presentano caratteristiche che non consentono di definire modalità operative standard, quindi è necessario poter ottenere le quantità richieste senza provocare interruzioni o malfunzionamenti.

In questo paper viene presentato un metodo per valutare l'efficienza ottenuta grazie a un filtro passivo. Il paper ha la seguente struttura: la sezione II presenta i concetti di base relativi alle quantità da misurare. La sezione III illustra il metodo implementato, mentre nella sezione IV viene presentato un caso reale di misurazione presso un impianto industriale.

II. QUANTITÀ DI POTENZA IN CONDIZIONI NON-SINUSOIDALI

Nel 1933, presso l'AIEE di Schectady, il prof. Karapetoff affermò:

"Qualsiasi definizione di fattore di potenza che non possa essere realizzata con strumenti di misura abbastanza semplici e pratici è destinata a cadere nel vuoto; d'altra parte, una definizione non sufficientemente rigorosa a livello teorico potrebbe rivelarsi di grande utilità pratica se le misurazioni corrispondenti sono semplici e facilmente comprensibili dal tecnico operativo medio."



Questa affermazione è di grande attualità, soprattutto al giorno d'oggi, a fronte di un sistema sempre più complesso e sensibile alla potenza [10], [15], [16]. Attualmente non esiste una definizione ampiamente accettata di fattore di potenza, ma possiamo iniziare a considerare le definizioni per la misurazione delle quantità di potenza in diverse condizioni (sinusoidale, non-sinusoidale, bilanciata o non bilanciata) previste dallo standard IEEE 1459-2010. In particolare, le definizioni di potenza in sistemi non-sinusoidali rappresentano un argomento sul quale la discussione è ancora aperta [17], [18].

La definizione dello standard IEEE 1459-2010 parte dall'idea sviluppata nel 1995 da A.E. Emanuel [15], [19]. Se si considera che un impianto elettrico non può funzionare correttamente senza la presenza di energia reattiva e che, ad esempio, il flusso di magnetizzazione principale di una macchina elettrica si crea grazie alla componente fondamentale della corrente di alimentazione, è interessante suddividere la potenza in due parti, in cui la componente fondamentale svolge un ruolo importante nella valutazione del lavoro svolto. Infatti, in un motore, la componente fondamentale permette al motore stesso di girare correttamente, mentre la terza armonica non offre alcun contributo e la quinta, se presente, è addirittura un freno.

In un impianto elettrico in cui sia presente un contenuto armonico (per semplicità, il componente continuo non viene considerato), è possibile scrivere le tensioni e le correnti in qualsiasi punto come ad esempio:

$$v = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + \sum_{h \neq 1} \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) = v_1 + \sum_h v_h \quad (1)$$

$$i = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + \sum_{h \neq 1} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t - \beta_h) = i_1 + \sum_h i_h \quad (2)$$

dove v_h e i_h sono le armoniche h -th di tensione e corrente, rispettivamente. Di conseguenza, la potenza istantanea deriva da:

$$\begin{aligned} p &= v \cdot i = \left(v_1 + \sum_h v_h \right) \cdot \left(i_1 + \sum_h i_h \right) = \\ &= v_1 \cdot i_1 + v_1 \cdot \sum_h i_h + i_1 \cdot \sum_h v_h + \sum_h v_h \cdot \sum_h i_h \end{aligned} \quad (3)$$

La potenza istantanea viene poi suddivisa in due termini:

$$p = p_a + p_q \quad (4)$$

dove

$$p_a = \sum_{h \geq 1} V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (5)$$

è la parte uguale alla somma delle potenze armoniche attive e

$$\begin{aligned} p_q &= -\sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) + \\ &+ 2 \sum_n \sum_{m \neq n} V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \end{aligned} \quad (6)$$

è un termine che non rappresenta un netto trasferimento di energia. Ciononostante, la corrente relativa a queste componenti non-attive causa un'ulteriore perdita di energia nei conduttori. L'angolo $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ è l'angolo di sfasamento tra i fasori V_h e I_h .

Si noti che ogni potenza istantanea attiva dell'ordine h ha due termini: una potenza armonica, attiva o reale $p_h = V_h I_h \cos \theta_h$, e la potenza armonica intrinseca, $p_i = -P_h \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)$.

Partendo da (3), è possibile anche definire la potenza attiva:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P_1 + P_H \quad (7)$$

e la potenza apparente è:

$$S^2 = (V \cdot I)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (8)$$

dove $S_1 = (V_1 I_1)^2$ è la potenza apparente fondamentale, $D_I = V_1 I_H = S_1 \cdot TDH_I$ è la potenza di distorsione di corrente, $D_V = V_H I_1 = S_1 \cdot TDH_V$ è la potenza di distorsione del voltaggio e $S_H = V_H I_H = S_1 \cdot TDH_I \cdot TDH_V$ è la potenza di distorsione dell'energia elettrica.

Pertanto, per valutare correttamente tutti i valori delle componenti armoniche, come previste dallo IEEE 1459, è necessario implementare misure molto dettagliate e complesse, difficili da ottenere in campo industriale. Inoltre, in molti casi è sufficiente conoscere il valore di P , in modo da considerare solo le componenti armoniche pertinenti. Per questi motivi, lo IEEE 1459 propone di misurare i valori associati alle varie componenti di potenza attraverso alcune approssimazioni che possono portare a errori nell'ordine di alcuni punti percentuali [20]–[22]. Gli effetti di un filtro possono portare a misurazioni comparabili con le approssimazioni presentate dallo IEEE 1459, pertanto è stato necessario trovare una nuova modalità operativa per ottenere le quantità richieste.

Il metodo di misurazione proposto supera queste difficoltà offrendo risultati eccellenti se le misurazioni sono effettuate su impianti ad alto contenuto armonico ($THD_I > 40\%$).

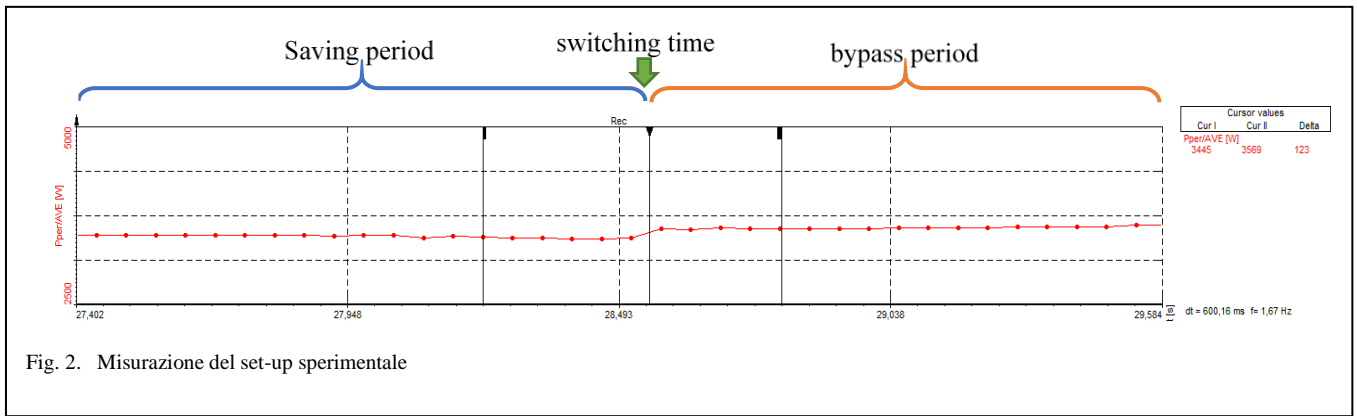


Fig. 2. Misurazione del set-up sperimentale

III. METODO DI MISURAZIONE

Il metodo di misurazione proposto si basa su lavori pregressi e risultati sperimentali [7], [23], [24], effettuati anch'essi dagli stessi autori [6], [25]–[28]. L'obiettivo del metodo proposto è consentire la misurazione continua e verificare l'efficacia del filtro in un sistema di energia elettrica, eliminando i rischi di un'interruzione del servizio. Per questo motivo, durante l'installazione del filtro, è necessario prevedere un circuito di bypass, in grado di escludere immediatamente il filtro senza interrompere l'alimentazione elettrica. Il circuito di misura, rappresentato schematicamente in Fig.1, è stato realizzato posizionando il filtro in derivazione rispetto alla linea di alimentazione del carico e installando un contattore trifase che permette la disconnessione istantanea del filtro, in quanto può cortocircuitare le linee che alimentano il filtro, trasportando la rete di alimentazione direttamente sul carico. Se si definisce il momento in cui il contattore è aperto come momento di risparmio e il momento in cui il contattore è chiuso come momento di risparmio, va da sé che nella commutazione risparmio-bypass, cioè passando dalla condizione di filtro inserito a quella di filtro disinserito, l'effetto del filtro sul circuito alimentato cessa immediatamente. In altre parole, chiudendo il contattore è possibile ritenere che ciò che viene misurato non è collegato all'operazione del filtro. Successivamente sono state condotte delle misurazioni ripetendo varie volte le commutazioni (fino a 100 commutazioni per una campagna di misurazione) e a diversi intervalli (fino a 20 secondi ciascuna). La forma d'onda tipica di ogni misura si vede alla Fig. 2, dove sono riportate le caratteristiche di ogni misura eseguita, evidenziando il periodo in cui il filtro è attivo (risparmio) e il periodo in cui il filtro è bypassato (bypass). Come si può vedere, al momento

della commutazione, lo strumento mostra una sezione a curva che collega i valori misurati prima e dopo. Ciò non

corrisponde a una variazione lineare effettiva, ma solo a una approssimazione dovuta alla modalità di campionamento della misura, necessaria per ottenere valori comparabili. Allo stesso tempo, è possibile monitorare l'andamento della potenza assorbita dai carichi durante tutta la campagna di misurazione e, di conseguenza, la misura dell'energia. La Fig. 3 illustra la tendenza del carico di potenza durante una campagna di misurazione. Una volta acquisite tutte le

misure, è possibile ordinarle in base al valore di potenza e valutare la differenza di misura tra il periodo di bypass e il periodo di risparmio. Questa differenza, indicata in termini percentuali, rappresenta con una buona approssimazione la variazione di potenza assorbita dal sistema durante i due periodi. Se questa percentuale viene moltiplicata per il valore dell'energia assorbita dal sistema, è possibile valutare la variazione dell'energia consumata dal sistema. In questo senso, un valore positivo indica energia risparmiata durante il periodo di risparmio, in confronto al periodo di bypass. Purtroppo non è possibile ripetere la campagna di misura in modo costante, sia perché i componenti elettrici sono soggetti a forti sollecitazioni che possono danneggiarli, sia perché in questo modo il filtro può funzionare solo per una parte del tempo a disposizione, riducendone fortemente le prestazioni. Nelle applicazioni tipiche, la resa di potenza dei carichi si ripete pressoché costantemente nei vari giorni lavorativi, quindi è possibile valutare i risparmi ottenuti applicando i risultati di una o più campagne di misura anche nei giorni in cui non sono state effettuate commutazioni. In altre parole, se i carichi si comportano in modo uniforme, anche i risparmi misurati devono essere comparabili, quindi i valori di risparmio per le fasce di potenza, ottenuti durante la campagna di misurazione, possono essere usati per valutare i risparmi energetici forniti dal normale funzionamento del sistema, senza la necessità di apportare alcuna modifica.

In questo senso, è possibile valutare i risparmi ottenuti misurando semplicemente l'energia e la potenza assorbita in un certo periodo ed estrapolando i valori di risparmio energetico, come meglio illustrato nell'applicazione sperimentale.

IV. APPLICAZIONE SPERIMENTALE

Prima di effettuare misurazioni in loco, è stato necessario verificare la possibilità di leggere correttamente i valori di tensione, corrente e potenza attraverso un'installazione sperimentale in laboratorio. La Fig. 4 mostra il set-up sperimentale realizzato presso lo "Smart-Energy Lab", un laboratorio congiunto dell'Università di Firenze ed Energia Europa SpA.

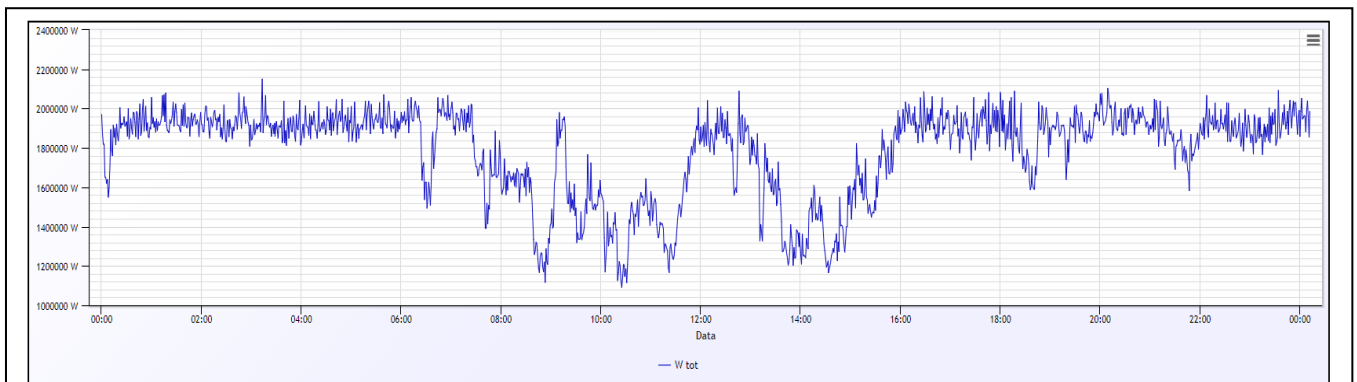


Fig. 3. Tendenza tipica dell'intensità di corrente durante un giorno lavorativo.

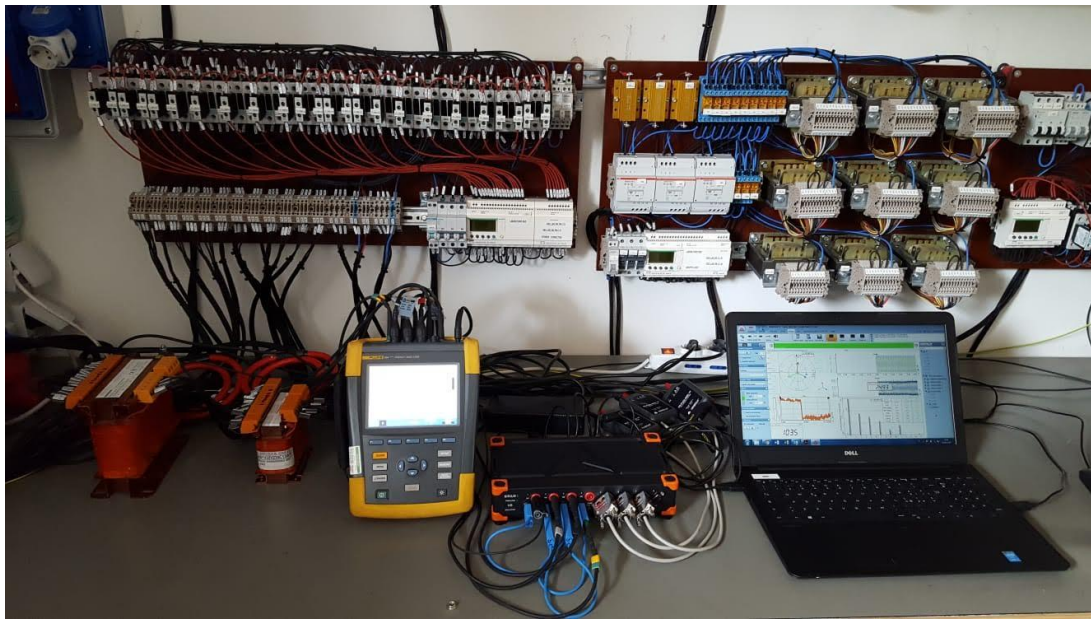


Fig. 4. Set-up sperimentale.

Il set up sperimentale, utilizzato per convalidare la catena di misura, è costituito da una serie di carichi non lineari (raddrizzatori monofase e trifase, alimentatori a commutazione) e da una serie di strumenti di misura.

Gli strumenti utilizzati sono stati un analizzatore della Power Quality ed Energia Fluke 435 Serie II ($\pm 0,1\%$ di precisione di tensione in ingresso Classe A in base a IEC61000-4-30 2003) e un Dewesoft Sirius STG ($\pm 0,05\%$ di precisione di tensione in ingresso). Il primo strumento è stato utilizzato per monitorare il carico dei carichi e verificare eventuali malfunzionamenti, mentre lo strumento Dewesoft ha permesso di misurare le quantità in ingresso al sistema registrando fino a 100.000 campioni al secondo (100kS/s) e facendo una media della misura su un periodo di tempo prestabilito (minimo 10 ms). Le curve in Fig.5 rappresentano alcune delle commutazioni risparmio/bypass svolte in un sito produttivo durante il suo normale ciclo produttivo. Durante questa fase di sperimentazione è stato possibile verificare, misurando i valori di potenza assorbita ed erogata da ciascun carico, che il passaggio dalla modalità risparmio alla modalità bypass ha permesso di ottenere misure di potenza molto stabili e ripetibili.

| Intervallo di misurazione | | | Consumo energetico in modalità RISPARMIO (kWh) per gruppi di potenza | | | Energia/giorno kWh/giorno | Risparmio giornaliero |
|--|------------|----------|--|-----------|-----------|--|-----------------------|
| | | | GRUP PO 1 | GRUP PO 2 | GRUP PO 3 | | |
| da | 12/09/2017 | 00.00.00 | 3048,6 | 3446,5 | 33881,2 | 40376,3 | 4,11% |
| fino a | 12/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 13/09/2017 | 00.00.00 | 470,1 | 1250,9 | 42234,4 | 43955,4 | 4,18% |
| fino a | 13/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 14/09/2017 | 00.00.00 | 229,2 | 130,0 | 42903,5 | 43262,7 | 4,21% |
| fino a | 14/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 15/09/2017 | 00.00.00 | 387,5 | 411,0 | 44854,9 | 45653,4 | 4,20% |
| fino a | 15/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 16/09/2017 | 00.00.00 | 16741,8 | 455,9 | 9930,8 | 27128,5 | 3,98% |
| fino a | 16/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 17/09/2017 | 00.00.00 | 416,7 | 0,0 | 0,0 | 416,7 | 3,86% |
| fino a | 17/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| da | 18/09/2017 | 00.00.00 | 9467,4 | 2024,9 | 14352,0 | 25844,3 | 4,01% |
| fino a | 18/09/2017 | 00.00.00 | | | | | |
| % di RISPARMIO per intervallo dalla Tabella I | | | 3,86% | 3,31% | 4,21% | | |
| Consumo energetico statico settimanale in modalità Risparmio per gruppo (kWh) | | | 30761,5 | 7719,0 | 188156,8 | Consumo energetico settimanale in modalità Risparmio (kWh) 226.637,3 | |
| Consumo energetico statico settimanale stimato in modalità bypass per gruppo (kWh) | | | 31996,5 | 7983,2 | 196,429,0 | Consumo energetico settimanale stimato in modalità bypass (kWh) 236.408,7 | |
| PERCENTUALE % DI RISPARMIO ENERGETICO STATICO TOTALE | | | | | | 4,13% | |

TABLE I. MISURAZIONE IN MODALITÀ RISPARMIO

| Gruppi | Misurazione dell'energia elettrica | | | |
|----------|-------------------------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|
| | Potenza media in modalità risparmio | Risparmio % | Potenza media del gruppo | Media ponderata del risparmio % |
| Gruppo 1 | 1260,24 | 3,64 | 1277,35 | 3,86 |
| | 1263,22 | 3,64 | | |
| | 1285,36 | 3,94 | | |
| | 1286,07 | 3,20 | | |
| | 1291,85 | 4,87 | | |
| Gruppo 2 | 1300,41 | 3,07 | 1345,55 | 3,31 |
| | 1328,21 | 5,09 | | |
| | 1343,80 | 2,32 | | |
| | 1368,32 | 3,12 | | |
| | 1387,01 | 2,97 | | |
| Gruppo 3 | 1450,56 | 3,91 | 1563,46 | 4,21 |
| | 1617,88 | 3,98 | | |
| | 1621,95 | 4,71 | | |
| | | | | |

TABLE II. ANALISI RISPARMIO ENERGETICO

Per consentire una corretta valutazione delle misurazioni effettuate, sono stati selezionati i carichi non-lineari in modo da avere una potenza in uscita di tipo continuo e costante. Pertanto, sia i raddrizzatori che gli alimentatori a commutazione hanno la caratteristica di mantenere costante la tensione di uscita, mentre i carichi collegati sono stati ottenuti con resistenze lineari. Grazie alla possibilità di campionare le misure ad altissima frequenza, è possibile garantire che le variazioni misurate tra il periodo di bypass e quello di risparmio siano associate agli effetti del filtro. Ovviamente, i valori di risparmio misurati in ogni commutazione non sono costanti, in quanto influenzati dalla configurazione dei carichi nel momento in cui avviene la commutazione. Per questo motivo, il risparmio ottenuto in ciascuna commutazione in diversi

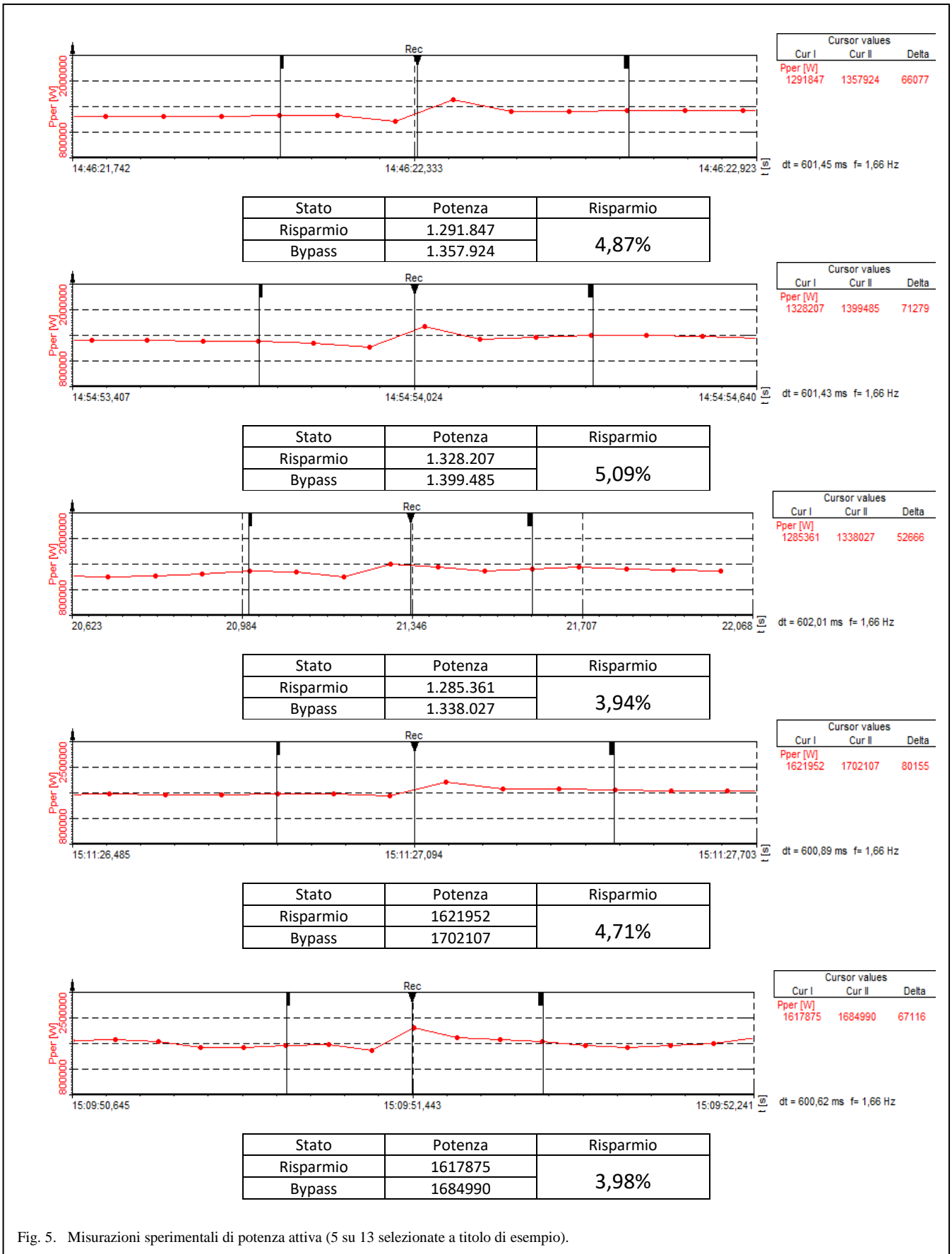


Fig. 5. Misurazioni sperimentali di potenza attiva (5 su 13 selezionate a titolo di esempio).

intervalli di alimentazione viene raggruppato in base a valori analoghi e comparabili; per ogni gruppo, quindi, abbiamo calcolato il valore medio di risparmio. La tabella I mostra alcuni dei valori di potenza misurati nel periodo di risparmio e la variazione percentuale

rispetto al periodo di bypass. Le linee in grassetto si riferiscono alle misurazioni della Fig. 5. Per semplificare ulteriormente i passi successivi, le misure sono state raggruppate e per ogni gruppo di valori di potenza è stato calcolato il valore medio di risparmio. A

questo punto, è stata eseguita una campagna di misurazione della durata di una settimana sull'assorbimento di potenza e sul consumo energetico.

Il valore globale di risparmio energetico (kWh) risulta dalla somma di tutti i valori di risparmio energetico di ogni singolo intervallo di potenza, come si evince dalla tabella II.

V. CONCLUSIONI

In questo paper viene presentato un metodo per misurare gli effetti in termini di efficienza dei sistemi elettrici. Partendo dalla definizione dell'IEEE 1459 è stato possibile spiegare che alcune misurazioni di potenza (e quindi di energia), devono basarsi su delle approssimazioni. Se le approssimazioni sono comparabili con il risultato atteso, le misurazioni ne risultano fortemente condizionate. Per questo motivo è stato necessario combinare metodi analitici basati sulle definizioni dello IEEE 1459, nonché un metodo statistico basato su un elevato numero di misurazioni, effettuate grazie a un sistema di bypass integrato che permette l'eliminazione istantanea dell'azione del filtro. Le misure così effettuate possono essere considerate indicative del comportamento del circuito che funziona con e senza filtro. La ripetibilità delle misure permette di affermare che il metodo può essere considerato affidabile. Inoltre, grazie alle prove di laboratorio effettuate su carichi noti, è stato possibile accertare la validità delle misurazioni effettuate sia con il metodo analitico che con il metodo proposto dagli autori. Infine, i test presso un insediamento industriale/terziario ci hanno permesso di valutare adeguatamente il risparmio energetico conseguente all'utilizzo del filtro.

REFERENCES

- [1] T. Sun, X. Wang, and X. Ma, "Relationship between the economic cost and the reliability of the electric power supply system in city: A case in Shanghai of China," *Appl. Energy*, vol. 86, pp. 2262–2267, Oct. 2009.
- [2] J. Driesen *et al.*, *The Leonardo power quality initiative (LPQI), an integrated approach towards E-learning in electrical engineering*. 2018.
- [3] "IEEE Std. 1459-2010 - IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions." Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010.
- [4] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems - Redline," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) - Redline*. pp. 1–213, 2014.
- [5] "IEEE Std. 1159-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality." IEEE.
- [6] F. Grasso *et al.*, "Improvement of Power Flow Analysis based on Currenttextquotesingle Physical Component (CPC) Theory," *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 01-May-2018.
- [7] S. L. Mahaddalkar and V. N. Shet, "Comparative analysis of power quality using wavelets for real time implementation," *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*. IEEE, 01-Nov-2016.
- [8] J. C. Alfonso-Gil, S. Orts-Grau, N. Munoz-Galeano, F. J. Gimeno-Sales, and S. Segui-Chilet, "Measurement System for a Power Quality Improvement Structure Based on IEEE Std.1459," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 12.
- [9] J. E. L. Almeida, P. M. Silveira, H. Arango, M. F. C. Parentoni, and J. P. G. Abreu, "Time-domain formulations for apparent power using collective rms and polar coordinates," *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*. IEEE, 01-Sep-2010.
- [10] A. M. O. Pinzon, J. M. C. Guimaraes, P. M. da Silveira, and P. F. Ribeiro, "Power measurements under IEEE 1459-2010 standard on a microgrid with renewable sources," in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 968–973.
- [11] V. N. Tulsy, M. A. Tolba, A. A. Radwan, O. M. Foly, and A. A. Z. Diab, "Measurement and analysis of an electric power distribution system with optimal reactive power compensation for improving the power quality. Case study: Middle Egypt region," in *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2017, pp. 1613–1618.
- [12] M. Castro-Nunez and R. Castro-Puche, "The IEEE Standard 1459, the CPC Power Theory, and Geometric Algebra in Circuits With Nonsinusoidal Sources and Linear Loads," *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.*, vol. 59, pp. 2980–2990, Dec. 2012.
- [13] L. De Oro Arenas, G. A. e Melo, and C. A. Canesin, "FPGA-based power meter implementation for three-phase three-wire and four-wire power systems, according to IEEE 1459-2010 standard," in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–6.
- [14] A. Cataliotti, V. Cosentino, D. D. Cara, and G. Tinè, "IEEE Std. 1459 power quantities ratio approaches for simplified harmonic emissions assessment," in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018, pp. 1–6.
- [15] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [16] L. S. Czarniecki, "Physical Interpretation of the Reactive Power in Terms of the CPC Power Theory," *J. Electr. Power Qual. Util.*, vol. XIII, pp. 89–95, 2007.
- [17] Y. Beck, N. Calamaro, and D. Shmilovitz, "A review study of instantaneous electric energy transport theories and their novel implementations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1428–1439, May 2016.
- [18] D. Jeltsema, "Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited," in *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, 2015.
- [19] A. E. Emanuel, "On the assessment of harmonic pollution of power systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, pp. 1693–1698, Jul. 1995.
- [20] R. Arseneau *et al.*, "Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, pp. 79–101, 1996.
- [21] A. E. Emanuel, "On the assessment of harmonic pollution of power systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, pp. 1693–1698, Jul. 1995.
- [22] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. V. Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 4, pp. 485–489, Sep. 2007.
- [23] M. Youhannaei, J. Talebi, R. Mehri, M. E. Honarmand, H. Mokhtari, and S. Ouni, "Performance evaluation of energy meters in nonsinusoidal environment based on IEEE 1459 standard," *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [24] B. Gutierrez and S.-S. Kwak, "Comparative analysis of APF and HPF for utility harmonic compensation," in *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE)*, 2015, pp. 2853–2856.
- [25] F. Grasso, A. Luchetta, S. Manetti, S. D. Giorgis, F. Cenghialta, and E. D'Antuono, "Improving power quality and efficiency in electrical plants using a three-phase series hybrid passive filter," *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. IEEE, 2016.
- [26] F. Grasso, A. Luchetta, S. Manetti, and M. C. Piccirilli, "A double neural network for interpretation of the frequency response in the electrical equipments," *2012 6th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE INTELLIGENT SYSTEMS*. IEEE, 01-Sep-2012.
- [27] F. Grasso, A. Fusi, and A. Ussi, "New harmonics current mitigation technique in induction motor driving reciprocating compressor," *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. IEEE, 01-Sep-2015.
- [28] P. A. Scarpino and F. Grasso, "Analysys of complex hospital electrical systems," *2017 AEIT International Annual Conference*. IEEE, 01-Sep-2017.