

Impatto della Generazione Fotovoltaica sui Flussi Energetici, sul Fattore di Potenza, e sulla Distorsione Armonica di Corrente in reti con presenza di armoniche prodotte dai carichi

Abstract

Il presente documento costituisce uno studio basandosi sull'analisi elettrica e sulla qualità dell'energia di un caso reale riguardante un impianto industriale con **carichi non-lineari** e dotato di un **sistema di generazione fotovoltaica**.

Tipologie impiantistiche di questo genere sono attualmente molto comuni: predisposte sui nuovi impianti ma altresì diffusi largamente nel revamping di linee industriali

L'indagine telemetrica effettuata sul Punto di Consegna (PCC) ha evidenziato una **criticità tipica ma spesso sottovalutata** nei moderni stabilimenti dotati di autoproduzione.

Quando l'impianto fotovoltaico produce a piena potenza (coprendo o superando i consumi dei macchinari), la potenza attiva prelevata dalla rete crolla drasticamente fino ad annullarsi o invertire il flusso. Tuttavia, i carichi continuano a richiedere la stessa energia reattiva e a generare lo stesso spettro armonico portando alla distorsione dei flussi al Punto di Consegna (PCC) e il collasso della qualità dell'energia:

Poiché gli inverter fotovoltaici tradizionali non gestiscono la reattiva e i carichi continuano a "sporcare" la rete, si assiste a un peggioramento drastico del fattore di potenza (**$\cos\varphi$**) e a un'impennata percentuale della distorsione armonica (**THDI%**), con il conseguente rischio di sanzioni in bolletta, malfunzionamenti delle apparecchiature, blocco o danni dei rifasatori installati.

Le soluzioni ci sono: rifasatori ibridi o con induttanze di de-sintonizzazione, compensazione attiva e filtri armonici. Sostanzialmente la scelta è basata sul **quando** si decide di implementare l'impianto e **quanto** costa un blocco produttivo all'azienda

1. Premessa e Contesto Operativo del Case Study

Questo approfondimento e studio di *Power Quality* è basato sull'analisi delle grandezze elettriche registrate presso un impianto industriale, specializzato in lavorazioni meccaniche di precisione. Il ciclo produttivo dello stabilimento è caratterizzato dall'impiego di macchine utensili a controllo numerico (CNC), centri di lavoro, azionamenti a velocità variabile (inverter). Avendo installato un impianto fotovoltaico di nuova generazione rappresenta il caso studio ideale per esaminare gli effetti combinati dell'autoconsumo **fotovoltaico** e dei **carichi non lineari** sui parametri elettrici al Punto di Consegna (PCC).

L'analisi telemetrica ad alta risoluzione permette di valutare l'impatto dei flussi energetici bidirezionali sulla stabilità del sistema e di definire le contromisure impiantistiche ottimali.

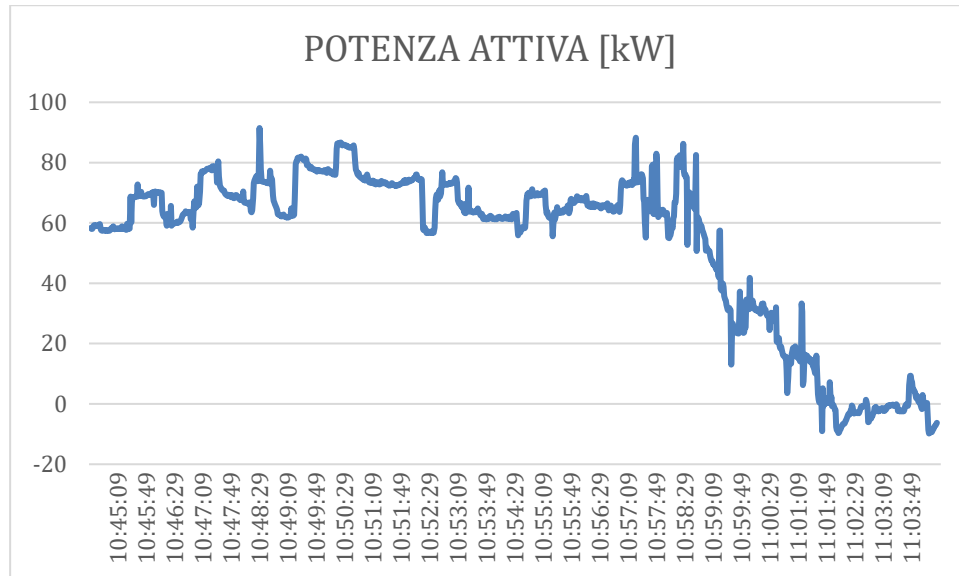
2. Introduzione e Inquadramento al PCC

L'interfacciamento di impianti di generazione fotovoltaica (FTV) a inverter ai sistemi di distribuzione in bassa e media tensione altera radicalmente il regime energetico al Punto di Consegna o Punto di Connessione con la Rete (PCC). In condizioni di funzionamento in regime distorto, il profilo di scambio non è più descrivibile unicamente mediante i flussi di potenza nominali a frequenza industriale (50 Hz), ma richiede un'analisi vettoriale e armonica rigorosa basata sull'algebra dei vettori di potenza.

3. Trattazione Analitica e Scomponimento dei Flussi di Potenza (P e Q)

Dall'acquisizione dei dati (intervallo 10:45 - 11:04), si evidenzia una netta dissociazione tra il comportamento della potenza attiva e quello della potenza reattiva, come documentato dai grafici reali di campo.

3.1 Dinamica della Potenza Attiva (P) e Contributo dell'Autoconsumo



- **Regime pre-fotovoltaico:** Nelle condizioni iniziali, la potenza attiva prelevata dalla rete riflette interamente il carico attivo globale dell'utenza, attestandosi intorno a 60 - 90 kW.
- **Transitorio di generazione:** A partire dalle 10:58, la salita in potenza della generazione FTV locale inietta corrente attiva in parallelo ai carichi. Per il principio di conservazione delle potenze al nodo del PCC, la relazione analitica è:

$$P_{grid}(t) = P_{load}(t) - P_{fv}(t)$$

Dove:

$P_{grid}(t)$ → Potenza attiva prelevata dalla rete di distribuzione

$P_{load}(t)$ → Potenza attiva consumata dai carichi

$P_{fv}(t)$ → Potenza attiva generata dall'impianto FTV

Il crollo di P_{grid} registrato nel grafico reale verso lo zero e la transizione a valori negativi (fino a circa -10 kW) dimostra che P_{fv} eguaglia ed eccede momentaneamente P_{load} , determinando un'inversione del flusso energetico attivo verso la rete pubblica.

3.2 Invarianza della Potenza Reattiva (Q) e Magnetizzazione



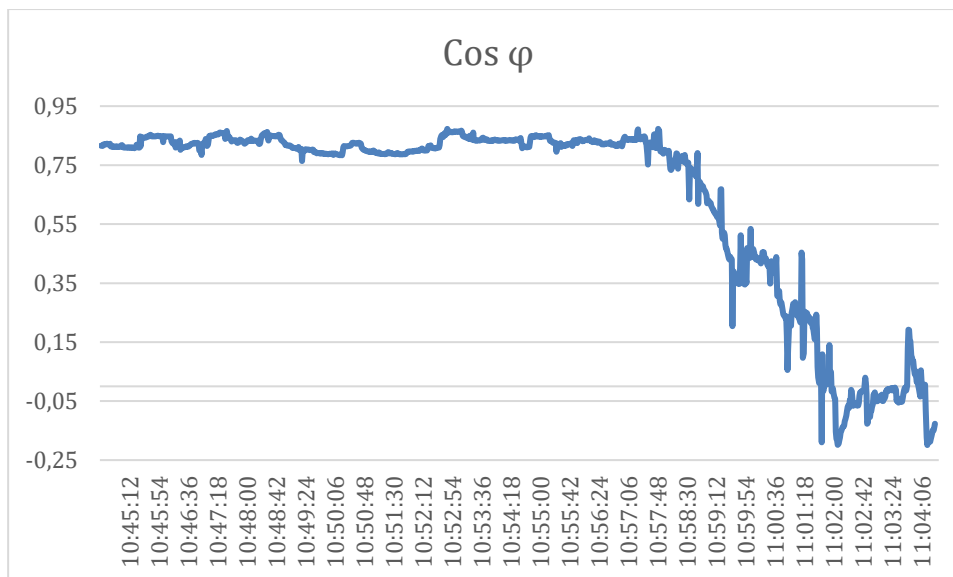
- **Stazionarietà di Q:** La potenza reattiva Q_{grid} si mantiene stazionaria nella fascia 40 - 70 kVAR (con un livello medio intorno a 50 kVAR). I carichi induttivi dell'impianto (motori asincroni, ecc.) continuano a richiedere la medesima potenza reattiva induttiva per la generazione del flusso magnetico concatenato.
- **Assenza di contributo inverter:** Poiché gli inverter fotovoltaici standard operano tipicamente a fattore di potenza unitario o prossimo ad esso, non forniscono la potenza reattiva di magnetizzazione. Di conseguenza, il fabbisogno di Q non beneficia dell'apporto fotovoltaico e permane interamente a carico della rete di fornitura, disaccoppiandosi completamente dall'andamento di P_{grid} .

4. Degradazione del Displacement Power Factor e del $\cos\varphi$ Totale

Il peggioramento repentino del fattore di potenza totale risiede direttamente nella variazione geometrica del triangolo delle potenze (o del piano complesso delle potenze apparenti S, dove D è la potenza distorcente):

$$\cos\varphi \approx \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Con il decremento di $P \rightarrow 0$ a fronte di $Q \approx \text{costante}$, l'angolo di sfasamento $\varphi = \arctan(Q/P)$ tende a 90° , facendo crollare il $\cos\varphi$ verso valori prossimi allo zero e a transizioni capacitive/induttive estreme, come evidenziato nel grafico.



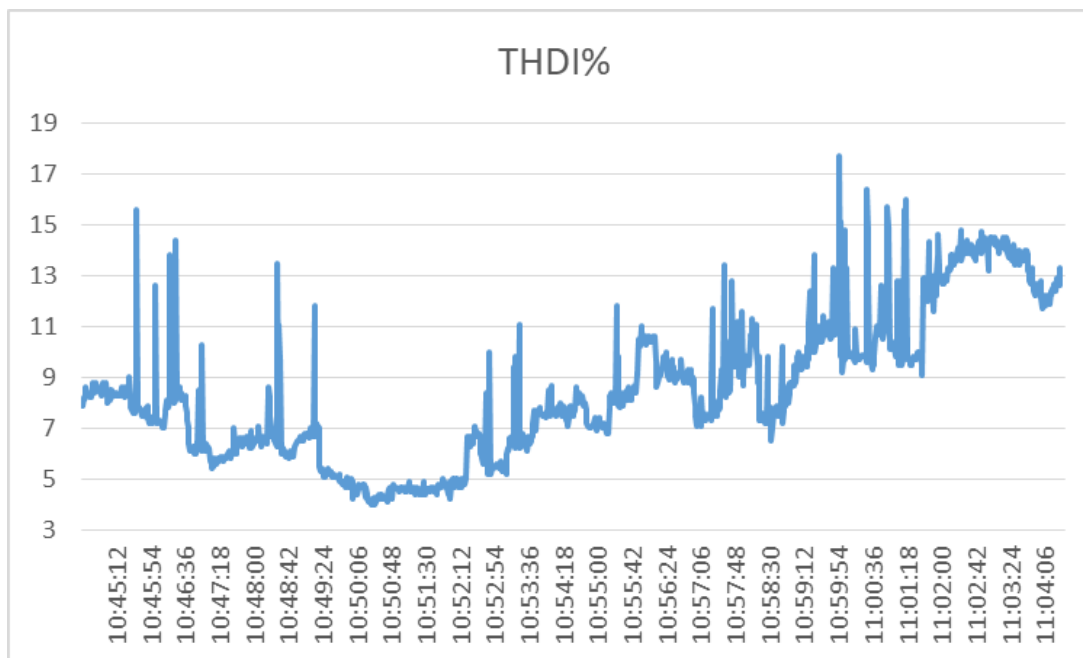
5. Analisi Avanzata della Distorsione Armonica: L'Impennata del THDI%

Il grafico del THDI% mostra un incremento marcato da valori del 4-8% fino a picchi superiori al 17-18% durante il regime di massimo autoconsumo. Questo fenomeno è spiegato rigorosamente dalla formulazione matematica del THD in corrente:

$$THD_I\% = \frac{\sqrt{(\sum I_h^2)}}{I_1} \times 100$$

Dove I_1 è il valore efficace della componente fondamentale di corrente e I_h sono le componenti armoniche di ordine h . L'incremento percentuale del THDI% non è dovuto a un aumento assoluto delle ampiezze armoniche, bensì al forte calo del denominatore (la fondamentale I_1):

- **Crollo della fondamentale al PCC:** L'impianto fotovoltaico alimenta localmente la componente di potenza attiva a frequenza fondamentale richiesta dal carico, riducendo drasticamente la corrente fondamentale I_1 che fluisce attraverso il contatore di scambio con la rete.
- **Invarianza relativa delle armoniche:** I carichi non lineari dell'impianto continuano a iniettare correnti armoniche che si richiudono verso la rete. Poiché I_1 si riduce drasticamente mentre il numeratore rimane pressoché costante o diminuisce in misura minore, il rapporto percentuale subisce una forte amplificazione.



6. Criticità Impiantistiche, Risonanze e Soluzioni di Power Quality

La concomitanza del crollo del $\cos\phi$ e dell'impennata del THDI%, genera severe criticità impiantistiche:

- **Insufficienza dei sistemi di rifasamento convenzionali:** I tradizionali regolatori varmetrici basati sulla lettura di TA a monte rischiano la perdita della misura di riferimento e l'errata commutazione dei gradini capacitivi a causa della distorsione e della bidirezionalità del flusso. I rifasatori possono andare in allarme per una bassa I_1
- **Rischio di risonanza armonica e amplificazione:** La presenza di condensatori di rifasamento in parallelo con l'induttanza di cortocircuito del trasformatore di cabina in presenza di uno spettro armonico elevato (THDI% > 15%) può innescare fenomeni di risonanza parallelo ad alta frequenza, con conseguente amplificazione delle armoniche di corrente e sovraccarico termico dei condensatori.

7. Soluzioni

Nello specifico caso i problemi del cliente sono stati risolti con

Installazione di un nuovo rifasatore serie AAR/6 dotato di induttanze "anti-risonanza", tarate alla frequenza di accordo di 189 Hz corrispondente a un fattore di sbarramento $p=7\%$.

Sostituzione necessaria per la **sicurezza** in quanto il rifasatore esistente, di altro produttore, non era dotato di induttanze e nemmeno di protezione contro sovracorrenti

Installazione di un filtro attivo (AHF) ad alta efficienza (tecnologia SiC mosfet)

Il cliente necessitava di non superare un contenuto di THDi% del 6% su alcune macchine produttive

Riassumiamo le diverse caratteristiche delle soluzioni presenti oggi nel nostro portafoglio prodotti

Soluzione	Tipologia	Protezione risonanza	Rifasamento induttivo	Rifasamento capacitivo	Mitigazione armoniche	Effetto sulla rete	
						Cos ϕ	THDi%
	Rifasatore semplice	✗	✓	✗	✗	✗*	✗
1	Rifasatore Detuned	✓	✓	✗	✗	✓	✗
2	SVG	✓	✓	✓	✗	✓	✗
3	HSVG	✓	✓	✓	✗	✓	✗
4	AHF	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	HAHF	✓	✓	✓	✓	✓	✓
* Inefficienza dovuta all'auto-protezione del rifasatore al persistere di livelli di THDi% oltre la soglia ammessa							

La scelta della soluzione dipende dalla necessità del cliente che possiamo ricapitolare in:

- **Mettere in sicurezza l'impianto e mantenere l'efficienza del rifasamento capacitivo**
Soluzione 1: installare rifasatori della serie AAR/xxx in base al valore del contenuto armonico
- **Mantenere efficiente il rifasamento sia capacitivo sia induttivo (problemi immissione di energia reattiva in rete)**
Soluzione 2 SVG per impianti che necessitano una bassa potenza reattiva
Soluzione 3 HSVG per impianti che necessitano un'alta potenza reattiva e con THDi importanti
- **Evitare malfunzionamenti o stacchi intempestivi degli apparati produttivi rientrando nei limiti delle normative (CEI 0-16, IEEE 519,)**
Soluzione 4 AHF per impianti che necessitano alte correnti di compensazione armonica ma non necessitano di rifasamento del Cos ϕ
Soluzione 5: HAHF per impianti che necessitano correnti di compensazione medio-alte e di rifasamento del Cos ϕ

La scelta tra un apparato attivo "puro" e uno ibrido è sostanzialmente di tipo economico legato alla potenza di rifasamento necessaria ed alla corrente distorta da compensare. Per grandi carichi l'ibrido è più economico