

Gianluca Zanetto  
TW-TeamWare  
www.teamware.it

## "Servizi di rete 'Event-Driven' per smart grid"

### Sommario

Quanto più la generazione distribuita si diffonde sulle reti di distribuzione, tanto più si impone la necessità di strategie innovative di controllo della rete. Questa presentazione descrive come i servizi di rete elettrica (es. l'incremento della capacità di trasporto, il controllo del livello di tensione, la compensazione delle armoniche, etc...) possono essere realizzati tramite un sistema basato su dispositivi attivi installati lungo la rete BT ed un'unità di controllo posta in cabina MT/BT, attraverso una combinazione di anelli di regolazione locali e trigger 'event-driven', allo scopo di minimizzare il traffico dati sui canali di comunicazione (PLC o wireless). Viene fornita una breve presentazione di un dispositivo di compensazione senza condensatori, unitamente a quella di un contatore di energia elettrica in grado di operare in modalità 'event-driven'. Infine viene dato uno sguardo verso future strategie di controllo della rete più complesse basate su approccio 'event-driven' (es. demand/response, energy shifting).

### Introduzione

Le smart grid costituiscono l'evoluzione delle attuali reti di distribuzione elettrica relativamente all'espansione nell'utilizzo delle fonti d'energia rinnovabile, alla crescente domanda di fornitura di energia di qualità in termini di stabilità e continuità ed all'evoluzione nelle tecnologie informative. Esse sono un'efficiente soluzione dal punto di vista energetico e soprattutto dal punto di vista economico.

In estrema sintesi, la specificità della smart grid può essere ricondotta ai seguenti elementi caratteristici:

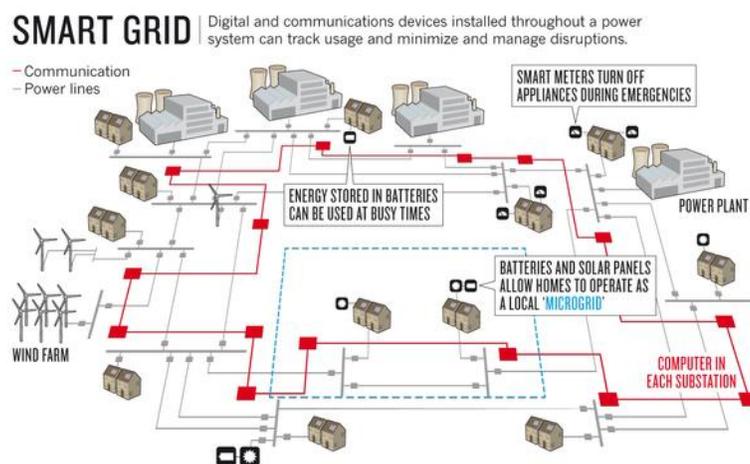


Fig. 1 -La smart grid

- **I flussi di energia sono bidirezionali e "volatili"**, per la natura intermittente della generazione da fonte rinnovabile distribuita e la presenza dei sistemi di accumulo. Le principali fonti di produzione di energia rinnovabile sono di tipo eolico e solare (fotovoltaico e termico). La variabilità e incostanza nella produzione eolica è causata oltre che dai fattori meteorologici anche dalla

distribuzione geografica degli impianti. Quest'ultima risulta essere non uniforme in quanto le fonti eoliche su larga scala sono tipicamente distribuite a grande distanza dai carichi (su alture, offshore, etc...) comportando limitazioni trasmissive di tipo termico, voltaico ed anche problemi di instabilità. A maggior ragione l'energia solare, pur presentandosi come la più abbondante fonte di energia rinnovabile, è intrinsecamente variabile per la natura stessa della radiazione solare (alternanza giorno-notte e perturbazioni meteo), determinando un fattore di disponibilità medio equivalente ("global final yield") dell'ordine di ca. 4 ore/giorno, incrementabile solo utilizzando mezzi di stoccaggio. Come nel campo eolico, anche il campo solare presenta problemi di limitazione trasmissiva a causa della lontananza delle fonti dai carichi.

- **I dispositivi di rete (IED) sono "intelligenti"** e scambiano informazioni reciprocamente per il controllo e l'ottimizzazione della rete. Ciò rende possibile introdurre nuove funzionalità o estendere le possibilità di gestione della rete elettrica trasportando attraverso la sua attuale infrastruttura flussi informativi necessari per specifici compiti, rendendo i nodi della rete dei nodi attivi.
- **Le strategie di controllo diventano più complesse** rispetto al passato essendo necessaria una flessibilità ed una capacità d'adattamento a fattori di variabilità che le attuali reti elettriche non sono in grado di ottenere e coinvolgono molteplici soggetti sia di natura meramente tecnica che commerciale (DSO, utenti, "prosumers", broker, aggregatori, etc...).

La presente memoria descrive una ricerca applicata, con utilizzo dello stato dell'arte nell'ambito delle tecnologie dell'elettronica di potenza e delle soluzioni software, mirata alla realizzazione nel contesto della smart grid di un sistema basato su un dispositivo intelligente ("smart-power device") finalizzato all'implementazione di servizi di rete per l'incremento dell'efficienza sulle reti di bassa tensione.

## La rete di bassa tensione

Nelle reti di distribuzione elettrica, la rete di bassa tensione (in Italia a 230-400 V in corrente alternata) definisce la porzione di rete che dalla cabina secondaria (dove risiede il trasformatore MT/BT) alimenta la maggior parte degli impianti elettrici domestici e quelli commerciali e industriali per potenze limitate a qualche decine di kW (di norma < 100 kW).

I dati caratteristici delle reti di bassa tensione in Italia (anno 2013) sono i seguenti:

- Lunghezza dei conduttori di linea: ca. 250-500 mt
- Cosfi medio:  $\approx 0.89$  per utenze > 16.5 kW  
 $\approx 0.92$  per utenze  $\leq 16.5$  kW
- Taglia trasformatore MT/BT: da 100 a 400 kVA

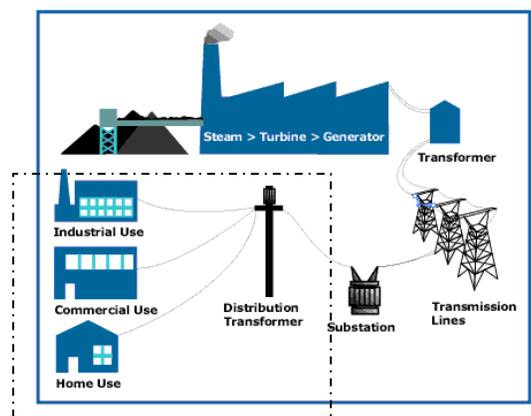


Fig. 2 -Rete BT

La tabella seguente dà un'indicazione della consistenza delle reti BT in Italia (anno 2013) con ripartizione delle cabine secondarie per gruppi utenza e relativi consumi annuali di energia elettrica:

Gruppi Utenza	di Trasformatori MV/LV	Consumi medi energia attiva [MWh]
25<n<100	105.722,00	1.797.947
100<n<200	62.876,00	2.052.207
200<n<300	33.991,00	1.673.426
300<n<400	16.417,00	1.057.826
>400	12.274,00	1.033.249

Tab. 1 - Rete BT Italia 2013

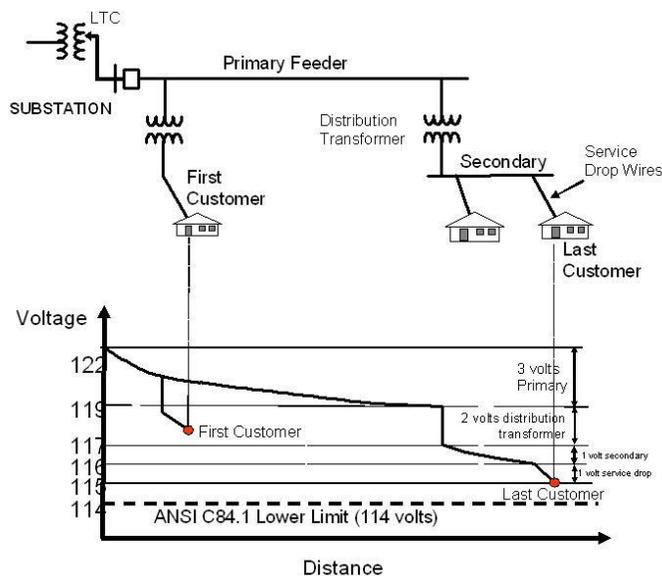
Nello scenario della smart grid attuale, la rete di distribuzione secondaria di bassa tensione è quella caratterizzata da un minor livello di automazione e di presenza di dispositivi intelligenti, rispetto alle reti di media ed alta tensione, le quali sono state oggetto primario nel corso degli ultimi di anni di investimenti nell'ambito delle infrastrutture per il telecontrollo e l'automazione al fine di migliorare la qualità e la continuità del servizio elettrico fornito.

Nel prossimi anni ci si aspetta un consistente incremento degli investimenti da parte dei distributori sulle reti BT per il miglioramento della qualità del servizio, del livello di automazione e della interconnettività dei dispositivi intelligenti allacciati alla rete (meter, colonnine di ricarica, inverter FV, dispositivi di accumulo, etc...).

## Servizi per incrementare l'efficienza della rete di bassa tensione

L'analisi delle condizioni di carico e di esercizio delle reti BT evidenzia la possibilità di introdurre servizi di rete per il miglioramento della qualità del servizio e dell'efficienza delle reti. La presente ricerca ha considerato i seguenti fattori di ottimizzazione:

1. **Compensazione del livello di tensione.** Le norme di riferimento per la qualità della tensione (EN 50160) richiedono di mantenere il livello di tensione nel punto di consegna entro una fascia di tolleranza nelle varie condizioni di carico: in Europa la totalità dei valori medi del livello di tensione su 10 minuti deve mantenersi entro l'intervallo  $-15\% \div + 10\%$  del valore nominale, mentre il 95% di tali valori deve mantenersi nell'intervallo  $\pm 10\%$  del valore nominale. La regolazione tradizionale del livello di tensione realizzata a livello di feeder MT ("load tap changers"), al fine di assicurare un livello di tensione entro i livelli normativi su tutta la linea, mantiene un livello di tensione in partenza sufficientemente alto per compensare l'inevitabile caduta di tensione lungo la linea (fig. 3).

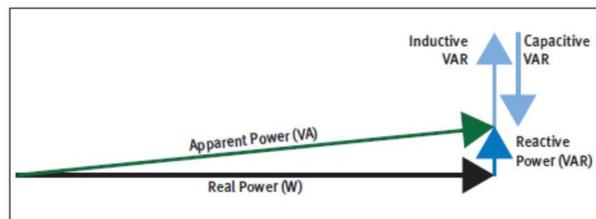


**Fig. 3 - Profilo di tensione lungo la linea**

Tale regolazione opera "ad anello aperto" indipendentemente dalla configurazione reale di prelievo dei carichi lungo la linea, poiché l'informazione puntuale dei singoli carichi prelievi (valore e posizione lungo-linea) non è disponibile a livello del regolatore, ma soprattutto può essere inadeguata in presenza di generazione distribuita con immissione di energia dai punti periferici della rete, tali da modificare, fino alla completa inversione, il profilo di tensione lungo la linea.

L'adozione di un sistema di controllori Volt/VAR distribuiti lungo la linea coordinati da algoritmi di ottimizzazione centrale, può consentire di stabilizzare istantaneamente il livello di tensione lungo la linea entro la banda di normalità senza "forzare" i livelli di tensione di partenza. Studi specifici (es. [1]) mostrano che un controllo accurato del livello di tensione può avere positivi effetti in termini di risparmio energetico (riduzione della domanda di un fattore 0.7-1.0% per ogni 1% di riduzione del livello di tensione), nonché di qualità del servizio.

- Aumento della capacità di trasporto.** Regolando i flussi di potenza reattiva sulla rete di bassa tensione si ottiene un utilizzo ottimale delle reti di distribuzione, con riduzione delle perdite per effetto Joule. Dispositivi compensatori intelligenti attivi possono fare una correzione in tempo reale (< 10-12 cicli) della componente reattiva sui 4 quadranti, sia per carichi induttivi che per carichi stabilmente capacitivi (es. PSU di data center).



**Fig. 4 - Compensazione potenza reattiva**

I benefici derivanti da un controllo puntuale della potenza reattiva sono una riduzione delle perdite per effetto Joule (l'incremento del PF da 0.89 a .092 determina una riduzione delle perdite del 12%) e conseguente riduzione delle cadute di tensione lungo la linea,

La tabella seguente (basata su una stima di perdite di rete pari al 7%) evidenzia i risparmi annui per kVAr compensati a cosfi 0.95, per cluster di utenza di cabina secondaria:

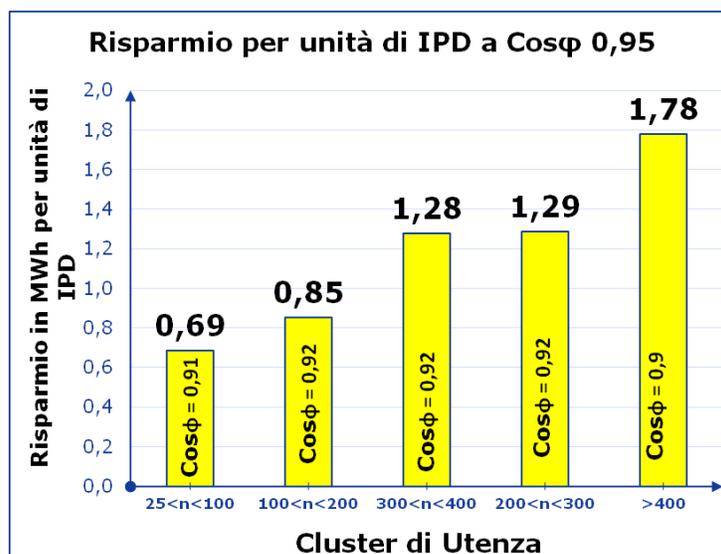


Fig. 5 - Stima risparmi per unità di kVAR compensati a cosfi 0.95

Si noti che il beneficio in termini di riduzione delle perdite può essere ulteriormente ed economicamente valorizzato in termini di titoli di efficienza energetica ("certificati bianchi").

3. **Aumento dell'efficienza del trasformatore MT/BT.** La corrente di magnetizzazione (induttiva) di un trasformatore MT/BT può diventare prevalente a basso carico, con eccesso di potenza reattiva e basso PF. Un compensatore attivo potrebbe dinamicamente compensare il trasformatore di cabina, massimizzando la curva di efficienza.
4. **Disponibilità di misure di rete in tempo reale.** La disponibilità di un ampio set di misure in tempo reale (livello di tensione, flussi di potenza attiva e reattiva, etc...) lungo la linea aumenta l'osservabilità della rete e delle sue dinamiche per funzioni di controllo e regolazione, oltre a fornire elementi di profilazione dei carichi e di supporto decisionale per la formulazione di politiche di efficienza (es. demand/response). Come beneficio addizionale la possibilità di disporre di misure in tempo reale consente di effettuare i bilanci di energia lungo la linea rendendo possibile l'identificazione delle perdite "non-tecniche" (es. furti di energia).

## Vincoli di sistema

Per garantire un livello di applicabilità reale e non solo dal punto di vista meramente teorico, l'introduzione di dispositivi attivi per il miglioramento dell'efficienza della rete BT deve rispettare alcuni vincoli essenziali:

- Rendimento molto elevato (prossimo al 99 %), per limitare al massimo l'autoconsumo massimizzando l'efficacia dei servizi in rete.
- Connessione agevole alla rete BT, senza interruzione del servizio, con minimo impatto sull'infrastruttura esistente e con tempi di installazione contenuti.
- Non interferenza con i data-link PLC (tipicamente Cenelec-A band) utilizzati dai sistemi proprietari di telelettura e AMR delle utilities.

- Fattore di forma contenuto per consentire l'alloggiamento nelle cassette stradali di derivazione
- Alta affidabilità (vita attesa > 10 anni)
- Adeguato rapporto prezzo/beneficio (break-even < 4 anni)

## La soluzione D-VVO (Distributed Volt/VAR Optimization)

La soluzione proposta (fig. 6) consiste in un sistema a tre livelli consistente in:

- Livello 1: Dispositivi statici di regolazione "intelligenti" (IPD) di piccola potenza, connessi alla rete BT lungolinea nelle cassette stradali o presso il punto di consegna all'utenza, che scambiano energia reattiva in maniera controllata.
- Livello 2: Unità di controllo (ITC) installata nella cabina secondaria, che elabora gli algoritmi di controllo coordinato di tensione e potenza reattiva per gli IPD.
- Livello 3: Componenti software middleware per interfaccia vs. sistemi centrali SCADA.

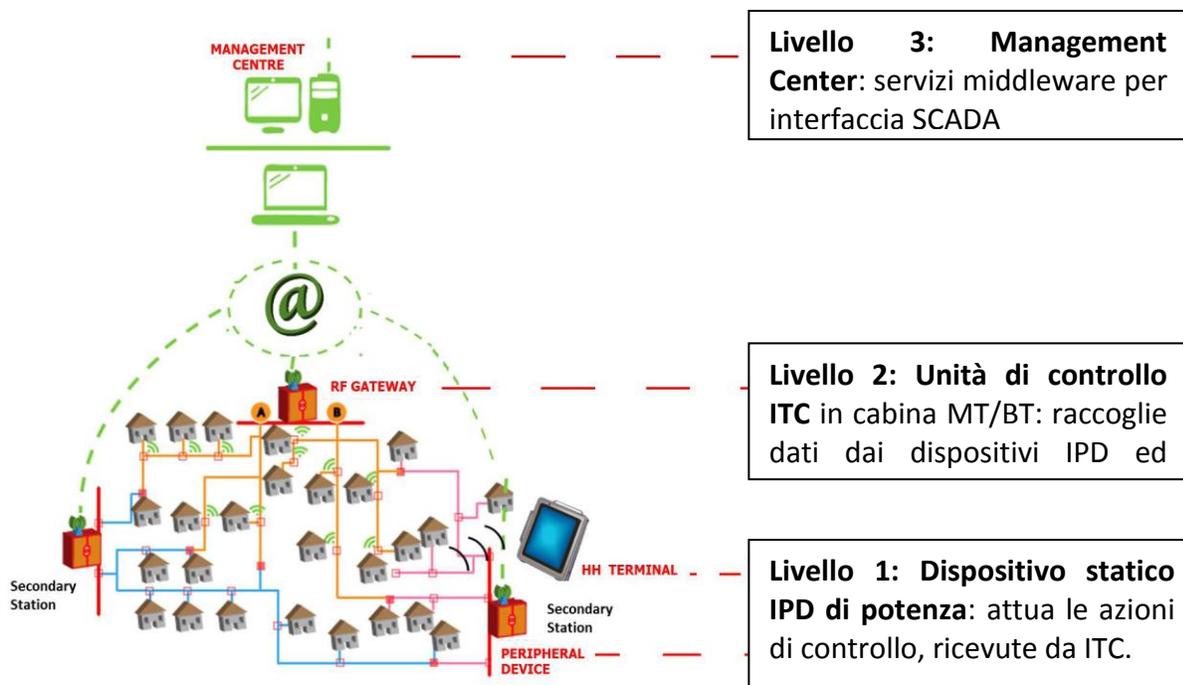


Fig. 6 - Sistema D-VVO

Il dispositivo statico di regolazione IPD connesso in parallelo alla rete BT implementa un regolatore trifase D-VVO (Distributed Volt-VAR / Optimization) attraverso elettronica di potenza senza commutazione di capacità e senza trasformatori di accoppiamento, compensando istantaneamente sia in quadranti capacitivi che induttivi la potenza reattiva. I dataset di misura delle grandezze elettriche prodotti dal dispositivo sono resi disponibili per la pubblicazione agli altri apparati del sistema.

Le caratteristiche principali del dispositivo IPD sono le seguenti:

- Taglia da 3 a 30 kVA trifase
- Tecnologia inverter a IGBT 3-level NPC grid connected
- Comunicazione con Unità di Controllo tramite: ethernet, G3-PLC, mobile 3G
- Protocolli standard: Modbus, Oasis MQTT, IEC61850 (solo su link ethernet)
- Pubblicazione misure event-driven di: V, I, P, Q, THD, Frequenza, Energia

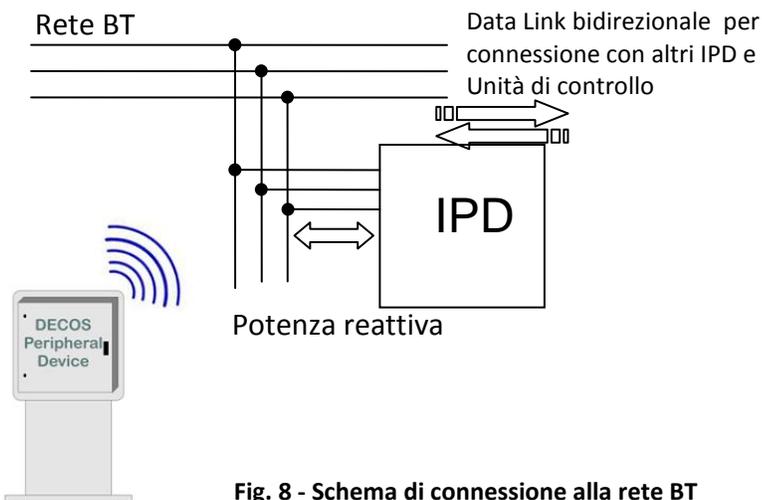
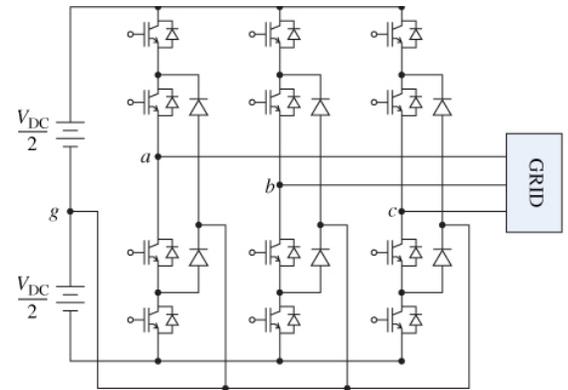


Fig. 8 - Schema di connessione alla rete BT

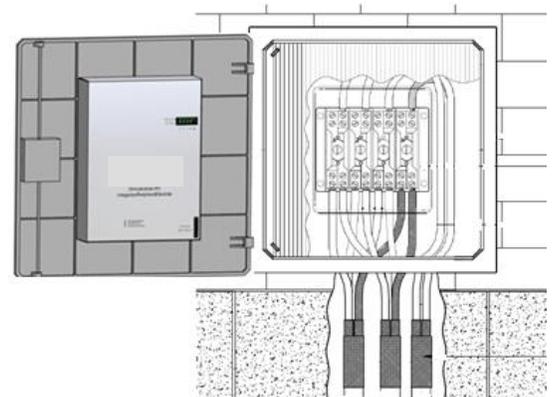


Fig. 7 - Installazione in cassetta stradale

L'architettura "full static" dell'IPD consente tempi di risposta del sistema a livello di singolo ciclo, consentendo di realizzare diverse strategie di efficienza:

1. A priorità di fattore di potenza: compensazione istantanea del fattore di potenza al riferimento impostato dall'unità di controllo. In tale modalità il dispositivo IPD può operare anche autonomamente ("stand-alone") utilizzando una configurazione statica preventivamente impostata.
2. A priorità di livello di tensione: la regolazione del flusso di potenza reattiva è utilizzata per regolare il livello di tensione nell'intervallo contrattualmente valido. In tale modalità il dispositivo

IPD può operare anche autonomamente ("stand-alone") utilizzando una configurazione statica preventivamente impostata.

- Ottimizzazione cooperativa: i dispositivi IPD operano in maniera coordinata dal controllore ITC in cabina secondaria per realizzare un livello di ottimizzazione globale (cosfi e livello di tensione) a livello di tutta la tratta BT, sulla base delle serie di dati di misura forniti da tutti i dispositivi connessi in rete.

L'utilizzo di transceiver G3-PLC operanti nella gamma di frequenze 150-500 kHz (FCC-2 nello standard ITU-T G.9901) consente ai dispositivi IPD di comunicare in tecnologia power-line-carrier con l'unità di controllo ITC e tra loro senza interferire con gli esistenti sistemi di telelettura dei contatori tariffari implementati dai distributori operanti in banda A Cenelec. Tale tecnologia supporta in modalità native la cifratura del traffico dati, per garantire un elevato grado di cyber-security alla smart grid.

L'unità di controllo ITC è installata presso la Cabina Secondaria MT/BT ed utilizza le misure real time fornite dalle unità di regolazione IPD o da meter real time per calcolare le condizioni che esistono nei punti osservabili sulla rete elettrica, valutare le perdite elettriche ed altri parametri che non è pratico monitorare direttamente.

I valori elaborati determinano il corretto insieme di azioni di controllo per ottenere le condizioni "ottime" richieste (ottimizzazione Volt/VAR, etc...). Queste azioni di controllo sono reinviata ai compensatori attivi come nuovi set-point. Per ottimizzare il flusso di informazioni anche su canali a banda stretta (es. G3-PLC) lo scambio di informazioni tra unità ITC e regolatori IPD utilizza tecniche comunicazione asincrona ad eventi secondo pattern "publish/subscribe" in analogia al modello IoT (Internet of Things) (es. MQTT).

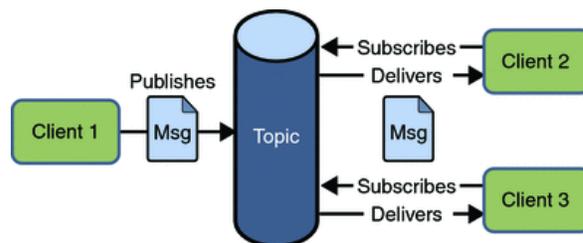


Fig. 9 - Modello di scambio informazioni Publish/Subscribe

Sono disponibili interfacce software e API rest per l'integrazione verso sistemi centrali SCADA, la realizzazione di funzioni di data reports, archiviazione e servizi di ottimizzazione e l'integrazione con framework ed ecosistemi open di energy data management (e.g. Flex4Grid, EU Future-Internet FIWARE [www.fiware.org](http://www.fiware.org)).

Laddove è disponibile una connessione di rete cablata è possibile l'integrazione dei dispositivi ITC nell'automazione di cabina tramite protocollo IEC61850 (MMXU logical nodes).

### Applicazione dei principi core di Event-Based Metering

Il paradigma "event-driven" viene pienamente applicato nei dispositivi IPD/ITC non solo nell'ambito dei protocolli di "messaging" tra i dispositivi del sistema, ma è anche alla base dei principi di metering, in maniera analoga a quanto realizzato negli smart-meter real-time di nuova generazione per le smart-grid: le variazioni dei flussi

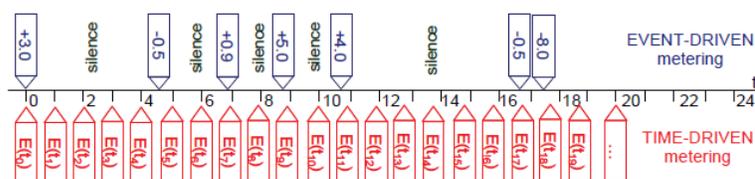


Fig. 10 - Tecnica di misura ad eventi

di potenza/misure da condizioni stabili ("eventi") producono un invio asincrono dei dati ai sottoscrittori (unità di controllo centrale e/o altri IPD) (cfr. [3]).

In confronto con i tradizionali pacchetti dati periodici ("time-driven") inviati da RTU/contatori, i data set "event-driven" contengono informazione di valore equivalente ma con un ridotto traffico dati, molto utile per applicazioni di misura real-time su canali con banda limitata (es. G3-PLC su rete elettrica).

La figura 11 evidenzia come sia possibile con la metodologia di misura ad eventi ricostruire con maggiore dettaglio un profilo di carico rispetto ad un tradizionale misuratore con dati periodici a tempo fisso, con un contenuto numero di campioni di misura:

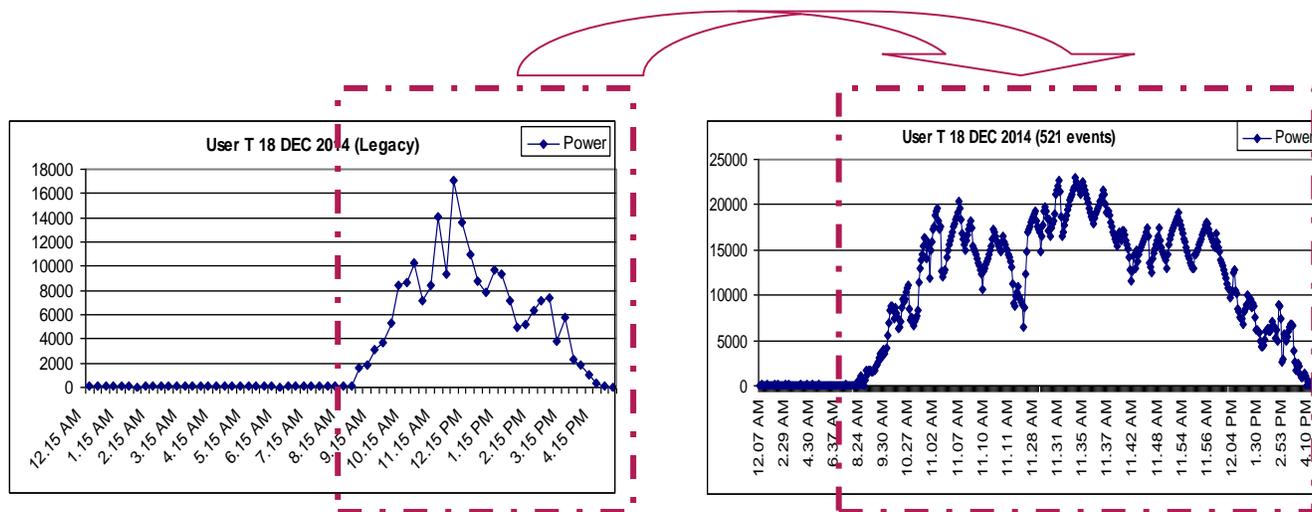


Fig. 11 - Confronto ricostruzione profilo di carico tra modalità "time-driven" e "event-driven"

La disponibilità di set di misura real time

## Primi risultati

Il sistema D-VVO descritto è stato sperimentato presso due utilities con la finalità di verificare la funzionalità e l'efficienza degli stadi di potenza, la validità degli algoritmi di controllo e l'affidabilità delle comunicazioni G3-PLC senza interferenza con i sistemi AMR delle utilities. I risultati ottenuti dopo ca. 24000 ore cumulate di funzionamento hanno confermato la validità delle soluzioni sviluppate, con elevata affidabilità e costanza di funzionamento in contesti applicativi reali. Gli sviluppi ulteriori sono ora finalizzati all'integrazione delle nuove tecnologie SiC e GaN dei semiconduttori di potenza, per ulteriore incremento dell'efficienza di conversione (prossima al 99%) ed alla definizione delle taglie ottimali dei dispositivi per ottimizzare il rapporto costi/benefici e le soluzioni installative.

Parallelamente viene studiata la possibilità di estendere le potenzialità dei dispositivi smart-power distribuiti "IPD-like" combinate con tecnologie di misura event-driven real-time per offrire soluzioni ancor più integrate. Tra le soluzioni di maggior interesse verso le quali la ricerca si sta orientando si individuano servizi innovativi di demand/response di tipo "energy-shifting", integrando tra loro gli attuali dispositivi intelligenti connessi alla rete (es. inverter FV, punti di ricarica EV) con sistemi

compatti di accumulo di piccolo ingombro (e costo) cooperativi & distribuiti (la rete come un' "auto ibrida") e servizi di demand/response "Multi-energy-shifting" (elettrica & termica), combinando tecnologie elettriche e non-elettriche (pompe di calore, CHP, accumulo termico) all'interno di un'unica piattaforma ICT.

## Conclusioni

- I servizi di rete BT stanno diventando sempre più pervasivi nello scenario delle smart grid.
- La presente ricerca applicata dimostra come le recenti innovazioni nelle tecnologie elettroniche (digitale e power), delle telecomunicazioni e del software possono essere impiegate per rispondere prontamente alle necessità di soluzioni di efficienza energetica sulle reti.
- In tale contesto, le Autorità Regolatorie sono incoraggiate ad incentivare la diffusione di sistemi di ottimizzazione ed efficientamento delle reti di distribuzione BT.
- Gli standard open giocheranno un ruolo chiave nel guidare la diffusione di soluzioni interoperabili.
- La ricerca sarà principalmente orientata all'incremento dell'efficienza nella conversione di energia (power-electronics), nell'affinamento degli algoritmi di controllo event-based e nell'integrazione di sistemi di campo nelle architetture ICT e middleware future internet.

## Riferimenti

- [1] NEMA - "Volt/VAR Optimization Improves Grid Efficiency", 2014
- [2] M. Simonov, H. Li and G. Chicco, "Gathering Process Data in Low Voltage Systems by Enhanced Event-Driven Metering", IEEE Systems Journal, 2015 in press.
- [3] Mikahil Simonov, G. Zanetto - "Event-based hybrid metering feeding AMI and SCADA", EBCCSP 2015
- [4] H. Li, S. Gong, L. Lai, Z. Han, R.C. Qiu and D. Yang, "Efficient and Secure Wireless Communications for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3 (3), pp. 1540–1551, Sept. 2012.
- [5] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications", Springer, 2008.
- [6] Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico, "Delibera 02 maggio 2013 180/2013/R/eel", 2013