

Demand-Side Management in a Smart Micro-Grid: A Distributed Approach Based on Bayesian Game Theory



Matteo Sola e Giorgio M. Vitetta
Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia



ASSESSORATO SCUOLA, FORMAZIONE PROFESSIONALE, UNIVERSITÀ E RICERCA, LAVORO.

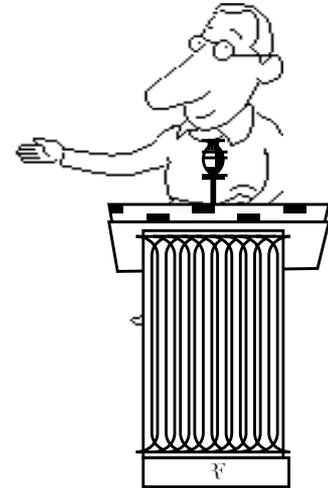


Unione europea
Fondo sociale europeo
Investiamo nel vostro futuro



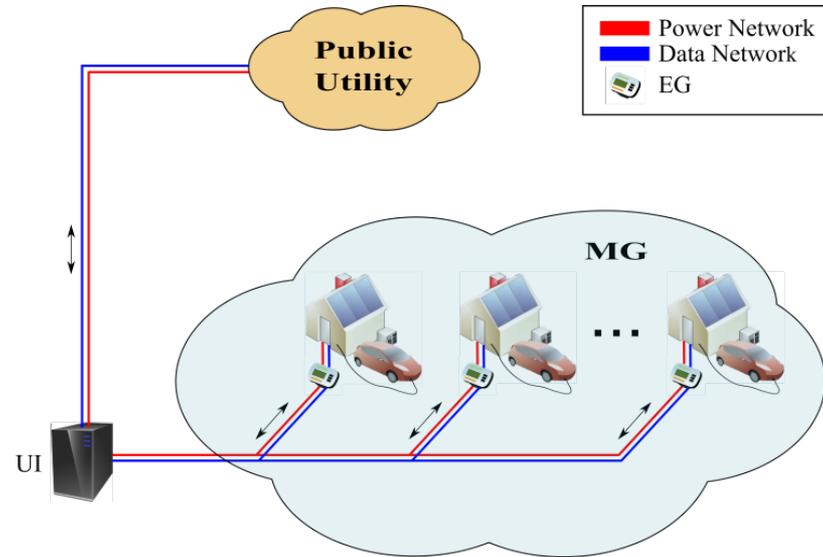
Sommario della presentazione

- Modello della micro-grid
- Gestione dell'energia in una smart micro-grid
- Risultati numerici
- Conclusioni



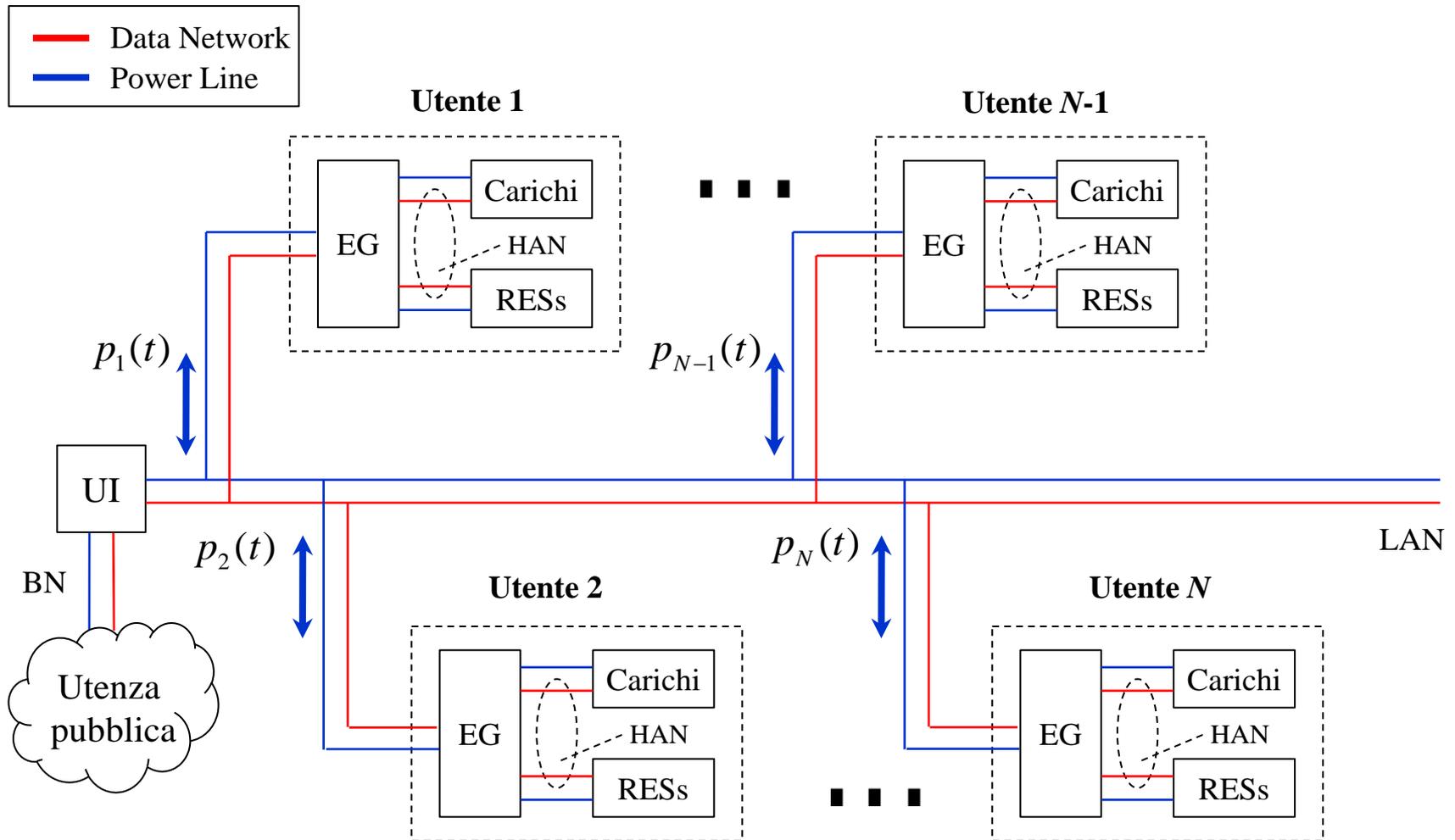
Modello della micro-grid

Smart *micro-grid* (MG)
a bassa tensione,
composta da N utenti.



- Ogni utente dispone di:
 - a) una unità di gestione dell'energia e dei dati (*energy gateway*, EG);
 - b) risorse di energia rinnovabile (*renewable energy sources*, RES).
- La MG si interfaccia con il resto della rete mediante una *utility interface* (UI). Essa supervisiona il comportamento della comunità degli utenti e scambia utili informazioni con gli EG.

Modello della micro-grid



Modello della micro-grid

- Nel modello della MG si assume inoltre che:
 - a) l'energia rinnovabile prodotta da ciascun utente sia utilizzata come prima risorsa di energia dall'utente stesso;
 - b) ogni utente possieda *carichi non ritardabili* e *carichi ritardabili* (SL), ad esempio *veicoli elettrici* (EV);
 - c) valgano i seguenti **vincoli** per lo scambio di energia dell' n -esimo utente (con $n = 1, 2, \dots, N$):

$$P_{g,\max}^{(n)} < p_n(t) < P_{a,\max}^{(n)}$$

massima potenza generata (<0) massima potenza assorbita (>0)

Modello della micro-grid

- L'UI monitora la **potenza totale**

$$p_T(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t)$$

scambiata da tutti gli utenti con l'unità centrale.

- I seguenti vincoli valgono ad ogni istante di tempo t :

$$S_r < p_T(t) < S_{bo}$$

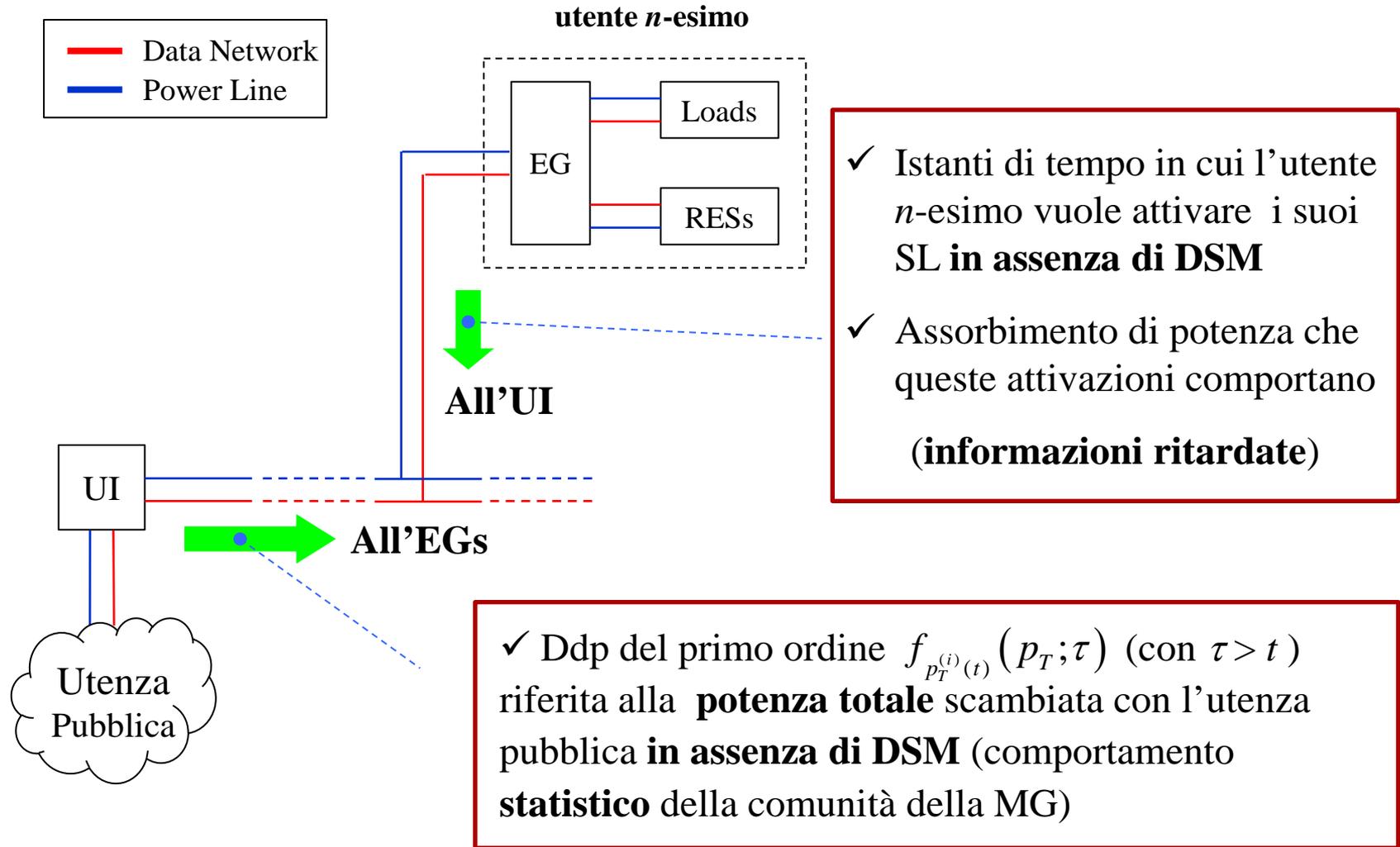
massima potenza (prodotta da RES)
che può essere **generata** (<0)

massima potenza che può
essere **assorbita** (>0)

Demand-Side Management - Introduzione

- Nel nostro lavoro è stata sviluppata una nuova strategia di gestione dell'energia (*demand side management*, DSM), basata sui metodi della teoria dei giochi che mira a **coordinare domanda e offerta di energia**. Tale risultato è raggiunto mediante una appropriata **programmazione di carichi ritardabili**.
- Generalmente, **la disponibilità di certe informazioni note a tutti gli utenti** (consumo energetico giornaliero) è **fondamentale per coordinare le loro azioni**. Ciò pone il problema di **proteggere la privacy degli utenti**.

Demand-Side Management – Informazioni note



Demand-Side Management – Data Processing

- La potenza $p_n(t)$ che si riferisce all'utente n -esimo può essere espressa come:

$$p_n(t) = p_n^{(r)}(t) + p_n^{(s)}(t)$$

parte **random** (carichi non ritardabili + RES)

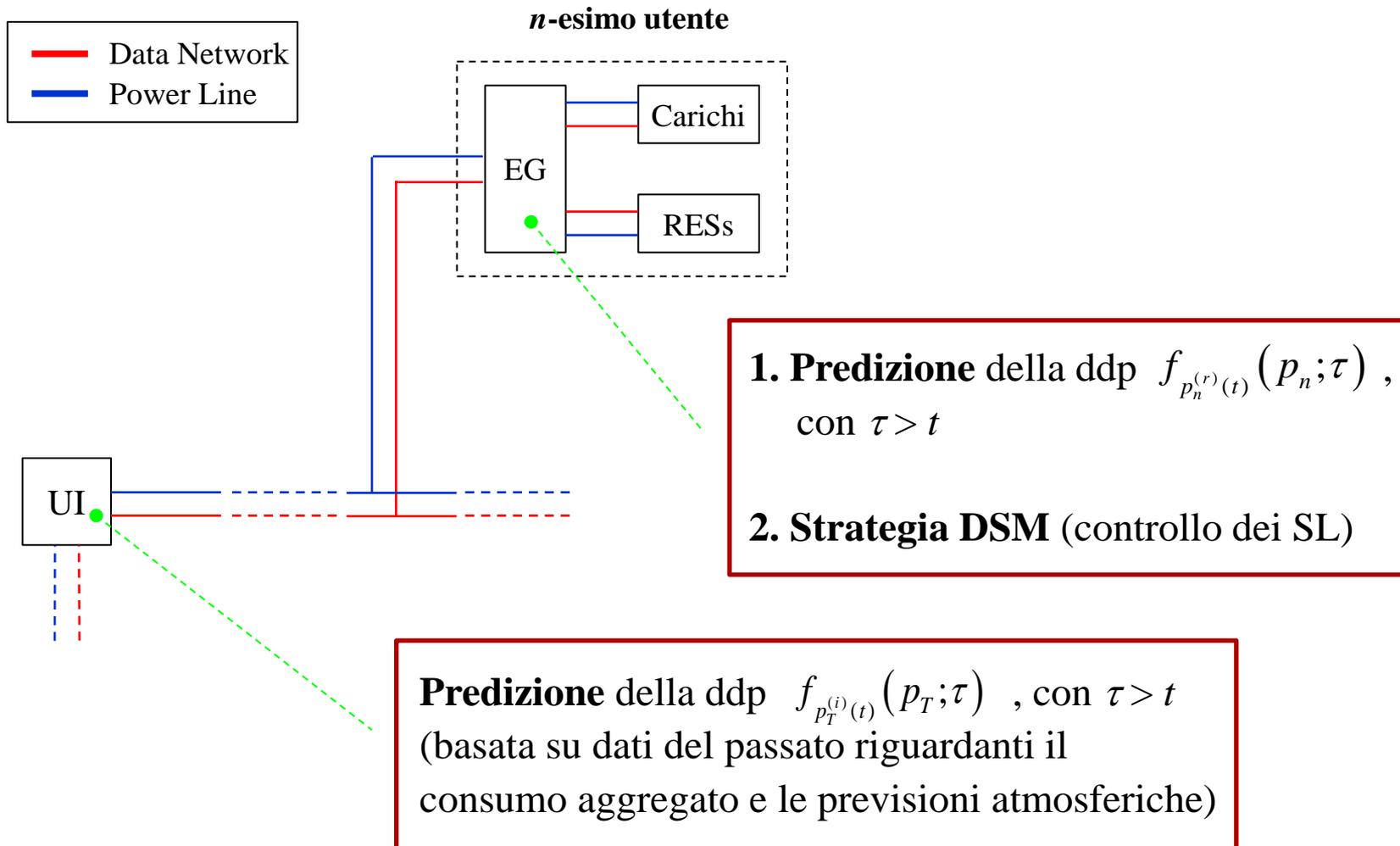
parte **deterministica** (carichi ritardabili)

La ddp del primo ordine

$$f_{p_n^{(r)}(t)}(p_n; \tau)$$

è nota all' n -esimo EG.

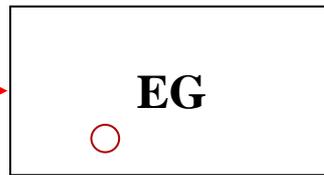
Demand-Side Management – Data Processing



Demand-Side Management - Algoritmo

n -esimo utente

l -esimo SL



ON/OFF



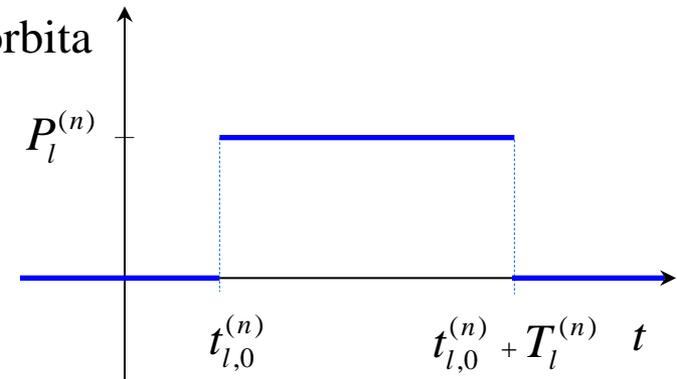
Potenza



Richiesta di attivazione

$$t = t_{l,0}^{(n)}$$

Potenza assorbita



Demand-Side Management - Algoritmo

- L'EG dell'utente n -esimo (con $n = 1, 2, \dots, N$) è rappresentato come un **giocatore razionale ed egoista (giocatore #1)** che gioca contro la comunità degli altri $(N-1)$ utenti.
- Tale comunità è rappresentata come un *avversario fittizio (giocatore #2)*; in breve, si utilizza un **modello a due giocatori**.

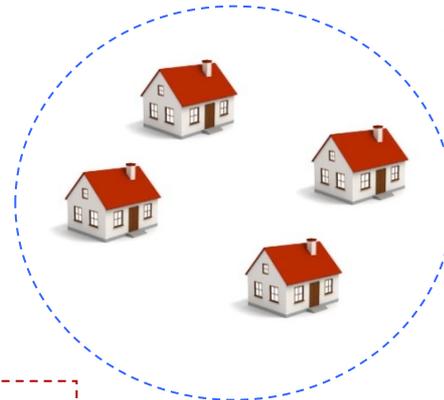
Giocatore #1



$p_n(t)$

$$p_T(t) = p_n(t) + p_{-n}(t)$$

Giocatore #2



$$p_{-n}(t) = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq n}}^N p_l(t)$$

Demand-Side Management - Algoritmo

Possibili azioni del giocatore #1

Payoff

1. Attivare il SL (**ON**)

payoff = EP_n

2. Non attivare il SL (**OFF**)

payoff = 0

Demand-Side Management - Algoritmo

- Il calcolo della quantità EP_n richiede l'introduzione di un **modello di costo** (lo scambio di energia dell'utente n -esimo con la MG prevede un costo o un profitto di una certa quantità di *moneta virtuale*). **Ogni scambio di energia del giocatore #1 con la MG modifica l'ammontare della sua quantità di moneta virtuale.**
- Si definisce pertanto una specifica **funzione costo**

$$C(p_n / p_{-n})$$

per una data potenza $p_{-n}(t)$, che rappresenta il **costo (se negativo)** o il profitto **(se positivo)** in mu/s associato al flusso di potenza $p_n(t)$.

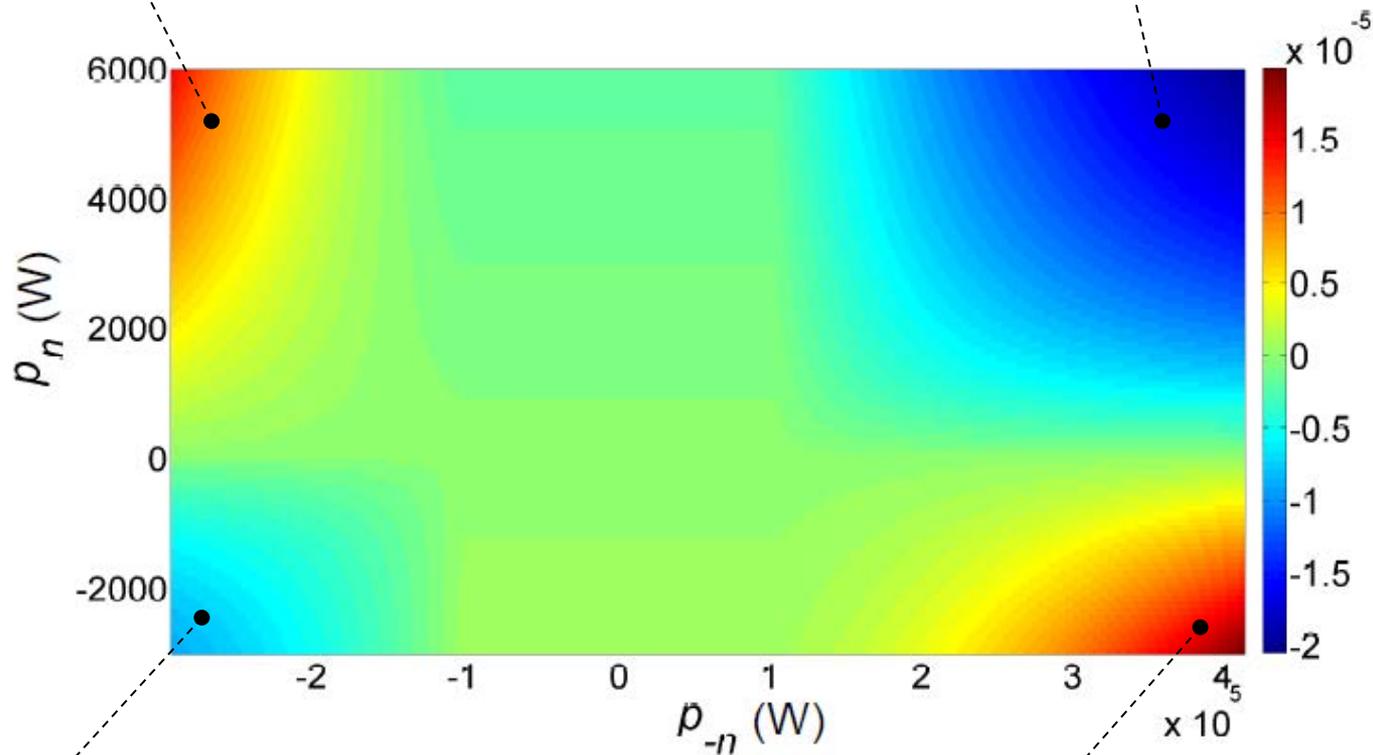
Demand-Side Management - Algoritmo

$$C(p_n / p_{-n}) = \left\{ \begin{array}{l} \text{costo associato alla potenza} \\ \text{assorbita dal giocatore \#1} \\ \\ + \\ \\ \text{profitto derivante dalla potenza} \\ \text{fornita dal giocatore \#1 alla MG} \\ \\ + \\ \\ \text{termine di imparzialità relativo allo} \\ \text{scambio istantaneo di energia del} \\ \text{giocatore \#1 con il giocatore \#2} \end{array} \right.$$

Demand-Side Management - Algoritmo

Profitto per il giocatore #1

Costo per il giocatore #1



Costo per il giocatore #1

Profitto per il giocatore #1

Demand-Side Management - Algoritmo

- Il **costo totale atteso** per il **giocatore # 1** nell'intervallo $\left[t_{l,0}^{(n)}, t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right]$ può essere espresso da:

$$EC_n \left(p_n^{(s)}; t_{l,0}^{(n)}, t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right) = \int_{\tau=t_{l,0}^{(n)}}^{t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)}} E_{p_{-n}^{(t)}, p_n^{(r)}} \left\{ C(x_1 / x_2) \middle| p_n^{(s)}(\tau) \right\} d\tau$$

cosicché il **payoff atteso** per l'azione **ON** è dato da:

$$EP_n \left(p_n^{(s)}; t_{l,0}^{(n)}, t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right) = EC_n \left(p_n^{(s)+}; t_{l,0}^{(n)}, t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right) - EC_n \left(p_n^{(s)-}; t_{l,0}^{(n)}, t_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right)$$

$$p_n^{(s)} = p_n^{(s)+}$$

se **ON** a $t = t_{l,0}^{(n)}$

$$p_n^{(s)} = p_n^{(s)-}$$

se **OFF** a $t = t_{l,0}^{(n)}$

Demand-Side Management - Algoritmo

- **Strategia ottima**

$$\hat{t}_{l,0}^{(n)} = \arg \max_{\tilde{t}_{l,0}^{(n)}} EP_n \left(p_n^{(s)}; \tilde{t}_{l,0}^{(n)}, \tilde{t}_{l,0}^{(n)} + T_l^{(n)} \right) \leftarrow$$

Istante di attivazione ottimo
del carico ritardabile l -esimo
dell'utente n -esimo

Abbiamo deciso di **non** adottare questa strategia per i seguenti motivi:

- ✓ Gli aggiornamenti della stima delle ddp $f_{p_T^{(i)}(t)}(p_T; \tau)$ e $f_{p_n^{(r)}(t)}(p_n; \tau)$ sono disponibili periodicamente. Per questa ragione, il payoff può assumere diversi valori se calcolato in istanti di tempo diversi ed è necessario calcolarlo ogni volta che le ddp sono aggiornate.
- ✓ L'utente n -esimo può essere interessato ad attivazioni **multiple** di diversi SL nello stesso intervallo di tempo; questa possibilità deve essere gestita in maniera efficiente.

Queste considerazioni ci hanno portato a proporre una **strategia mista**

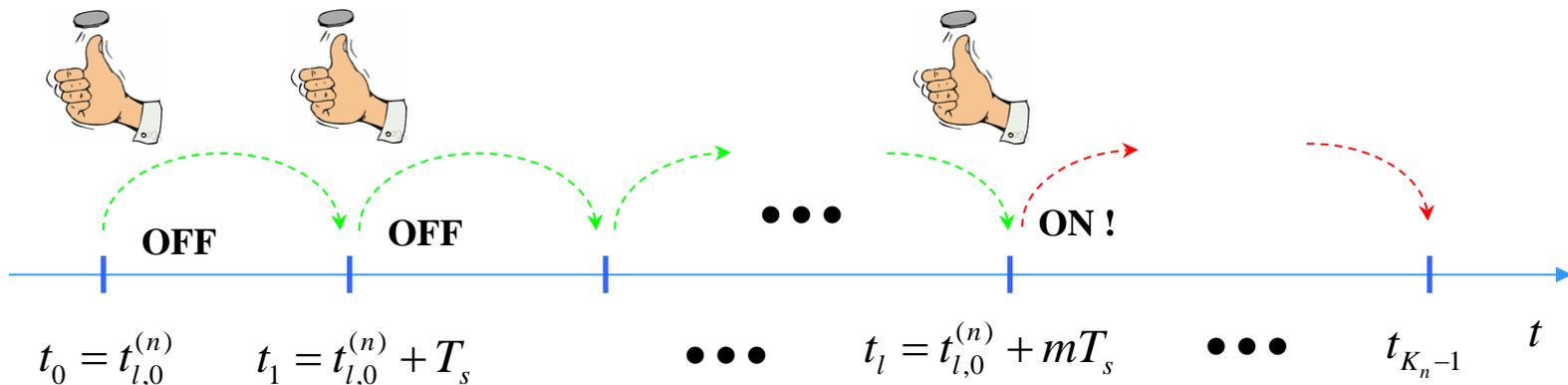
Demand-Side Management - Algoritmo

- Il giocatore #1 **ripete** il gioco agli istanti di tempo

$$t_p = t_{l,0}^{(n)} + pT_s$$

con $p = 0, 1, \dots, K_n - 1$, fino a che opta per l'azione ON o raggiunge il massimo numero K_n di tentativi consecutivi ($T_s =$ intervallo di slot).

- La scelta di una azione specifica (ON o OFF) è **randomizzata**.



Demand-Side Management - Algoritmo



Lancio di una
moneta
“truccata”

p -esimo tentativo

ON

OFF

$P_{on}[p]$

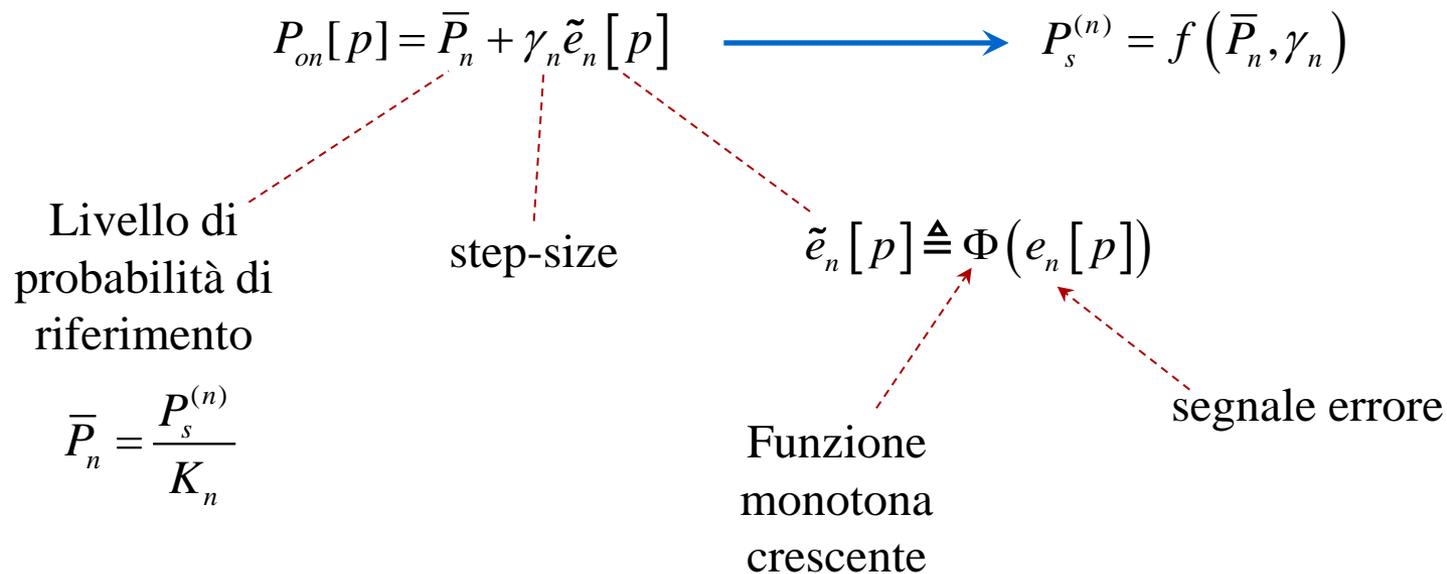
$1 - P_{on}[p]$

Probabilità di attivazione

Probabilità di successo su K_n tentativi: $P_s^{(n)}$

Demand-Side Management - Algoritmo

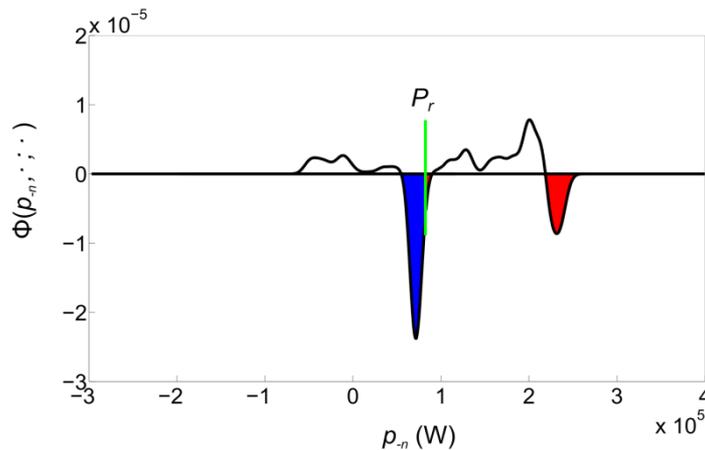
- La nostra strategia mista ha lo scopo di settare le probabilità $\{P_{on}[p]; p = 0, 1, \dots, K_{n-1}\}$ in modo da minimizzare, in media, la riduzione del costo atteso, *sull'insieme degli utenti*, data una certa probabilità di successo $P_s^{(n)}$.
- In pratica, la *probabilità di attivazione* $P_{on}[p]$ è calcolata come



Demand-Side Management - Algoritmo

- Lo step-size γ_n deve essere **ottimizzato** per una data sequenza $\{e_n[p]; p = 0, 1, \dots, K_{n-1}\}$

$$e_n[p] = \begin{cases} \text{perdita attesa (in mu) associata ad un flusso di} \\ \text{potenza della MG inferiore al livello di} \\ \text{riferimento } P_r \\ \hline \text{perdita attesa (in mu) associata ad un flusso} \\ \text{di potenza della MG superiore al livello di} \\ \text{riferimento } P_r \end{cases}$$



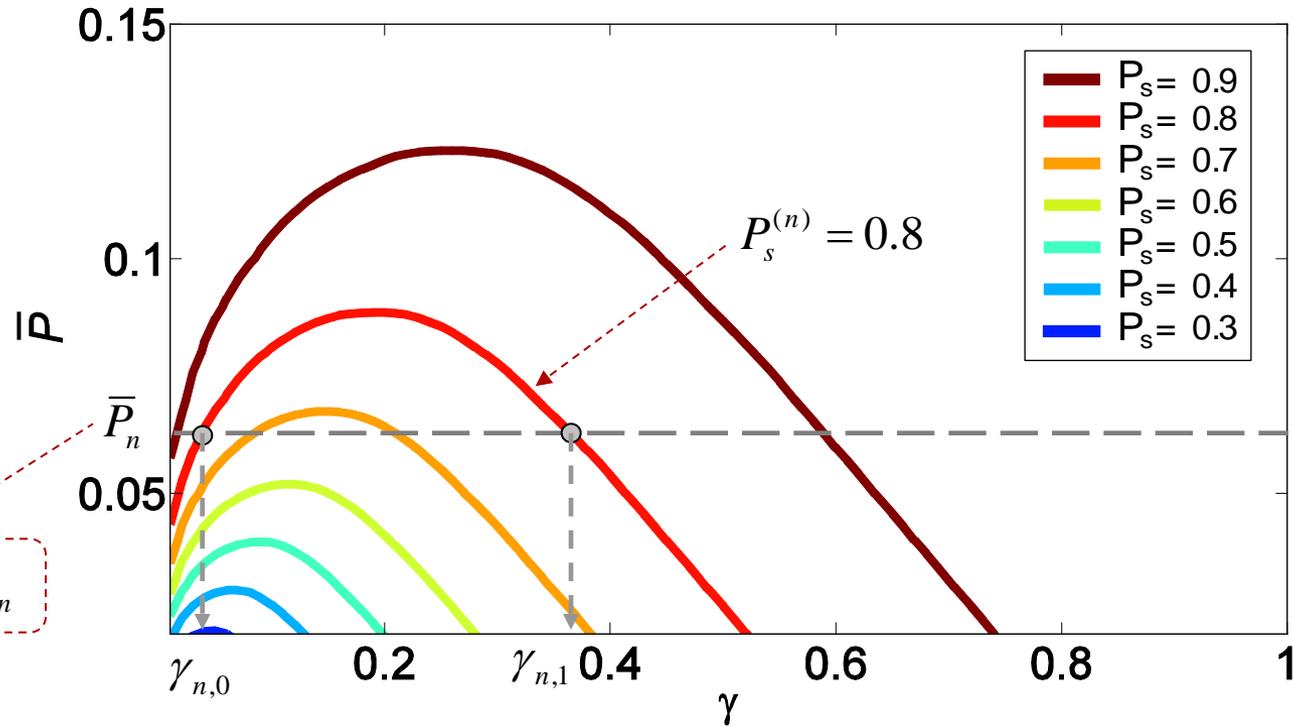
Esempio di una specifica realizzazione
della funzione Φ
in uno specifico intervallo di tempo.

$P_r =$ **flusso di potenza medio** della MG, atteso nel giorno considerato

Demand-Side Management - Algoritmo

- Il **livello di potenza di riferimento** P_r gioca un ruolo importante, poiché un cambiamento del suo valore (che è selezionato dal supervisore della MG ed inviato a tutti gli utenti) **modifica l'equilibrio dell'intera MG**.
- La nostra scelta specifica per P_r è basata sul fatto che:
 - a) le richieste medie giornaliere degli utenti della MG dovrebbero essere soddisfatte attraverso un'appropriata programmazione dei loro carichi ritardabili;
 - b) è necessario considerare che nella MG occorre garantire fluttuazioni limitate nella potenza totale e che tali fluttuazioni dipendono dal punto di equilibrio.

Demand-Side Management - Algoritmo



Due valori distinti di γ_n soddisfano l'equazione

$$P_s^{(n)} = f(\bar{P}_n, \gamma_n)$$

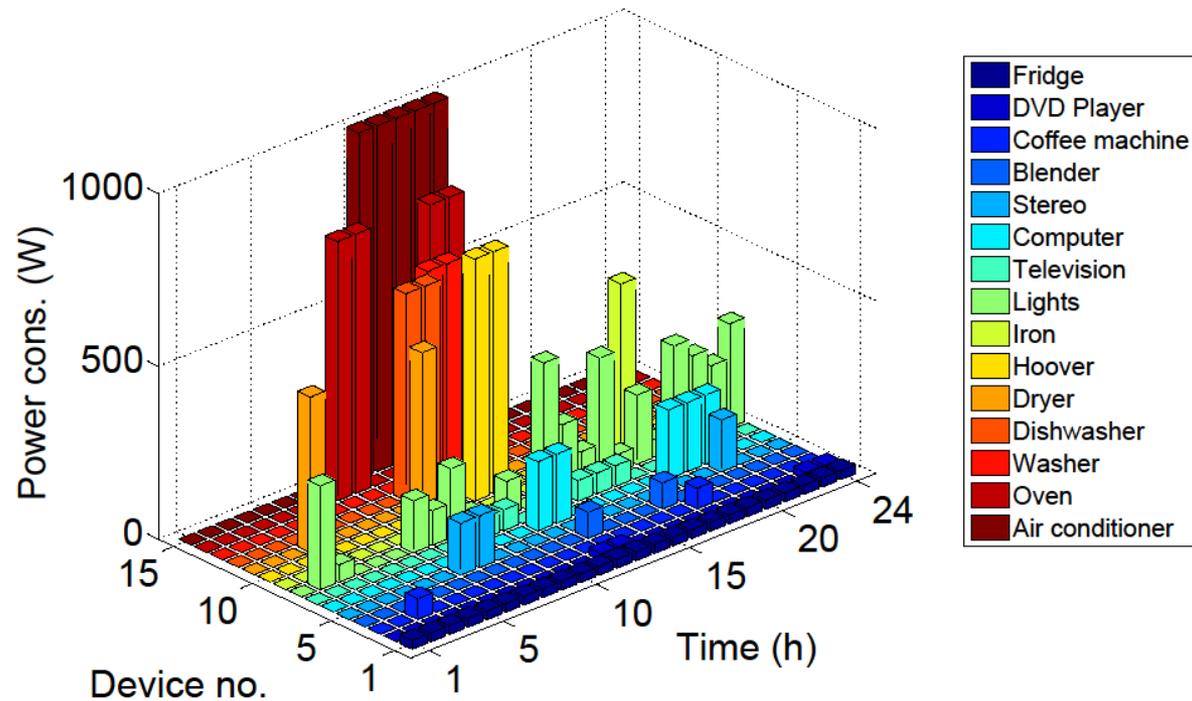
per una data sequenza $\{e_n[p]; p = 0, 1, \dots, K_{n-1}\}$ ed una data $P_s^{(n)}$

Risultati numerici

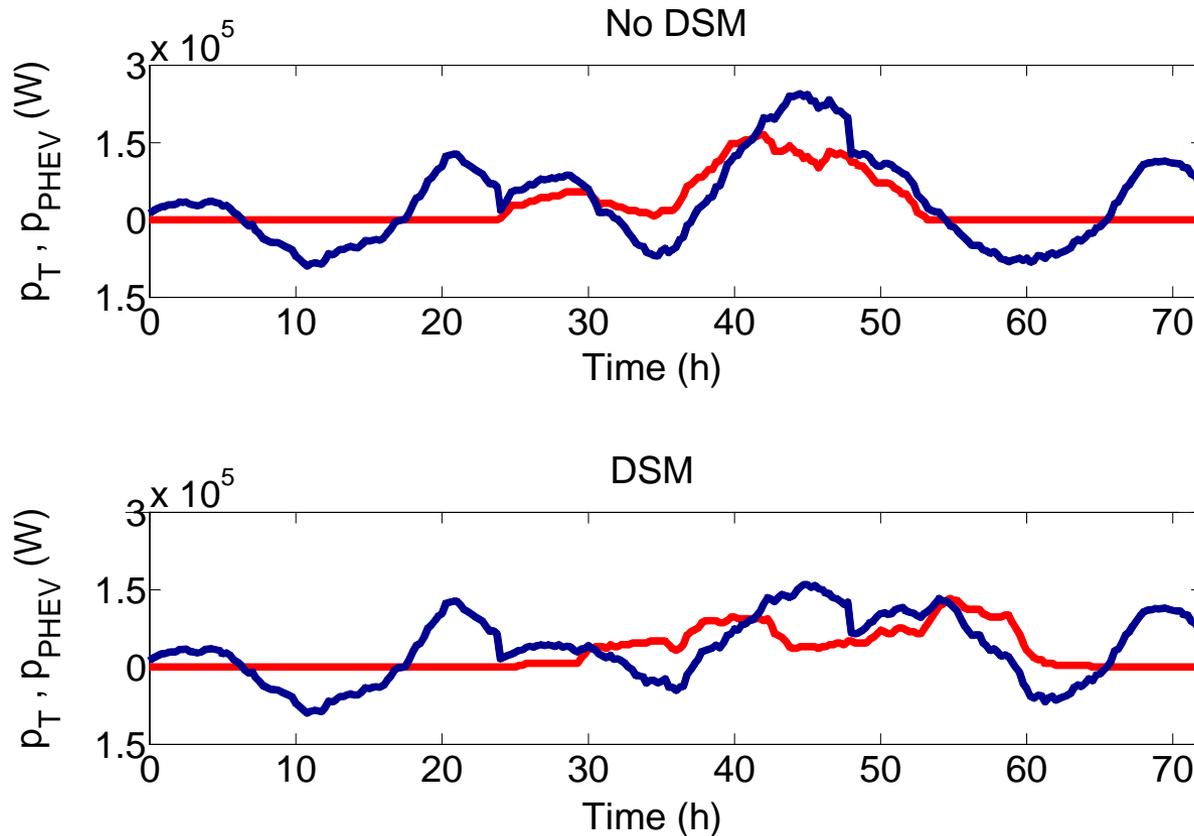
- È stata considerata una MG formata da $N = 100$ utenti residenziali.
- Ogni utente ha sottoscritto un contratto per la fornitura di energia di 6 kW (3.6 kWh sono riservati alla ricarica del veicolo elettrico). Egli è inoltre in grado di generare 3 kW grazie a pannelli fotovoltaici.
- Ogni utente possiede un EV e 15 elettrodomestici, ciascuno caratterizzato da una specifica massa di probabilità.
- Lo scambio di energia nella MG è stato osservato per un tempo pari a 3 giorni consecutivi; le richieste di ricarica sono state concentrate nel secondo giorno per tutti gli EV in modo da testare l'efficacia della strategia DSM in presenza di un'elevata richiesta di energia nella rete.
- La durata considerata per ogni slot di tempo è: $T_s = 15$ m.

Risultati numerici

Esempio di una specifica realizzazione del consumo giornaliero di un utente, dovuto a 15 elettrodomestici.

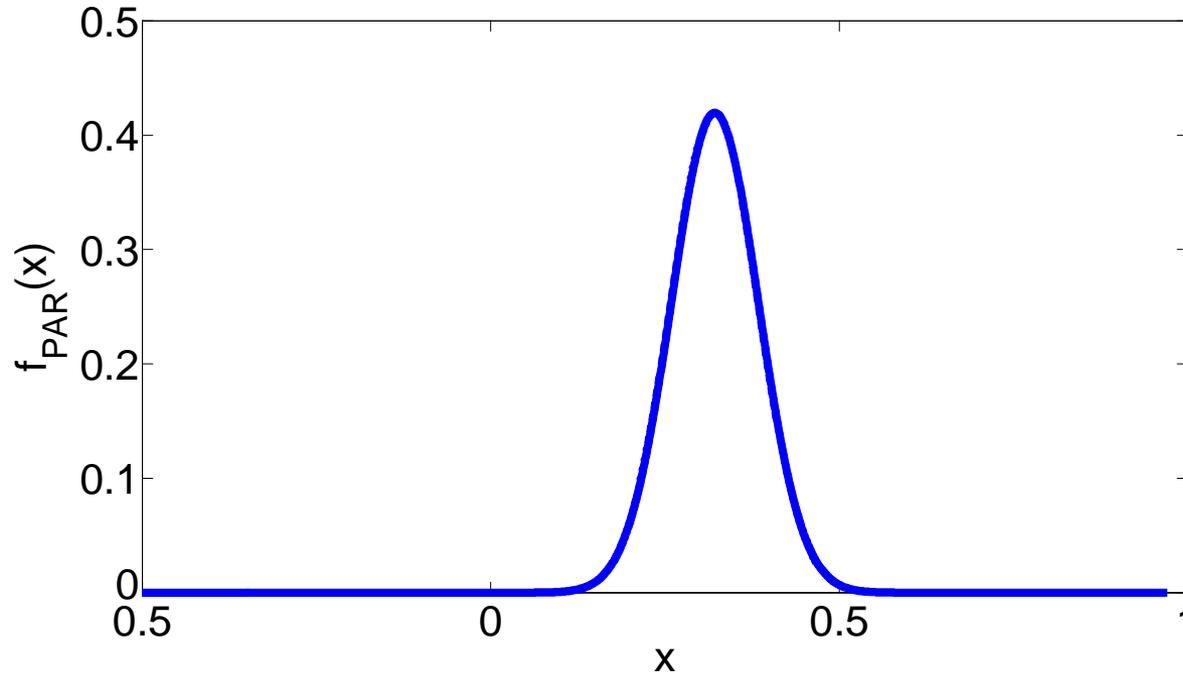


Risultati numerici



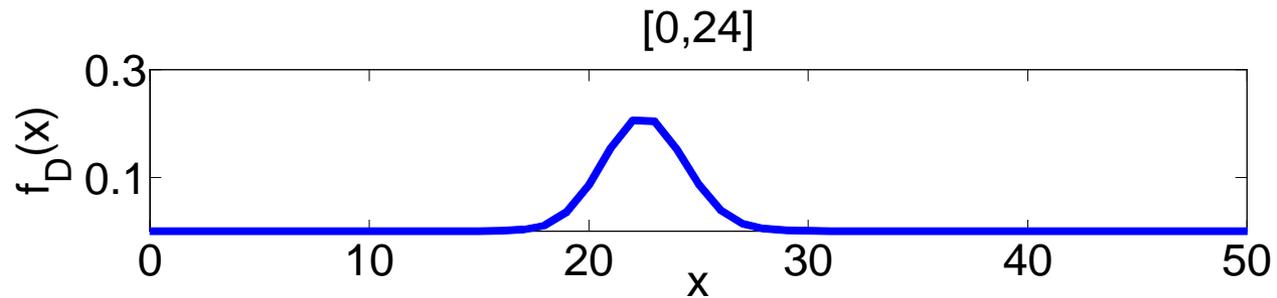
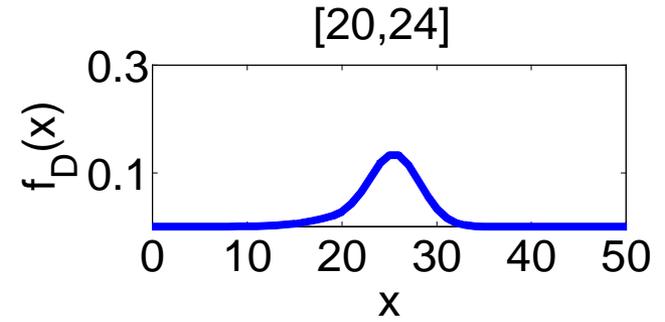
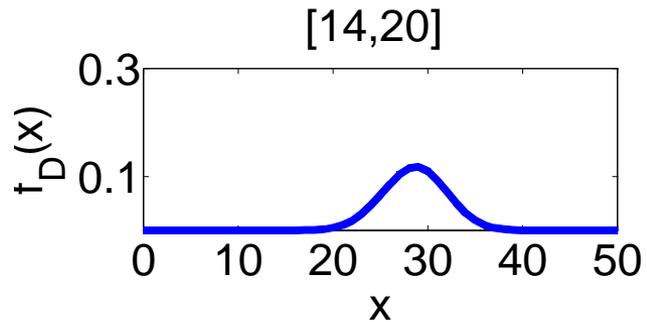
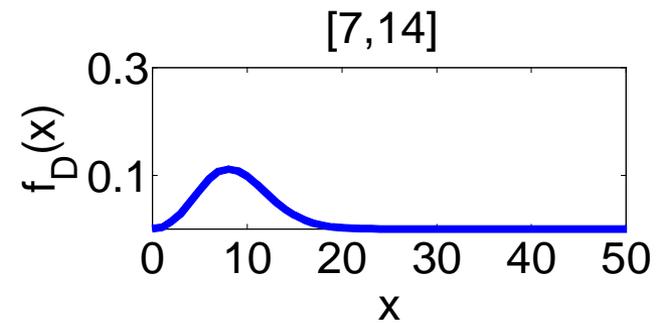
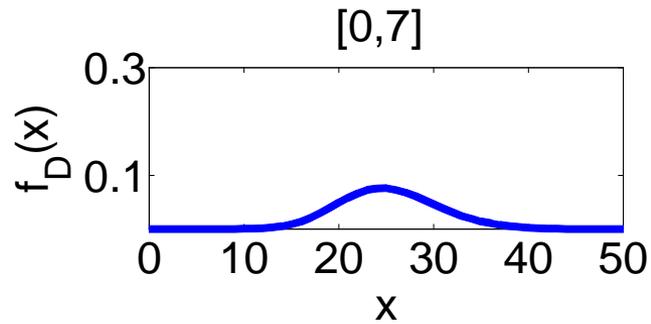
Potenza totale della MG $p_T(t)$ (**curva blu**) e potenza totale $p_{PHEV}(t)$ assorbita dagli EV (**curva rossa**) su un intervallo di tre giorni in assenza ed in presenza di DSM.

Risultati numerici



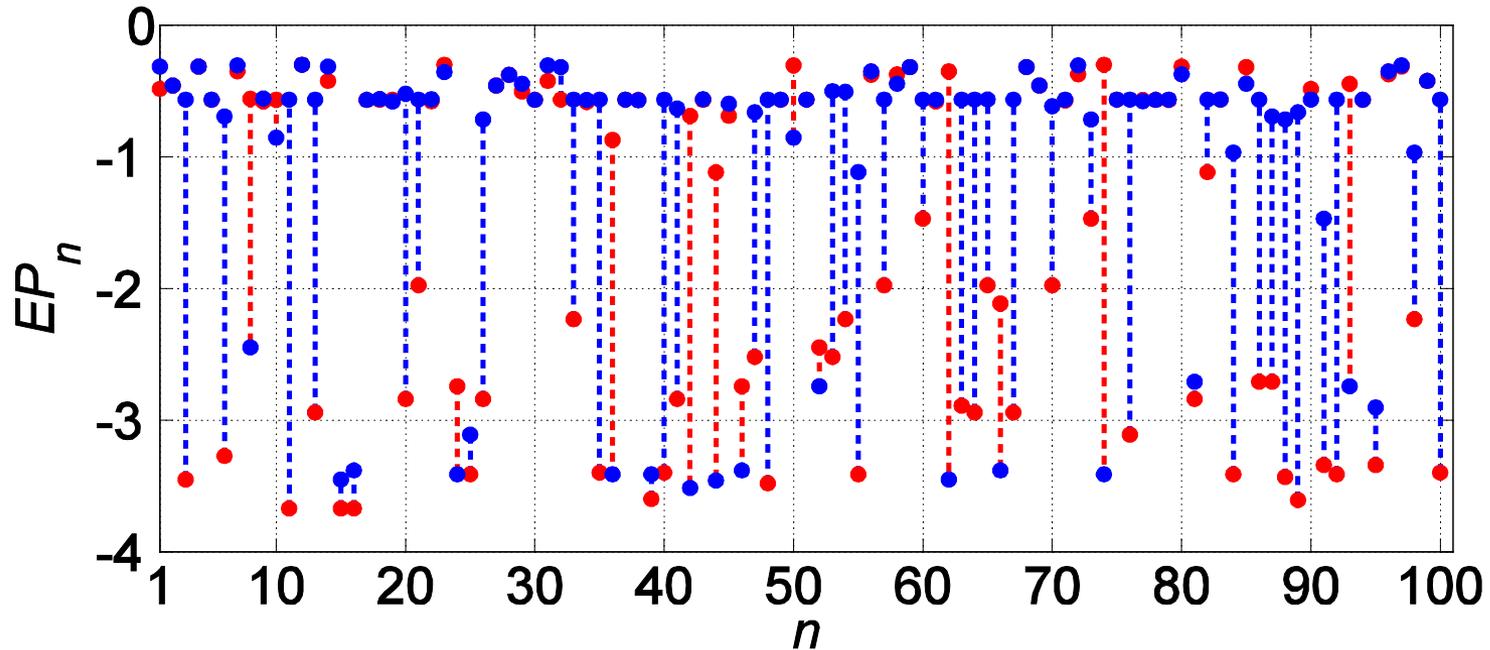
Pdf $f_{PAR}(x)$ del miglioramento percentuale nel PAR (peak-to-average ratio) della MG dovuto alla strategia DSM.

Risultati numerici



Pdf $f_D(x)$ del tempo di attesa D per l'attivazione degli EV.

Risultati numerici



Realizzazione dei payoff attesi $\{EP_n, n = 1, \dots, 100\}$ valutati per l'attivazione degli EV di tutti gli utenti della MG in presenza (**blu**) ed in assenza (**rosso**) di DSM.

Conclusioni

- È stata sviluppata una strategia per il DSM basata su informazioni statistiche riguardo i consumi degli utenti ed il consumo totale della MG.
- La strategia proposta permette di gestire i carichi ritardabili in modo da mitigare il PAR e, contemporaneamente, proteggere la privacy degli utenti.
- I risultati numerici, riferiti all'uso della nostra strategia nella gestione della ricarica di EV, evidenziano che è possibile raggiungere una significativa riduzione del PAR della MG.
- La nostra attività di ricerca in questo ambito riguarda attualmente la gestione di unità di immagazzinamento di energia (storage unit) in una MG.

Grazie per l'attenzione

Ing. Matteo Sola

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia,
Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”
Tel.: +390592056323
E-mail: matteo.sola@unimore.it

Prof. Ing. Giorgio Matteo Vitetta

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia,
Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”
Tel.: +390592056157
E-mail: giorgio.vitetta@unimore.it

