

NUOVI PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE PER I PRODUTTORI IN UN MERCATO COMPETITIVO DELL'ENERGIA ELETTRICA

A. Borghetti(*) – A. Lodi(**) – S. Martello(**) – M. Martignani(**) – C.A. Nucci(*) –
A. Trebbi(***)

(*) *Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria Elettrica*
{alberto.borghetti; carloalberto.nucci}@unibo.it

(**) *Università di Bologna – DEIS*
{alodi; smartello}@deis.unibo.it; michele.ma@katamail.com

(***) *ENEL – Divisione generazione ed energy management – Roma*
alessandro.trebbi-DP@enel.it

Sommario

Nuovi tipi di problemi di ottimizzazione devono essere risolti dalle società di produzione che operano nell'ambito del mercato elettrico italiano. Pur non essendo state ancora definite alcune regole del mercato, uno dei maggiori problemi da risolvere è quello di tradurre il piano di energia oraria definito dal mercato dell'energia elettrica ("mercato del giorno prima" e "mercato di aggiustamento"), in un profilo di potenza più dettagliato nel tempo (ossia, definito per intervalli pari a 15 minuti), che deve essere fornito sia al gestore della rete nazionale, per le necessarie verifiche di compatibilità con il sistema, sia agli operatori delle centrali per la sua effettiva attuazione. Tale piano deve, da un lato, rispettare il piano orario di energia e, dall'altro, assicurare che vengano soddisfatti i limiti tecnici delle centrali, alcuni dei quali non sono presi in considerazione da parte del mercato nella fase di definizione del piano orario. Questa memoria presenta una possibile formalizzazione del problema in modelli di ottimizzazione lineari e, come esempio, alcuni risultati preliminari di calcolo.

Parole chiave

Centrali elettriche, Mercato elettrico, Modelli di ottimizzazione, Programmazione lineare, Supporto alle decisioni.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito del nuovo mercato elettrico competitivo, i vari partecipanti devono risolvere problemi di ottimizzazione di tipo diverso rispetto a quelli di una organizzazione del servizio elettrico verticalmente integrato. Il mercato elettrico italiano è ancora in fase di definizione, anche se sono in corso sessioni di prova e simulazione della borsa elettrica, che coinvolgono i diversi operatori. Le procedure, al momento in cui si scrive,

sono contenute nei documenti [1-3]. Con riferimento al solo mercato dell'energia, in particolare al cosiddetto mercato del giorno prima (MGP), risultano almeno due nuovi problemi, da affrontare da parte delle società di produzione. Il primo riguarda la più conveniente formulazione delle offerte di produzione da sottomettere al gestore del mercato elettrico, in maniera tale raggiungere l'obiettivo di massimizzare i profitti dell'impresa tenendo conto del comportamento dei concorrenti, della domanda prevista, dei costi e dei limiti tecnici degli impianti di produzione (si veda, per esempio, [4-5]). Un secondo problema riguarda la traduzione del piano orario di energia fornito dal mercato elettrico, sulla base dell'incontro fra le offerte di produzione e di acquisto, in un programma di produzione più dettagliato (con discretizzazione temporale al quarto d'ora) da fornire al gestore della rete di trasmissione, per le necessarie verifiche di compatibilità con il sistema elettrico, e agli operatori delle centrali per la sua attuazione [6-9]¹.

Questa memoria illustra l'attività condotta per la soluzione di questo secondo problema. Tale problema, come verrà discusso nel seguito, non è di immediata soluzione nell'ambito delle procedure proposte per il mercato elettrico italiano, che prevedono di determinare il piano di energia orario senza tener conto di alcuni dei vincoli tecnici degli impianti di produzione, con particolare riferimento ai vincoli di rampa che limitano la velocità dei transitori di aumento e riduzione del carico da parte delle centrali termoelettriche [10]. E' presentato un modello del problema e una procedura per la sua soluzione mediante uno strumento di programmazione lineare. Sono anche presentati alcuni risultati preliminari di calcolo.

2. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA e MODELLO

Come già menzionato, secondo le procedure ora previste, l'incontro fra offerte di produzione e acquisto di energia elettrica realizzato dal mercato elettrico del giorno prima, si traduce, per ogni impianto, in una richiesta di produzione oraria di energia. Il gestore della rete di trasmissione nazionale richiede quindi la trasformazione del piano di produzione orario in piano di produzione a 15 minuti in modo tale poter disporre di una più accurata definizione dei flussi di potenza immessi nei punti di scambio rilevanti. Il valore totale dell'energia prodotta nell'ora non deve subire variazioni nel passaggio dalla griglia oraria alla griglia a 15 minuti. Il piano di produzione inoltre deve essere

¹ Le società con unità di produzione termoelettriche, unità di produzione idroelettriche con potenza superiore a 100 MW ed unità di pompaggio sono tenuti a comunicare al Gestore, prima dell'apertura della prima sessione dei mercati per l'approvvigionamento dei servizi di riserva, i programmi di immissione e di prelievo di energia elettrica al quarto d'ora, vincolanti ai fini del calcolo degli oneri di sbilanciamento. I programmi vincolanti di immissione e di prelievo di energia elettrica al quarto d'ora devono essere coerenti con l'energia elettrica corrispondente ai programmi finali di immissione e prelievo definiti su base oraria [1]

effettivamente realizzabile da parte degli impianti. Occorre quindi tenere conto di tutti i vincoli tecnici, ed in particolare dei vincoli rampa.

Per la soluzione di questo problema sono qui proposti modelli lineari che non necessitano della conoscenza delle caratteristiche di costo orario variabile di produzione dei singoli impianti. L'utilità di ottenere un problema di programmazione lineare è data dalla disponibilità algoritmi risolutivi efficienti che consentono di ottenere soluzioni ottime anche per istanze di dimensione elevata in un tempo ragionevole. I risultati mostrati in questa memoria, sono stati ottenuti implementando il modello in ambiente MPL [11] ed utilizzando CPLEX [12] come solutore.

I modelli presi in considerazione sono: un modello cosiddetto a vincoli forti, in cui è imposta la non violabilità dei vincoli di rispetto del piano orario di energia e dei vincoli tecnici, e un modello in cui si rilassano alcuni vincoli introducendoli, con opportuni parametri di penalizzazione, nella funzione obiettivo.

2.1 Modello a vincoli forti

L'obiettivo della società di produzione è quello di massimizzare il profitto. Tale obiettivo generale si traduce, per il problema in esame, in un obiettivo di minimizzazione dei costi variabili di produzione, visto che il livello di produzione è già definito dal programma di energia oraria definito dal mercato elettrico.

Per semplicità, consideriamo nel seguito il problema scomposto per singolo gruppo di produzione. Ossia si suppone che la programmazione di energia oraria stabilita dal mercato elettrico sia relativa alla singola unità. L'estensione al caso di programmazione oraria per singolo impianto costituito da più gruppi uguali è immediata. Scenari in cui sia prevista una maggiore libertà di autodispacciamento della produzione fra i vari gruppi della società di produzione non vengono presi in considerazione in questa memoria.

Sotto l'ipotesi di poter considerare in maniera indipendente i singoli gruppi, consideriamo in particolare un gruppo termoelettrico. Per tale gruppo, la minimizzazione del costo orario variabile di produzione, proporzionale in larga misura con il consumo di combustibile, si ottiene livellando, il più possibile, il profilo di produzione all'interno di ogni singolo periodo di un'ora, essendo fissata l'energia da fornire in tale periodo²:

$$\min_{p_k} \sum_{i=1}^{24} \sum_{k=4(i-1)+2}^{4i} |p_k - p_{k-1}| \quad (1)$$

dove i è l'indice dei periodi di un'ora dell'intervallo di ottimizzazione di 24 ore, k è l'indice dei periodi di 15 minuti, p_k è il livello di potenza alla fine di ogni periodo di 15 minuti.

I vincoli del problema sono:

a) i vincoli tecnici del gruppo di produzione

² L'obiettivo coincide con quello di uguagliare il più possibile l'energia nei quattro sottoperiodi di 15 minuti di ogni periodo di un'ora per il quale è fissata l'energia totale, se il profilo di potenza è costante in ogni periodo. La funzione obiettivo (1), inoltre, minimizza le variazioni di potenza tra un intervallo ed il successivo aumentando la vita utile dei componenti dell'impianto.

b) il rispetto del piano orario di produzione di energia

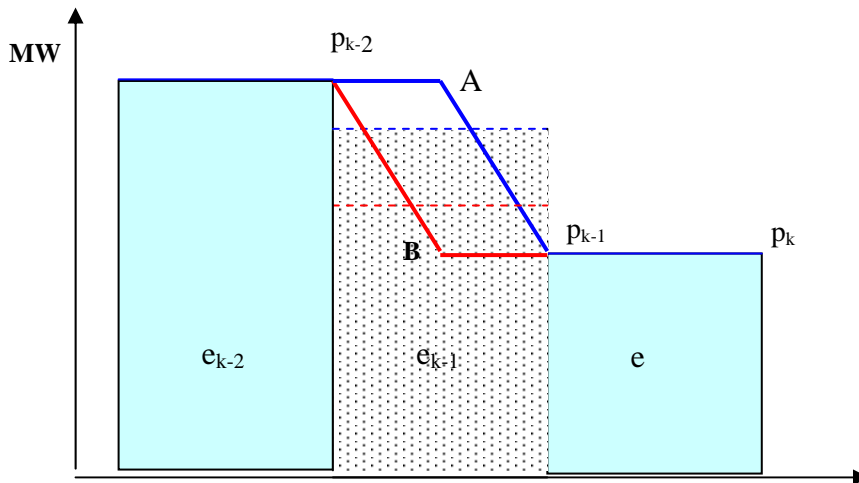


Fig. 1: Diversi tipi di profilo di potenza durante un transitorio

I vincoli di tipo a), considerati in questa memoria sono i vincoli di potenza massima (P_{max}) e minima (P_{min}) e il vincoli di rampa:

$$\Delta^d \leq p_k - p_{k-1} \leq \Delta^u \quad \forall k \quad (2)$$

dove Δ^d e Δ^u sono i valori massimi ammissibili per la rampa durante i transitori di diminuzione e presa di carico, per il gruppo considerato.

Per l'implementazione del vincolo b) occorre la conoscenza del profilo della potenza prodotta all'interno di ogni periodo di 15 minuti, necessaria per il calcolo dell'energia prodotta nel periodo. Come anche mostrato in figura 1, con riferimento al caso di transitorio di riduzione di potenza, si possono definire diversi profili: il profilo a gradino, se non vi sono vincoli di rampa, oppure una rampa continua per tutto il periodo oppure un profilo misto: lineare con pendenza pari alla rampa massima e costante per la parte rimanente del periodo. Il profilo misto a sua volta si può presentare in due modi distinti, a seconda che il tratto a pendenza massima segua o preceda il tratto costante, come mostrato in figura 1 dalla linea A e dalla linea B, rispettivamente.

Ai diversi profili corrispondono ovviamente diversi valori di energia prodotta, anche a parità di valori di potenza all'inizio ed alla fine del periodo. Il profilo a gradino, che prescinde dai vincoli di rampa, è quello che consente di realizzare i massimi incrementi e decrementi di produzione di energia nei transitori di presa di carico e di riduzione, rispettivamente. Il profilo misto con il tratto a rampa massima che precede il tratto costante, in entrambi i casi di aumento e riduzione di carico, è quello che maggiormente si avvicina alla condizione di massima variazione della produzione di energia, rispettando i vincoli di rampa.

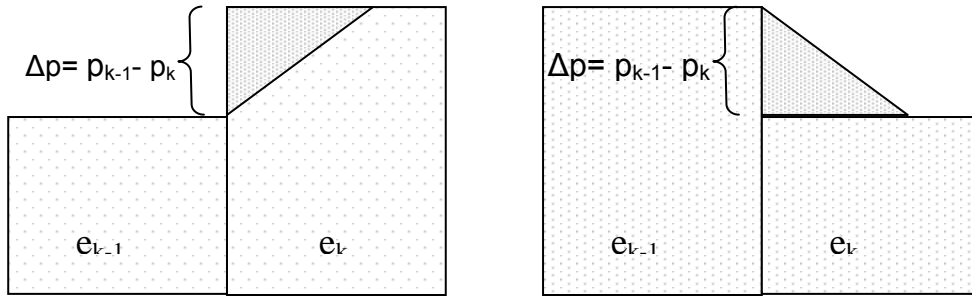


Fig. 2: Variazione di energia con profilo misto rispetto al caso di profilo a gradino.

Con riferimento ai simboli indicati in figura 2, con il profilo misto a rampa massima, la variazione di energia in (MWh), in aumento nel caso di riduzione di carico e in diminuzione nel caso di presa di carico, rispetto al profilo a gradino risulta pari a:

$$\Delta e_k = \frac{0,25 \cdot \Delta P^2}{\Delta} \quad (3)$$

avendo indicato con Δ la massima variazione di potenza fra due periodi consecutivi, in aumento o in diminuzione, presenti nella (2).

Il vincolo b), risulta quindi non lineare:

$$\sum_{k=4(i-1)+1}^{4i} \left(0,25 \cdot p_k - \Delta e_k \cdot \frac{p_k - p_{k-1}}{|p_k - p_{k-1}|} \right) - E_i = 0 \quad \forall i \quad (4)$$

2.2 Modello con il vincolo di energia rilassato

Per alcuni casi il problema impostato nel paragrafo precedente non risulta risolvibile.

Risulta quindi utile definire problemi che rilassa uno dei vincoli, ed in particolare prendiamo in considerazione il rilassamento del vincolo b) di rispetto dell'energia oraria. Il mancato rispetto comporterà la partecipazione alle sessioni del mercato di aggiustamento.

La funzione obiettivo del problema rilassato può essere espressa nella forma:

$$\min \sum_{k=4(i-1)+2}^{4i} \Omega \cdot |p_k - p_{k-1}| + \sum_{i=1}^{24} \Omega_e \cdot s e_i \quad (5)$$

tale che

$$\left| \sum_{k=4(i-1)+1}^{4i} \left(0,25 \cdot p_k - \Delta e_k \cdot \frac{p_k - p_{k-1}}{|p_k - p_{k-1}|} \right) - E_i \right| - s e_i = 0 \quad \forall i \quad (6)$$

dove Ω , Ω_e sono i coefficienti di penalità rispettivamente per il profilo di potenza, e per le violazioni del vincolo di energia e la variabile che corrisponde alle violazioni del vincolo di energia oraria.

3. MODELLI LINEARIZZATI

3.1 Modello a vincoli forti

Nella funzione obiettivo (1) è presente il valore assoluto, che, come noto, presenta è non lineare. La linearizzazione è effettuata sostituendo la grandezza da minimizzare in valore assoluto con la variabile t , a sua volta legata tramite 2 disequazioni a $p_k - p_{k-1}$. La (1) è quindi sostituita dal problema lineare:

$$\begin{aligned} \min \sum t_k \\ p_k - p_{k-1} + t_k &\geq 0 \\ p_k - p_{k-1} - t_k &\leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

I vincoli di tipo a) sono già lineari, mentre il vincolo b) dato dalla (4) presenta forma quadratica. Come primo approccio, in questa memoria, si suppone che il profilo di potenza all'interno di ogni sottoperiodi di 15 minuti sia lineare. Sotto questa ipotesi, la (4) è sostituita dalla:

$$0,25 \sum_{k=4(i-1)+1}^{4i} \frac{p_k + p_{k-1}}{2} - E_i = 0 \quad \forall i \quad (8)$$

3.2 Modello con il vincolo di energia rilassato

Mediante linearizzazione, la (5) diventa:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=4(i-1)+2}^{4i} \Omega \cdot t_k + \sum_{i=1}^{24} \Omega_e \cdot se_i \\ p_k - p_{k-1} + t_k &\geq 0 \\ p_k - p_{k-1} - t_k &\leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

e la (6) diventa:

$$\begin{aligned} \sum_{k=4(i-1)+1}^{4i} \left(0,25 \cdot \frac{p_k + p_{k-1}}{2} \right) - E_i + se_i &\geq 0 \\ \sum_{k=4(i-1)+1}^{4i} \left(0,25 \cdot \frac{p_k + p_{k-1}}{2} \right) - E_i - se_i &\leq 0 \end{aligned} \quad \forall i \quad (10)$$

Gli altri vincoli, ossia i limiti superiori e inferiori di potenza e i vincoli di rampa rimangono inalterati.

4. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI LINEARI

I modelli matematici linearizzati sono stati implementati e in maniera da poter utilizzare solutore di problemi lineari C-PLEX [12]. Si è utilizzato il linguaggio di programmazione MPL [11], (Model Development Environment), appartenente alla categoria dei generatori algebrici di modelli. Per la soluzione del problema, il programma in MPL è stato interfacciato con un foglio di calcolo (MS Excel): nell'acquisizione dei dati del problema il programma preleva le stringhe numeriche dal un foglio di calcolo, le inserisce nelle righe di codice, genera un file nel formato necessario per essere elaborato dal solutore C-PLEX e, in fine, qualora esistano soluzioni ammissibili, le riporta nello stesso foglio da cui inizialmente aveva prelevato i dati.

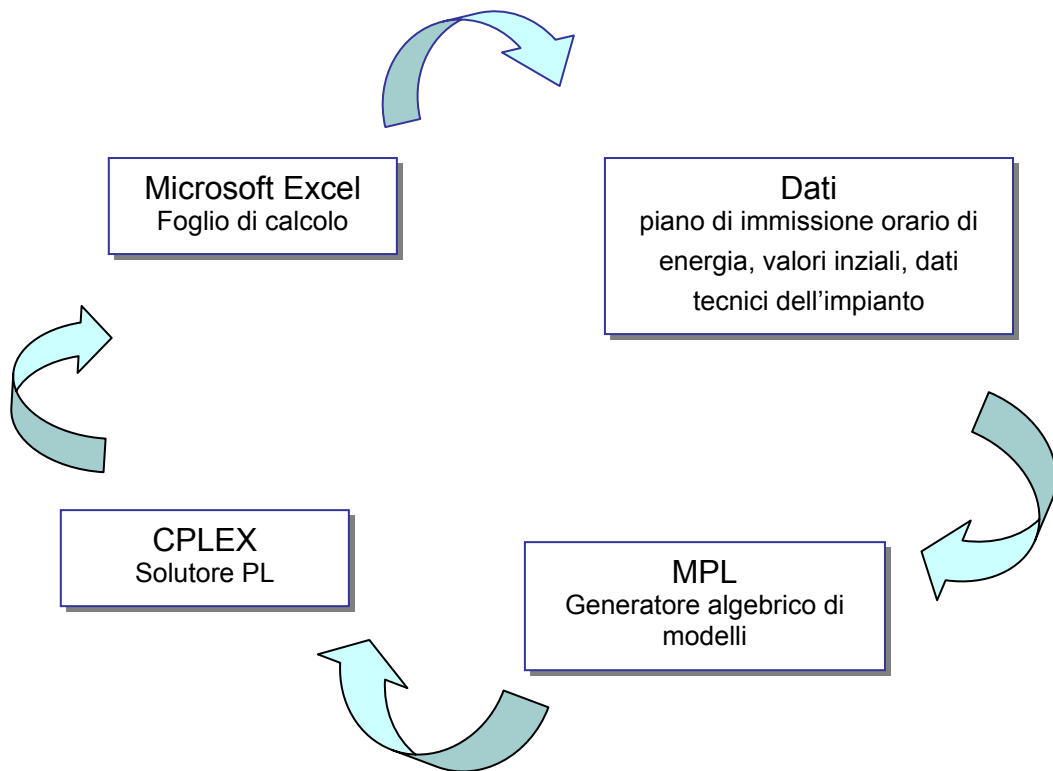


Fig. 3: Schema del procedimento di calcolo.

5. SIMULAZIONI NUMERICHE

Con il procedimento illustrato, sono state eseguite varie simulazioni confrontando i modelli messi a punto a partire da diversi profili di immissione di energia oraria, tenendo conto dei vincoli tecnici degli impianti.

A titolo di esempio vengono mostrati di seguito i risultati delle simulazioni ottenuti a partire dal un profilo di immissione oraria di figura 4, di un tipico impianto di produzione italiano. Si evidenzia come, con i dati tecnici tipici per tale gruppo, il problema a vincoli forti non ottiene una soluzione ammissibile. Si mostra invece che è possibile ottenere la

soluzione se si modificano i dati tecnici del gruppo, oppure utilizzando il modello con il rilassamento del vincolo di rispetto del piano di immissione orario di energia.

5.1 Piano di immissione orario

In fig. 4 è mostrata il programma preliminare orario di immissione di energia, fornito dal MGP per l'unità di produzione, che è scelto come dato di ingresso per le successive simulazioni. Questo piano rappresenta una modulazione giornaliera in cui, nel periodo 5, durante la presa di carico mattutina, si ha una variazione irregolare dell'energia.

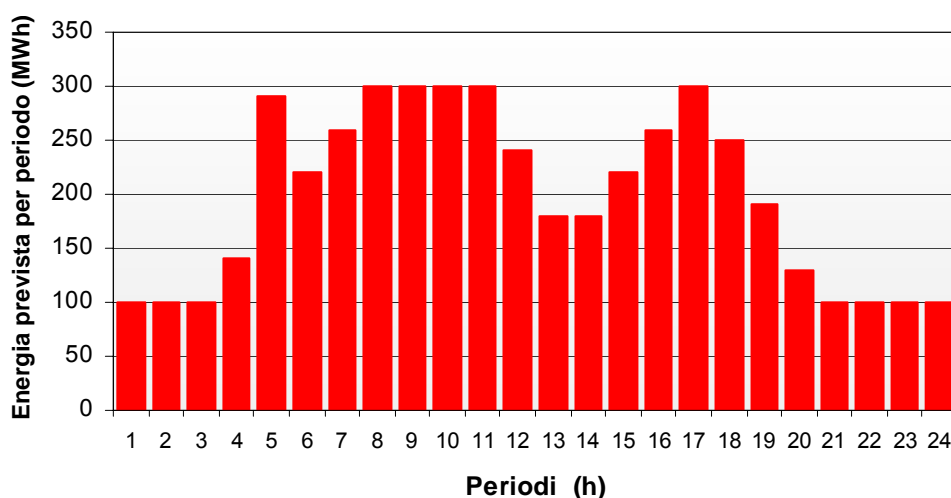


Fig. 4 Programma preliminare orario di immissione di energia

5.2 Simulazione con il modello a vincoli forti

Il modello a vincoli forti è utilizzato per verificare se l'esito del mercato dell'energia elettrica in termini di piano di immissione orario è traducibile in un piano definito su intervalli da 15'.

Tab. I. dati tecnici del gruppo utilizzati nella simulazione 1

Potenza massima (MW)	300
Potenza minima (MW)	100
Rump-up (MW/15')	20
Rump-down (MW/15')	30

Simulazione 1. Si considerino i dati tecnici del gruppo di tabella I, in cui i valori di massimo e minimo tecnico eguagliano i massimi e i minimi del piano orario di immissione ed i vincoli di rampa sono restrittivi: il risultato ottenuto dalla simulazione mediante il modello a vincoli forti risulta essere di "non fattibilità". Non vi è quindi la

possibilità di formulare un piano a 15' con il contemporaneo rispetto sia del piano orario di energia che dei vincoli tecnici dell'impianto.

Tab. II. dati tecnici del gruppo utilizzati nella simulazione 2

Potenza massima (MW)	330
Potenza minima (MW)	70
Rump-up (MW/15')	42
Rump-down (MW/15')	42

Simulazione 2. Considerando invece i dati modificati come in tabella II, dove i valori di massimo e minimo tecnico non sono raggiunti dalla modulazione oraria e i valori di rampa sono meno restrittivi, il piano di immissione orario risulta traducibile in piano al quarto d'ora come mostrato in figura 5. Nel grafico sono presentati sia il profilo di potenza al quarto d'ora (linea di colore blu) sia il confronto fra il piano orario di energia (in rosso) e il piano di energia ottenuto al quarto d'ora (in nero).

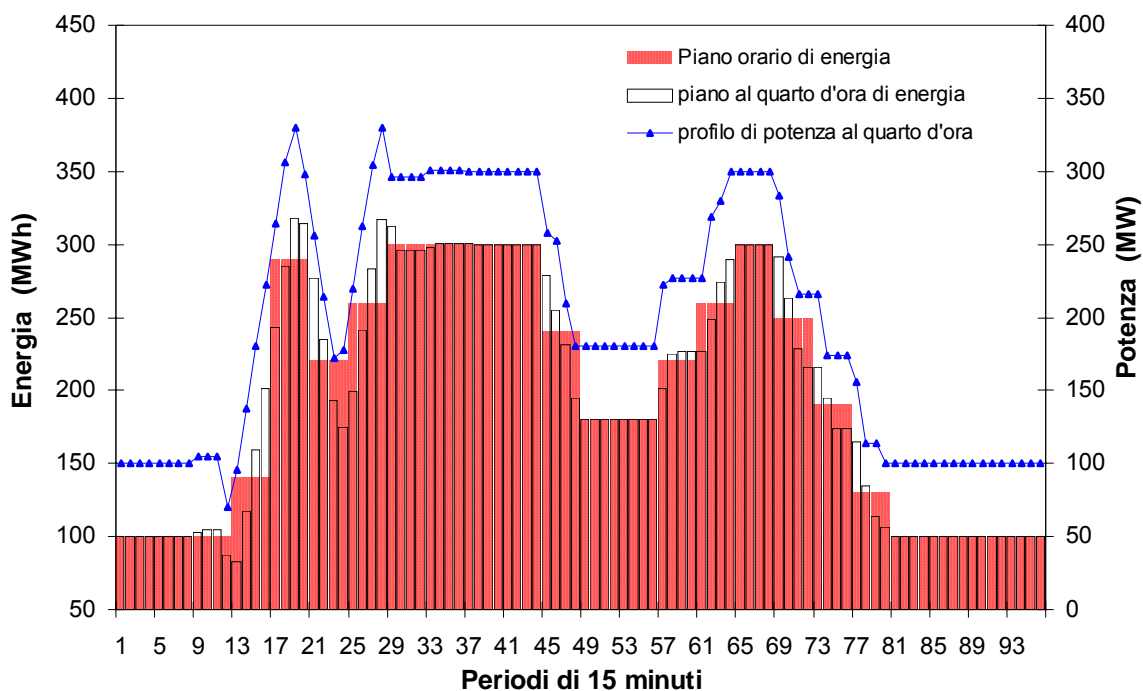


Fig.5 Piano al quarto d'ora, risultato della Simulazione 2

5.3 Simulazione con il modello a vincolo di energia rilassato

Simulazione 3. Nel paragrafo precedente si è visto come, in assenza di violazioni dei vincoli a) (in particolare dei vincoli di rampa) o b) e con i dati di Tabella I non si ha una soluzione ammissibile. Si utilizza pertanto il modello rilassato che permette la violazione del vincolo di energia oraria: si ottiene in questo modo un piano di immissione definito al quarto d'ora. I risultati sono mostrati in figura 6, ottenuti ponendo $\Omega=1$ e $\Omega_e=100$ quali valori dei coefficienti di penalità della funzione obiettivo 9).

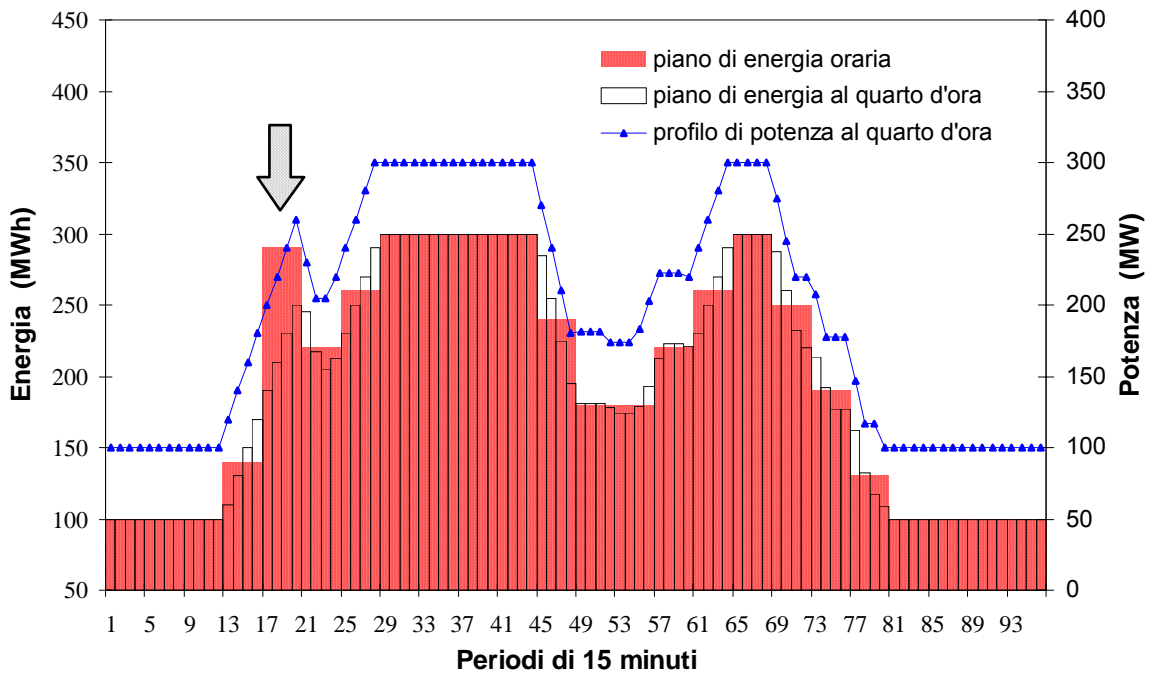


Fig.6 Piano al quarto d'ora, risultato della Simulazione 3

La figura 6 evidenzia nell'ora 5 una violazione dell'energia oraria pari a 70 MWh. Nei rimanenti periodi orari non vi sono violazioni del piano orario di energia iniziale.

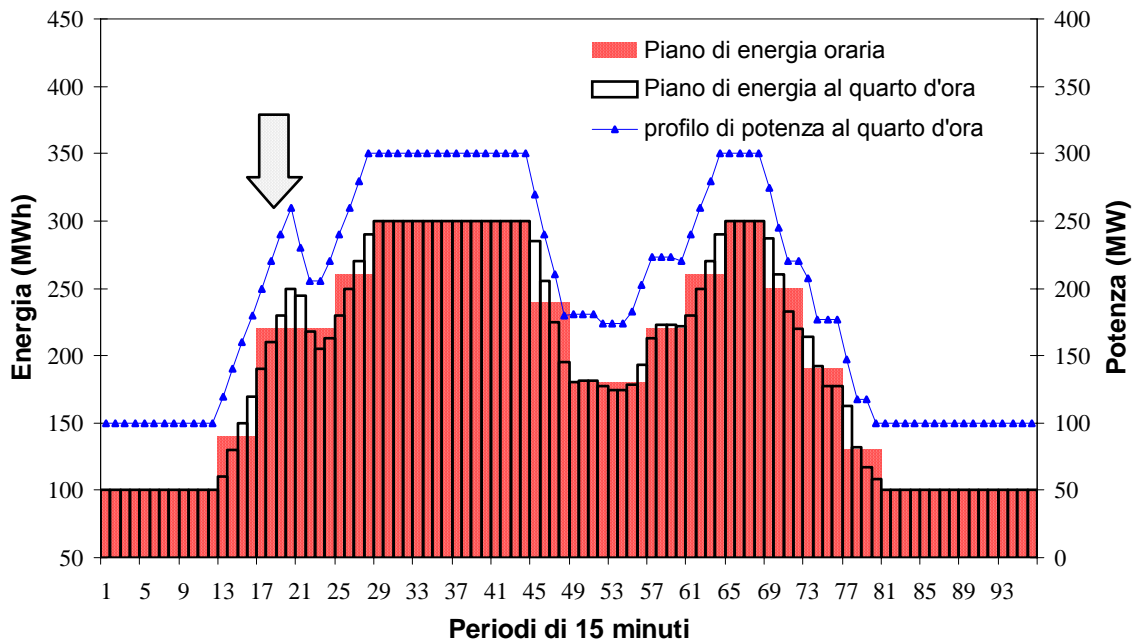


Fig.7 Piano al quarto d'ora con modifica all'energia dell'ora 5

La figura 7 rappresenta il medesimo piano al quarto d'ora della precedente figura 6 e il corrispondente nuovo piano orario di energia. L'applicazione di questo modello può essere di particolare importanza nella definizione delle offerte durante il mercato di

aggiustamento, in cui è possibile correggere i piani orari in uscita dal mercato del giorno prima.

6. APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA NEL MERCATO ELETTRICO ITALIANO

Tenuto conto della attuale regolamentazione del mercato elettrico italiano, la definizione dei piani di immissione di energia in rete avviene attraverso due mercati tra loro correlati:

- il mercato dell'energia elettrica, comprendente il mercato del giorno prima (MGP) e il mercato di aggiustamento (MA);
- il mercato del servizio di dispacciamento (MSD).

Il MGP ha per oggetto le contrattazioni di energia tra domanda e offerta e definisce in prima battuta il programma preliminare orario di immissione per impianto di produzione.

Nella sessione di MA, l'operatore qualora lo ritenga opportuno, ha la possibilità di negoziare offerte di acquisto e vendita di energia elettrica per l'aggiustamento dei programmi di immissione definiti sul MGP; può quindi variare il programma preliminare ricorrendo nuovamente alle contrattazioni di mercato. Solamente in seguito alle contrattazioni tra operatori e Gestore nel MSD si definiscono i programmi orari finali di immissione.

L'operatore, alla fine delle suddette contrattazioni è tenuto a comunicare al gestore il programma di immissione al quarto d'ora. Risulta evidente, stante l'attuale organizzazione del mercato, l'importanza di studiare la traduzione dei piani di produzione nel passaggio dalla definizione oraria a quella a 15': anche perché vi sono vincoli tecnici degli impianti che talvolta rendono il problema di non immediata soluzione. L'ostacolo principale è la coesistenza di due vincoli che risultano essere in conflitto: il rispetto da parte dell'unità di produzione delle rampe di salita e discesa e la richiesta da parte del Gestore di non violare il piano di immissione definito su base oraria. I modelli proposti contribuiscono alla soluzione del problema:

1. si acquisisce il piano preliminare orario di immissione (es. Fig.3) definito dal MGP;
2. si utilizza il modello a vincoli forti per vedere se il piano orario è effettivamente traducibile in piano a 15' senza violare i vincoli. In caso affermativo (come ad esempio nella simulazione 2) il ricorso al MA non si rende necessario;
3. qualora il modello a vincoli forti non fornisca una soluzione (come nella simulazione 1), il modello in cui si è rilassato il vincolo di energia oraria evidenzia quanta energia ed a quale ora impedisce la realizzazione del piano a 15' (come mostrato nella simulazione 3), e fornisce quindi utili indicazioni per la partecipazione al mercato di aggiustamento (Fig. 7).

7 CONCLUSIONI

La memoria descrive una procedura di calcolo per tradurre piani di energia oraria definiti nell'ambito delle contrattazioni del mercato elettrico dell'energia in piani di produzione definiti al quarto d'ora che sono congruenti con il piano orario originario e che rispettano i vincoli tecnici dei gruppi di produzione.

E' proposta una formulazione del problema in modelli lineari. In particolare, è proposto un modello a vincoli forti che consente di minimizzare le variazioni di potenza fra sottoperiodi di un quarto d'ora, e un modello che presenta il rilassamento del vincolo di rispetto del piano orario di energia.

I risultati di alcune simulazioni preliminari consentono un primo confronto fra i modelli proposti. La procedura di calcolo messa a punto appare di utile applicazione come supporto alle decisioni di società di produzione nel mercato elettrico italiano, le cui regole sono in corso di definizione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] GRTN (gestore della rete di trasmissione nazionale): 'Regole per il dispacciamento', v.1.1, 9 agosto 2002.
- [2] GME (gestore del mercato elettrico): 'Proposta per la modifica della disciplina del mercato elettrico', 9 ottobre 2003.
- [3] GME (gestore del mercato elettrico): 'Disciplina del mercato elettrico ai sensi dell'articolo 5 del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79', 8 maggio 2001.
- [4] V. Petrov, C.W. Richter, G.B. Sheble: 'Predatory gaming strategies for electric power markets', Proc. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 488 -492, 4-7 April 2000
- [5] A. Borghetti, A. Frangioni, F. Lacalandra, C.A. Nucci, P. Pelacchi, "Using of a cost-based Unit Commitment algorithm to assist bidding strategy decisions", Proc. 2003 IEEE Bologna PowerTech, Bologna, 23-26 giugno 2003.
- [6] J.L. Martinez Ramos, A. Marano Marcolini, M.T. Fernandez Rivera: 'Influence of the Transition from Hourly Energy Programs to Power Generation Dispatches on the Use of Secondary Reserve', Proc. 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.
- [7] Xiaohong Guan, Feng Gao, A. Svoboda: 'Energy delivery capacity and generation scheduling in the deregulated electric power market', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1275 -1280, Nov. 2000
- [8] S. Kai, G.B. Shrestha, L. Goel: 'Strategic bidding in power market: ramp rate considerations', Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 4 , pp. 2144 -2149, 16-20 July 2000

- [9] S.S. Oren, A.M. Ross: 'Designs for ramp-constrained day-ahead auctions', Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 53 -60, 6-9 Jan. 2003
- [10] A.J. Svoboda, C.-L.. Tseng, C.-A. Li, R.B. Johnson, 'Short-term resources scheduling with ramp constraints', IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [11] MPL User's Manual, <http://www.maximalsoftware.com/>.
- [12] CPLEX 8.0 User's Manual, July 2002