Casación en sistemas multiárea: Un algoritmo basado en programación lineal

Julián Barquín, Michel Rivier

Instituto de Investigación Tecnológica
Universidad Pontificia Comillas
C/ Alberto Aguilera, 23
28015 Madrid, Spain
Julian.Barquin@iit.upco.es, Michel.Rivier@iit.upco.es

Resumen

En este artículo se propone un sistema de casación capaz de tratar ofertas pertenecientes a diversas áreas con capacidad limitada de intercambio. El algoritmo propuesto se basa en el uso de la programación lineal, profundizando el trabajo presentado en [2]. Las propiedades matemáticas del procedimiento son estudiadas para comprobar su solidez teórica, desde los puntos de vista técnico y económico. Finalmente se tratan algunos aspectos relevantes a su implantación práctica en sistemas reales.

Palabras clave: Mercados de energía eléctrica, casación, programación lineal.

1 Introducción

Actualmente se está asistiendo a un proceso en el que la gestión centralizada tradicional de los sistemas de energía eléctrica está siendo substituída por un nuevo mercado basado en el juego competitivo de los diversos agentes. En este nuevo marco, es habitual que un elemento de capital importancia sea el mecanismo de casación, es decir, el procedimiento mediante el cúal se asignan las potencias a producir entre los diversos agentes en función de las ofertas presentadas.

Por otra parte, la cada vez más elevada integración de los diversos sistemas lleva a que sea necesario pensar en métodos de casación que coordinen sus operaciones. En particular, es preciso asegurar que las casaciones resultantes respeten las capacidades de intercambio que la red eléctrica es capaz de soportar.

Idealmente, el método de casación empleado debiera reunir las siguientes propiedades:

1. Ser **transparente**, es decir, cada agente debiera ser capaz de comprobar de forma independiente, a partir del precio de mercado, las cantidades que le deben ser casadas según las ofertas que él mismo presentó. Esta propiedad está muy relacionada con el requerimiento de tener un sistema **no discrimatorio**, en el cual el Operador del Mercado no tenga ni la posibilidad ni los incentivos de tratar a los diferentes agentes con criterios diferentes.

2. Ser **técnicamente consistente**, es decir, que la casación resultante sea factible desde el punto de vista técnico.

Dada la complejidad técnica de la operación de los sistemas de energía eléctrica, ambos criterios son, en rigor, incompatibles. Existen, por tanto, dos filosofías generales en la especificación de los sistemas de casación [1]:

1. Primar la factibilidad técnica, mediante la introducción de sistemas de casación complejos, que incorporan la mayor parte de las restricciones habituales en los códigos de programación de la operación o de despacho económico.

2. Primar la transparencia, mediante sistemas de casación simples. En este caso, con el fin de alcanzar la factibilidad técnica, es preciso considerar la posibilidad, sea de subastas iterativas, sea de mercados sucesivos.

Los sistemas de casación de última generación se inscriben dentro de esta segunda línea. También el sistema propuesto en este artículo, que no obstante intenta obtener casaciones que sean técnicamente factibles desde el punto de vista de las posibilidades de transmisión del sistema eléctrico.

El resto de este este articulo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se realizan algunos comentarios generales sobre la realización de casaciones mediante algoritmos de optimización. La sección 3 presenta el algortimo multiárea propuesto. La sección 4 trata del significado y tratamiento de las soluciones degeneradas del algoritmo. Finalmente, se establecen las conclusiones.

2 Optimización y casación

Tradicionalmente, la planificación de la operación se ha planteado como un problema de optimización. Es asimismo posible plantear mecanismos de casación como problemas de optimización [2], [3].

En dicho problema se pueden establecer restricciones que indiquen que para cada área o nudo del sistema (o el sistema en su totalidad) la energía vendida en cada periodo más las importanciones es igual a la comprada más las exportaciones. Una opción es tomar el precio de mercado en cada zona o nudo como el multiplicador asociado a la restricción correspondiente. Este proceder tiene las siguientes ventajas:

1. Asegura que las cantidades de pagos y cobros a hacer en cada período sean iguales.

2. Incentiva a que los diversos agentes declaren costes próximos a sus costes o utilidades marginales reales, ya que, en el caso de los costes, declarar costes más bajos no aumenta su retribución, y si los declaran más altos corren el riesgo de no ser casados. Análogos argumentos se plantean con las utilidades de las demandas.

3. Puede generalizarse fácilmente para incluir otros tipos de mercados, como por ejemplo de reserva.

4. En el caso de que el problema de **optimización sea convexo**, y de que todas las restricciones que involucran a diversos agentes tengan su precio de mercado definido por el multiplicador de la restricción correspondiente, se tiene un mecanismo de casación transparente. La razón es que, conocidos los precios, cada agente puede construir un problema derivado del lagrangiano correspondiente a su propias ofertas, y comprobar que la casación realizada corresponde a un máximo de este problema.

En las siguientes secciones se aplican estos principios generales al caso de un sistema de casación multiárea[1].

3 El algoritmo de casación

El algoritmo presentado pretende resolver el problema de la casación en un sistema multiárea, en que diversos sistemas están conectados por interconexiones de capacidad limitada. Este tipo de situación se puede dar con

[1]La aplicación al sistema español requeriría, en el marco actual, la eliminación de las restricciones de bloques no divisibles e ingresos mínimos.

creciente frecuencia en Europa debido al proceso de liberalización que sufre el continente.

Cada región está modelada en nudo único, existiendo por tanto un único precio por región (se supone que las restricciones de red dentro de cada región son inexistentes o poco importantes, puediendo ser tratadas por un mecanismo posterior). El modelo de interconexiones es un modelo de transporte, por lo que la capacidad de interconexión puede depender de las condiciones esperadas de operación.

Las interconexiones físicas están representadas en el algoritmo por capacidades económicas de interconexión, o simplemente interconexiones en el resto del artículo. Cada interconexión están caracterizada por una región de salida, una de entrada, una capacidad máxima y un peaje. El peaje es lo que cobra el propietario de la interconexión a cada unidad de potencia que circule por ella, y podría representar algún tipo de cargo o impuesto (p.e., de importación). Cada interconexión física está representada por dos interconexiones al menos (una en cada sentido), aunque podrían ser más.

Los siguientes parámetros son datos de entrada en el algoritmo:

$\pi_v, \overline{P_v}$ Par precio-cantidad de la oferta de venta v.

$\pi_c, \overline{P_c}$ Par precio-cantidad de la oferta de compra c.

$\mathcal{C}(k), \mathcal{V}(k)$ Conjuntos que incluyen los índices de las ofertas de compra y venta que pertenecen a la zona k.

$p_l, \overline{\Phi_l}$ Par peaje (€/MWh), capacidad máxima (MWh) en la interconexión l.

I_{lk} Matriz de incidencias interconexión-zonas: $I_{lk} = 1$ si la interconexión l es entrante en la zona k, $I_{lk} = -1$ si la interconexión l es saliente de la zona k, e $I_{lk} = 0$ si la interconexión l no está relacionada con la zona k.

Todos los parámetros introducidos $(\pi_c, \overline{P_c}, \pi_v, \overline{P_v}, p_l, \overline{\Phi_l})$ son cantidades no negativas. Se introduce además la notación $s(l)$ para indicar la zona de la que sale la interconexión l (es decir $I_{s(l),l} = -1$), y $e(l)$ para la zona en la que entra ($I_{e(l),l}) = 1$).

Por otra parte, el algoritmo de casación devuelve el valor de las variables:

P_v Potencia casada correspondiente a la oferta de venta v.

P_c Potencia casada correspondiente a la oferta de compra c.

Φ_l Flujo en la interconexión l.

Considérese entonces el problema de optimización lineal:

$$\begin{array}{llr} \min & \sum_v \pi_v P_v - \sum_c \pi_c P_c + \sum_l p_l \Phi_l & \\ \text{s.a.} & \sum_{c\in\mathcal{C}(k)} P_c - \sum_{v\in\mathcal{V}(k)} P_v - \sum_l I_{kl}\Phi_l = 0 & \forall k : \lambda_k \\ & 0 \le P_v \le \overline{P_v} & \forall v : \underline{\mu_v}, \overline{\mu_v} \\ & 0 \le P_c \le \overline{P_c} & \forall c : \underline{\mu_c}, \overline{\mu_c} \\ & 0 \le \Phi_l \le \overline{\Phi_l} & \forall l : \underline{\nu_l}, \overline{\nu_l} \end{array}$$

Las letras griegas detrás de los dos puntos son los multiplicadores asociados a las restricciones correspondientes. Los multiplicadores λ_k, asociados a la ecuación de balance de energía en cada área, tienen una particular importancia. Se denominarán el marginal de la zona, y se comprobará que tienen propiedades adecuadas para que el precio de la casación en cada zona sea este marginal.

Tal como se indicó en la sección anterior, este sistema asegura el equilibrio de pagos y cobros. En efecto, se tiene que:

Propiedad 1

Si se paga a cada generador según el marginal de su área, a cada carga se la cobra según el marginal de cada área, y se paga a cada conexión según el flujo que transita por la diferencia de marginales entre las áreas que conecta, resulta un sistema de pagos equilibrado.

La restricción de equilibrio de potencia en cada área es:

$$\sum_{c\in\mathcal{C}(k)} P_c - \sum_{v\in\mathcal{V}(k)} P_v - \sum_l I_{kl}\Phi_l = 0$$

Multiplicando por λ_k y sumando para todas las áreas:

$$\sum_k \sum_{c\in\mathcal{C}(k)} \lambda_k P_c = \sum_k \sum_{v\in\mathcal{V}(k)} \lambda_k P_v + \sum_k \lambda_k \sum_l I_{kl}\Phi_l$$

Es claro que $\sum_k \sum_{c\in\mathcal{C}(k)} \lambda_k P_c = \sum_c P_c \lambda_k \,|_{c\in\mathcal{C}(k)}$, y que $\sum_k \sum_{v\in\mathcal{V}(k)} \lambda_k P_v = \sum_v P_v \lambda_k \,|_{v\in\mathcal{V}(k)}$; es decir, los pagos y cobros totales de las cargas y los generadores. Por otra parte

$$\begin{aligned} \sum_k \lambda_k \sum_l I_{kl}\Phi_l &= \sum_l \sum_k \lambda_k I_{kl}\Phi_l \\ &= \sum_l (\lambda_{e(l)} - \lambda_{s(l)})\Phi_l \end{aligned}$$

con lo que se prueba la propiedad.

Además, debido a la convexidad del problema, se garantiza la transparencia del procedimiento. En efecto:

Propiedad 2

Cada agente puede comprobar de forma independiente sus ofertas han sido correctamente aceptadas o rechazadas conocidos los precios de mercado obtenidos

En efecto, sea $\mathcal{A}$ el conjunto de los agentes, y $\mathcal{C}_a(k)$ y $\mathcal{V}_a(k)$ el conjunto de ofertas de compra y venta del agente a en la zona k. Entonces, es posible eliminar las restricciones de equilibrio compra-venta del problema de optimización original y substituirlo por el problema equivalente:

$$
\begin{array}{llr}
\min & \sum_{a\in\mathcal{A}} \left(\sum_{v\in\mathcal{V}_a} \pi_v P_v - \sum_{c\in\mathcal{C}_a} \pi_c P_c\right) + \sum_l p_l \Phi_l + & \\
& \sum_{a\in\mathcal{A}} \sum_k \lambda_k \left(\sum_{c\in\mathcal{C}_a(k)} P_c - \sum_{v\in\mathcal{V}_a(k)} P_v\right) - \sum_{k,l} \lambda_k I_{kl} \Phi_l = 0 & \\
\text{s.a.} & 0 \le P_v \le \overline{P_v} & \forall v : \underline{\mu_v}, \overline{\mu_v} \\
& 0 \le P_c \le \overline{P_c} & \forall c : \underline{\mu_c}, \overline{\mu_c} \\
& 0 \le \Phi_l \le \overline{\Phi_l} & \forall l : \underline{\nu_l}, \overline{\nu_l}
\end{array}
$$

Es inmediato comprobar que, conocidos los λ_k, este problema se descompone en una serie de problemas desacoplados por agente.

4 Reglas de reparto

En determinados casos, la solución del problema de optimización propuesto pudiera estar degenerada, es decir, pudieran existir varias soluciones con un mismo valor óptimo de la función objetivo. Esto ocurrirá, por ejemplo, si en una zona determinada existen dos ofertas marginales al mismo precio. La casación de estas ofertas incorpora un elemento normativo adicional, que es lo que se denomina regla de reparto.

Existen dos posibles tipos de degeneraciones:

1. Degeneración del problema **primal**, es decir, en las cantidades casadas.

2. Degeneración del problema **dual**, es decir, en el precio de mercado.

En un algoritmo como el que aquí se describe las reglas de reparto se pueden establecer como un problema lineal. Por ejemplo, en el caso de la degeneración primal, el conjunto $\mathcal{S}^d$ de soluciones degeneradas es un simplex descriptible mediante restricciones lineales. Si se desea procurar que, con objeto de romper la degeneración, las cantidades aceptadas sean proporcionales a las ofertadas[2] se podría plantear el problema lineal:

$$\begin{array}{ll} \min & \sum_{v,v'\neq v}\left|\frac{P_v}{\overline{P}_v}-\frac{P_{v'}}{\overline{P}_{v'}}\right|+\sum_{c,c'\neq c}\left|\frac{P_c}{\overline{P}_c}-\frac{P_{c'}}{\overline{P}_{c'}}\right| \\ \text{s.a.} & \qquad\qquad P_v, P_c \in \mathcal{S}^d \end{array}$$

Es posible que este problema está a su vez degenerado (por ejemplo, en lo referente a los flujos por las interconexiones). El conjunto de degeneración sería también un simplex, lo que permitiría la implementación de reglas de reparto adicionales. Comentarios parecidos se pueden hacer al caso de degeneración dual. Lamentablemente, restricciones de espacio hacen imposible especificar los programas lineales requeridos.

5 Conclusiones

En este artículo se ha expuesto un sistema de casación para sistemas multiárea. Permite el establecimiento de un mercado transparente al tiempo que respeta las restricciones de transporte.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada por D. Carlos Vázquez y D. Javier García.

Referencias

[1] "Revisión de modelos de casación de ofertas para mercados eléctricos". C. Vázquez, M. Rivier, I. J. Pérez-Arriaga. *VI Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Lisboa, Portugal, 1999.*

[2] "Modelo de casación de ofertas para el mercado diario mediante programación lineal-entera". J. García, J. Román, J. Barquín, A. González. *VI Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Lisboa, Portugal, 1999.*

[3] *Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation.* G. B. Sheblé. Kluwer Academic Publishers, 1999.

[2] De forma análoga a la empleada en el sistema español.