



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 271 536**

⑤1 Int. Cl.:

G05B 1/00 (2006.01)

G05B 13/04 (2006.01)

G05B 11/42 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑧6 Número de solicitud europea: **03707337 .6**

⑧6 Fecha de presentación : **09.01.2003**

⑧7 Número de publicación de la solicitud: **1463979**

⑧7 Fecha de publicación de la solicitud: **06.10.2004**

⑤4 Título: **Procedimiento para eliminar la dinámica PID a partir de modelos MPC.**

③0 Prioridad: **10.01.2002 US 43473**

④5 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.04.2007

④5 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.04.2007

⑦3 Titular/es: **Cutler Technology Corporation**
70 NE Loop 410
San Antonio, Texas 78216, US

⑦2 Inventor/es: **Charles R. Cutler**

⑦4 Agente: **Curell Suñol, Marcelino**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para eliminar la dinámica PID a partir de modelos MPC.

5 Campo técnico

La presente invención se refiere al campo técnico del control multivariable de procesos complejos tales como plantas de fabricación químicas o refinerías de petróleo. Se da a conocer un procedimiento de eliminación de la dinámica de los controladores PID a partir de un Controlador Predictivo basado en Modelo que se desarrolló utilizando verificación de identificación de un proceso. Esto permite la creación de simuladores de proceso fuera de línea basados en válvulas y proporciona procedimientos para generar nuevos controladores MPC para el control de procesos multivariables complejos cuando se ha realizado un cambio en cualquier configuración o sintonización de control PID y hacerlo sin necesidad de efectuar una nueva verificación de identificación del proceso.

15 Antecedentes de la invención

El Controlador Predictivo basado en Modelo (MPC) se refiere a una clase de algoritmo que calcula una secuencia de ajustes variable manipulada para optimizar el futuro comportamiento de los procesos multivariables complejos. Originalmente desarrollado para satisfacer las necesidades de los procesos de las refinerías de petróleo y de los procesos químicos, el MPC puede encontrarse actualmente en una amplia variedad de áreas de aplicación que comprende los sectores químico, de procesamiento de alimentos, de la automoción, aeroespacial, metalúrgico y de la pulpa y el papel. Una implementación bien conocida del MPC en aplicaciones químicas y de refinería es el Control Dinámico Matricial o DMC.

El controlador MPC utiliza un modelo de software del proceso para predecir el efecto de cambios anteriores de la variable manipulada y de las perturbaciones mensurables en las variables de salida de interés. Las variables independientes se calculan para optimizar el comportamiento futuro del sistema durante un intervalo de tiempo conocido como horizonte de predicción. En el caso general puede utilizarse para la optimización cualquier función objetivo deseada. La dinámica del sistema se describe mediante un modelo de proceso explícito, el cual, en principio, puede tomar diversas formas matemáticas. Las restricciones de entrada y salida del proceso se incluyen directamente en la formulación de problemas para prever y evitar futuras violaciones de las mismas.

En la práctica se han desarrollado y comercializado diversos enfoques diferentes de la implementación de controladores MPC. Las implementaciones de mayor éxito se han efectuado utilizando un modelo lineal para la dinámica de planta. El modelo lineal se desarrolla en una primera etapa reuniendo datos en el proceso mediante la introducción de perturbaciones de prueba en las variables independientes y midiendo los efectos de las perturbaciones en las variables dependientes. Esta etapa inicial se denomina identificación y la utilización novedosa de esta etapa de identificación es la esencia de esta invención.

La patente US nº 5.347.446 da a conocer un procedimiento de MPC en el cual las funciones de coste y las condiciones límite pueden transformarse para ser condicionales sólo en las variables manipuladas del modelo. Las patentes US nº 4.349.869 y nº 4.616.308 describen una implementación del control MPC denominada Control Dinámico Matricial (DMC). Estas patentes describen los algoritmos MPC basándose en modelos lineales de una planta y describen cómo se incluyen las restricciones del proceso en la formulación de problemas. También describen la identificación inicial del controlador MPC utilizando datos de proceso.

En otras técnicas anteriores, esta identificación de la dinámica del proceso requiere un ensayo previo en el cual las variables independientes del proceso se desplazan siguiendo algunas pautas para determinar el efecto en las variables dependientes. En un proceso químico o de refinería, las variables independientes comprenden los valores de referencia del controlador PID (proporcional-integral-derivado) para variables dependientes seleccionadas, las posiciones de válvula de los controladores PID en modo manual, y temperaturas, flujos de material, presiones y composiciones determinadas fuera del ámbito del dominio del controlador. En el caso de cualquier comprobación de la identificación del proceso, las variables independientes se fijan para el análisis de los datos. Además, se fija la sintonización de cualquiera de los controladores PID en el dominio del controlador MPC. El controlador MPC, que está construido para utilizar los modelos de procesos dinámicos a partir de la identificación, debe presentar exactamente la misma configuración de las variables independientes que existían cuando se realizó la identificación. Por lo tanto, la configuración del controlador PID presente durante la identificación encaja la dinámica del controlador PID en el modelo dinámico.

Esta característica de la tecnología de identificación actual representa un problema sin resolver que es el objetivo de esta invención. El problema crea una limitación en la utilización de la tecnología MPC que se manifiesta ella misma en dos áreas diferentes.

El primer área de aplicación es el propio MPC. Debido a que la dinámica de los controladores PID está encajada en el modelo MPC, cualquier cambio en la sintonización de un controlador PID o cambio del estado del PID de automático a manual o viceversa modifica el modelo dinámico. Para corregir esta modificación ha sido necesario volver a comprobar la unidad de proceso en las condiciones cambiadas. Una verificación de identificación bien diseñada para un proceso multivariable complejo podría representar un esfuerzo de 2 a 3 semanas con una planificación cuidadosa y personal experto.

El segundo área de aplicación se refiere al campo de los Simuladores de Entrenamiento para Operadores. Los simuladores de entrenamiento efectivos son importantes para la industria de procesos químicos. Las grandes inversiones en nuevos procesos químicos y las implicaciones de seguridad de los procesos complejos requieren un grupo de operadores bien entrenado. Esto es especialmente importante para las unidades de proceso que permanecen en control informático durante períodos de tiempo extensos, ya que los operadores no disponen de la oportunidad de controlar la unidad. Los modelos MPC se utilizan en la creación de simuladores de entrenamiento, pero los modelos MPC obtenidos a partir de la tecnología de identificación actual distan de ser ideales debido al problema anteriormente mencionado de que la configuración del controlador PID que se encuentra presente durante la identificación encaja el controlador PID en el modelo dinámico. El resultado es que se dificulta el auténtico entrenamiento porque los operadores no pueden cambiar el estado (automático o manual) de los controladores PID sin reducir la fidelidad del modelo. Una inspección de las salas de control en la industria de procesos químicos revelará que raramente se utiliza después de la puesta en marcha cuando el personal operativo ha aprendido que el simulador no permite a los operadores experimentar con cambios de control realistas. Un simulador de entrenamiento basado en un modelo de identificación que presente la fidelidad suficiente para mantener un proceso dentro de las restricciones, visualizar todas las temperaturas, presiones, flujos y posiciones de válvula y permita al operador conmutar cualquier controlador PID a modo manual o automático sería una poderosa herramienta para el entrenamiento.

Los profesionales de este campo han realizado numerosos intentos sin éxito para resolver este problema de la identificación. Un enfoque sería efectuar la verificación de identificación con el esquema de control regulador en modo manual. Evidentemente esto falla porque el proceso no alcanza ningún tipo de régimen permanente. Se han efectuado otros intentos para conducir una verificación de identificación estándar con el esquema regulador en su lugar pero estableciendo a continuación el modelo con las posiciones de válvula como variables independientes. Estos enfoques siempre conducen al fracaso, con resultados erráticos. Se ha reconocido que este enfoque falla porque las posiciones de válvula están correlacionadas y son dinámicas debido a perturbaciones medidas y no medidas que siempre están presentes en una verificación de identificación en el mundo real y, por lo tanto, no son independientes.

El reconocimiento de este hecho y el procedimiento de eliminación del ruido y de las perturbaciones no medidas a partir del conjunto de datos son la esencia de la invención.

Exposición de la invención

Un objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento para la eliminación de la dinámica de los controladores PID del controlador MPC utilizado en un control de proceso multivariable. Esto permite la creación de simuladores de proceso fuera de línea basados en válvulas.

Otro objetivo de la presente invención es disponer un procedimiento de esta clase que pueda utilizarse en diversas implementaciones de controladores MPC.

El procedimiento puede utilizarse para generar nuevos controladores MPC para el control de procesos multivariables complejos cuando se ha realizado un cambio o sintonización en alguna configuración de control PID y para hacerlo sin necesidad de efectuar una nueva verificación de identificación del proceso.

El procedimiento también puede utilizarse para generar un simulador de procesos basado en posiciones de válvula con el efecto de perturbaciones no medidas eliminado para disponer de un simulador de procesos de alta fidelidad para entrenamiento y simulación de procesos. Un simulador de esta clase podría utilizarse para simulación en cualquier configuración de controlador y con diversas configuraciones de sintonización en cada controlador individual.

Según la presente invención, se dispone un procedimiento utilizado en aplicaciones de control predictivo basado en modelo para eliminar dinámicas de controladores PID de un modelo de controlador de un proceso que presenta una pluralidad de variables manipuladas independientemente controlables y, por lo menos, una variable controlada dependiente de las variables manipuladas controlables de forma independiente, que comprende, por lo menos, las etapas siguientes: reunión de datos sobre el proceso introduciendo separadamente una perturbación de prueba en cada una de las variables manipuladas y midiendo el efecto de la variable de perturbación; utilización de los efectos de las perturbaciones sobre la variable controlada para generar un primer modelo de matriz linealizada que relaciona la por lo menos una variable controlada con las variables manipuladas controlables de forma independiente; intercambio de variables controladas por la posición de válvula seleccionada con sus correspondientes variables de valores de referencia del controlador PID manipuladas, controlables de forma independiente seleccionadas en el primer modelo dinámico linealizado que utiliza matemáticas de eliminación de filas de matriz para generar un segundo modelo dinámico linealizado que presenta un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de forma independiente, presentando el segundo modelo la dinámica de las variables de los valores de referencia del controlador PID manipulado, controlables de forma independiente, eliminadas del modelo.

Para utilizar este modelo en un contexto de control, el procedimiento comprende el control de un proceso que presenta una pluralidad de variables manipuladas, controlables de forma independiente y, por lo menos, una variable controlada dependiente de las variables manipuladas, controlables de forma independiente, que comprende, por lo menos, las etapas siguientes: reunión de datos sobre el proceso introduciendo separadamente una perturbación de prueba en cada una de las variables manipuladas y midiendo el efecto de las perturbaciones en la variable controlada; utilización de los efectos de las perturbaciones sobre la variable controlada para generar un primer modelo dinámico

linealizado que relaciona la por lo menos una variable controlada con las variables manipuladas controlables de forma independiente; intercambio de variables controladas por la posición de válvula seleccionada con sus correspondientes variables de valores de referencia del controlador PID manipuladas, controlables de forma independiente seleccionadas en el primer modelo dinámico linealizado que utiliza matemáticas de eliminación de filas de matriz para generar un segundo modelo dinámico linealizado que presenta un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de forma independiente, presentando el segundo modelo dinámico linealizado la dinámica de las variables de los valores de referencia del controlador PID manipulado, controlables de forma independiente, eliminadas del modelo dinámico linealizado; medición del valor actual de las variables; cálculo para intervalos de tiempo discretos, a partir de los datos recogidos sobre el proceso, los valores actuales medidos y las restricciones operativas previamente seleccionadas, de un conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros para obtener, por lo menos para las variables manipuladas, nuevos valores de las variables manipuladas y desplazar la por lo menos una variable controlable dependiente hacia por lo menos una de las restricciones; y cambio del proceso ajustando las variables manipuladas para el conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros para hacer que el proceso desplace por lo menos una variable controlable dependiente hacia por lo menos una de las restricciones.

Para utilizar esta invención para generar controladores MPC para el control de procesos multivariable complejo cuando se ha realizado un cambio en alguna configuración o sintonización de control PID y hacerlo sin necesidad de realizar una nueva verificación de identificación del proceso, puede utilizarse el procedimiento siguiente: intercambiando por lo menos una variable de punto de referencia de controlador PID en un modelo dinámico linealizado original, con su correspondiente variable controlada por la posición de la válvula en el modelo dinámico linealizado original, que utiliza matemáticas de eliminación de filas de matriz para generar un modelo dinámico linealizado secundario que presenta la por lo menos una posición de válvula correspondiente como nueva variable manipulada, controlable de forma independiente; a continuación, emulación externa de la nueva sintonización de PID deseada a través del emulador matemático para emular el efecto de por lo menos una nueva sintonización de controladores PID con el modelo dinámico linealizado secundario; a continuación, verificación del modelo dinámico linealizado secundario con su sintonización de PID emulada desplazando gradualmente cada una de sus variables manipuladas para obtener el nuevo modelo dinámico linealizado que ahora comprenderá la dinámica de por lo menos un controlador PID.

Debe tenerse en cuenta que puede efectuarse fácilmente la emulación externa al proceso de un esquema de control regulador mediante una consola DCS o emulador de consola disponible en paquetes de control modernos. Esto permite al operador instalar controladores PID en modo manual, interrumpir cascadas, volver a sintonizar el controlador PID, o incluso reconfigurar el esquema de control regulador.

Para utilizar esta invención para generar un simulador de procesos basado en posiciones de válvula con el efecto de las perturbaciones no medidas eliminado para disponer de un simulador de procesos de alta fidelidad para la simulación de procesos y el entrenamiento se utiliza el procedimiento siguiente: en primer lugar reunión de datos sobre el proceso introduciendo separadamente una perturbación de prueba en cada una de las variables manipuladas y midiendo el efecto de las perturbaciones en la variable perturbada; a continuación utilización de los efectos de las perturbaciones sobre la variable controlada para generar un primer modelo dinámico linealizado que relaciona la por lo menos una variable controlada con las variables manipuladas controlables de forma independiente; a continuación, intercambio de cada una de las variables controlables independientemente de valores de referencia del controlador PID manipuladas con su variable controlada por posición de válvula correspondiente en el primer modelo dinámico linealizado que utiliza matemáticas de eliminación de filas de matriz para generar un segundo modelo dinámico linealizado que presenta las posiciones de válvula correspondientes como un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de forma independiente, presentando el segundo modelo dinámico linealizado la dinámica de las variables seleccionadas manipuladas independientemente de los valores de referencia del controlador PID, eliminadas del modelo dinámico linealizado; a continuación emulación externa de esquemas de control regulador deseados a través de emuladores matemáticos para emular controladores PID en modo manual, cascada o automático. Como anteriormente, debe tenerse en cuenta que puede efectuarse fácilmente la emulación externa al proceso de un esquema de control regulador mediante una consola DCS o emulador de consola disponible en paquetes de control modernos. Esto permite al operador instalar controladores PID en modo manual, interrumpir cascadas, volver a sintonizar el controlador PID, o incluso reconfigurar el esquema de control regulador.

El procedimiento más común de identificación utilizado actualmente en procesos de refinado de petróleo y químicos es el de Identificación de Matrices Dinámicas (DMI). El DMI se utilizará para ilustrar la metodología de esta invención, pero deberá entenderse que la invención no está limitada a una técnica de identificación específica.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un esquema de operaciones de un fraccionador.

La figura 2 es una simulación del modelo de fraccionador basado en posiciones de válvula.

La figura 3 es una exposición de los resultados de una prueba de planta del fraccionador.

La figura 4 es una simulación del fraccionador en los controladores PID.

La figura 5 es una presentación del fraccionador con los valores originales y recuperados.

Mejor forma de realización de la invención

La invención consiste en un procedimiento utilizado conjuntamente con el control predictivo basado en modelo para eliminar la dinámica de los controladores PID de los controladores MPC.

Un modelo de proceso MPC es un conjunto de ecuaciones lineales, de modo que debería ser matemáticamente posible intercambiar cualquier variable independiente con una variable dependiente siempre que exista una relación entre la variable independiente y la variable dependiente. Un conjunto candidato para esta transformación es el valor de referencia (independiente) para un controlador PID y la posición de válvula asociada (dependiente) para este controlador PID.

Un controlador MPC está basado, con frecuencia, en un modelo lineal de un sistema de procesos. Aunque la invención que debe describirse en este documento tiene aplicaciones en muchos campos, se utilizarán ejemplos procedentes de aplicaciones de procesos químicos y de refinería.

Existen dos tipos de variables en cualquier sistema: las variables independientes y las variables dependientes. Las variables independientes son entradas al sistema. Las variables independientes se dividen adicionalmente en variables manipuladas y variables perturbaciones (alimentación positiva). Las variables manipuladas son las que pueden ser modificadas por el operador humano, tales como las posiciones de válvula o los valores de referencia del controlador PID. Las variables de perturbación son las variables independientes que tienen un efecto en el sistema, pero no pueden ser modificadas por el operador humano. Las variables tales como composición de la alimentación, temperatura de alimentación y temperatura ambiente son ejemplos de variables perturbaciones.

Las variables dependientes son salidas del sistema. Las variables dependientes resultan afectadas por cambios en las variables independientes. El operador humano no puede cambiarlas directamente. No obstante, los valores de las variables dependientes pueden controlarse cambiando correctamente los valores de las variables manipuladas. Además, cuando las perturbaciones entran en el sistema, las variables manipuladas deben ajustarse correctamente para contraatacar la perturbación.

La utilización de modelos lineales permite el uso de matemáticas matriciales en la descripción del control complejo y multivariable. Existen diversas formulaciones generales de modelos MPC. Un modelo general para el control es el modelo de respuesta escalonada:

$$\begin{aligned} \delta \bar{O}_1 &= A_{1,1} \Delta \bar{I}_1 + \cdots + A_{1,j} \Delta \bar{I}_j + \cdots + A_{1,nind} \Delta \bar{I}_{nind} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \delta \bar{O}_i &= A_{i,1} \Delta \bar{I}_1 + \cdots + A_{i,j} \Delta \bar{I}_j + \cdots + A_{i,nind} \Delta \bar{I}_{nind} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \delta \bar{O}_{ndep} &= A_{ndep,1} \Delta \bar{I}_1 + \cdots + A_{ndep,j} \Delta \bar{I}_j + \cdots + A_{ndep,nind} \Delta \bar{I}_{nind} \end{aligned}$$

Ecuación 1

Matriz Dinámica de Respuesta Escalonada, Forma de Matriz en Bloques

en la que

$$\delta \bar{O}_i = \begin{bmatrix} O_{i,1} - O_{i,0} \\ O_{i,2} - O_{i,0} \\ O_{i,3} - O_{i,0} \\ \vdots \\ O_{i,ncorf} - O_{i,0} \end{bmatrix},$$

el cambio acumulativo en la variable dependiente i^{th} en cada etapa de tiempo,

$$\bar{A}I_j = \begin{bmatrix} \Delta I_{j,1} \\ \Delta I_{j,2} \\ \Delta I_{j,3} \\ \vdots \\ \Delta I_{j,ncoef} \end{bmatrix},$$

el cambio de etapa en la variable independiente j^{th} en cada etapa de tiempo,

$$A_{i,j} = \begin{bmatrix} a_{i,j,1} & & & & \\ a_{i,j,2} & a_{i,j,1} & & & \\ a_{i,j,3} & a_{i,j,2} & a_{i,j,1} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{i,j,ncoef} & a_{i,j,(ncoef-1)} & a_{i,j,(ncoef-2)} & \cdots & a_{i,j,1} \end{bmatrix},$$

la matriz dinámica.

Una forma alternativa de esta ecuación de respuesta escalonada es la forma de Respuesta impulsiva Finita (FIR). Puede calcularse a partir de la Respuesta Escalonada como se describe a continuación.

Partiendo de las definiciones según las cuales:

$$b_{i,j,k} = a_{i,j,k} \quad \text{for } k = 1,$$

$$b_{i,j,k} = a_{i,j,k} - a_{i,j,(k-1)} \quad \text{for } k : 2 \rightarrow ncoef$$

y

$$\Delta O_{i,k} = O_{i,k} - O_{i,(k-1)} \quad \text{for } k : 1 \rightarrow ncoef$$

se puede diferenciar el sistema de ecuaciones anterior para obtener:

$$\begin{aligned} \bar{A}\bar{O}_1 &= B_{1,1}\bar{A}I_1 \cdots + B_{1,j}\bar{A}I_j \cdots + B_{1,nind}\bar{A}I_{nind} \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \bar{A}\bar{O}_i &= B_{i,1}\bar{A}I_1 \cdots + B_{i,j}\bar{A}I_j \cdots + B_{i,nind}\bar{A}I_{nind} \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \bar{A}\bar{O}_{ndcp} &= B_{ndcp,1}\bar{A}I_1 \cdots + B_{ndcp,j}\bar{A}I_j \cdots + B_{ndcp,nind}\bar{A}I_{nind} \end{aligned}$$

Ecuación 2

Ecuaciones de Respuesta impulsiva Finita - Forma de Matriz en Bloques

en la que

$$\bar{A}\bar{O}_i = \begin{bmatrix} O_{i,1} - O_{i,0} \\ O_{i,2} - O_{i,1} \\ O_{i,3} - O_{i,2} \\ \vdots \\ O_{i,ncoef} - O_{i,(ncoef-1)} \end{bmatrix},$$

el cambio en la variable dependiente j^{th} a través de cada intervalo de tiempo,

$$\bar{A} \bar{I}_j = \begin{bmatrix} \Delta I_{j,1} \\ \Delta I_{j,2} \\ \Delta I_{j,3} \\ \vdots \\ \Delta I_{j,ncorf} \end{bmatrix}$$

como anteriormente, y

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} b_{i,j,1} & & & & \\ b_{i,j,2} & b_{i,j,1} & & & \\ b_{i,j,3} & b_{i,j,2} & b_{i,j,1} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ b_{i,j,ncorf} & b_{i,j,(ncorf-1)} & b_{i,j,(ncorf-2)} & \cdots & b_{i,j,1} \end{bmatrix},$$

la matriz modelo de Coeficientes de Impulso.

Existen cinco formas de estas ecuaciones y sólo se han mostrado las dos primeras. Aunque estas formas son matemáticamente equivalentes, y aunque pueden utilizarse todas las formas para control y predicción de identificación, presentan propiedades muy diferentes.

$\delta \bar{O} = A \Delta \bar{I}$ - La utilizada con mayor frecuencia para los cálculos de control

$\Delta \bar{O} = B \Delta \bar{I}$ - Utilizada para identificación de variables en régimen permanente

$\Delta \Delta \bar{O} = B \Delta \Delta \bar{I}$ - Utilizada para identificación de variables de rampa

$\delta \bar{O} = B \delta \bar{I}$ - No utilizada comúnmente. Antigua formulación de control IDCOM

$\Delta \bar{O} = A \Delta \Delta \bar{I}$ - No utilizada comúnmente.

C.R.Cutler y C.R. Johnston tratan las propiedades de estas formas de la matriz en el artículo "Análisis de las Formas de la Matriz Dinámica", Proceedings of the Instrument Society of America ISA 85 Advances in Instrumentation Volumen 40, Número 1 - Octubre 1985.

La utilización de estas técnicas de modelado lineales, incluyendo la identificación del modelo y la utilización del modelo para control y la utilización en control con restricciones se describe en dos patentes US n° 4.349.869 y n° 4.616.308.

Ahora se calculará el algoritmo de esta invención para demostrar la eliminación de las dinámicas PID a partir del controlador. El cálculo se realiza a partir del modelo FIR de la ecuación 2. Para calcular el algoritmo, se supondrá que la variable independiente $\hat{j}^{\text{th}}$ es el valor de referencia de un controlador PID y la variable dependiente $\hat{i}^{\text{th}}$ es la respuesta de válvula PID a este cambio de valor de referencia. Se desea reconstituir el modelo para que la válvula sea la variable independiente en el modelo de proceso: es decir, se desea eliminar la dinámica de este controlador PID de todas las respuestas del modelo afectadas. Esto puede hacerse intercambiando la variable dependiente $\hat{i}^{\text{th}}$ por la variable dependiente $\hat{j}^{\text{th}}$, como sigue:

$$\begin{bmatrix} B_{1,1} & \cdots & B_{1,(j-1)} & B_{1,j} & B_{1,(j+1)} & \cdots & B_{1,ncorf} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{(i-1),1} & \cdots & B_{(i-1),(j-1)} & B_{(i-1),j} & B_{(i-1),(j+1)} & \cdots & B_{(i-1),ncorf} \\ B_{i,1} & \cdots & B_{i,(j-1)} & B_{i,j} & B_{i,(j+1)} & \cdots & B_{i,ncorf} \\ B_{(i+1),1} & \cdots & B_{(i+1),(j-1)} & B_{(i+1),j} & B_{(i+1),(j+1)} & \cdots & B_{(i+1),ncorf} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{ndep,1} & \cdots & B_{ndep,(j-1)} & B_{ndep,j} & B_{ndep,(j+1)} & \cdots & B_{ndep,ncorf} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{(j-1)} \\ \Delta \bar{I}_j \\ \Delta \bar{I}_{(j+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{ncorf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & I & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & I & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & I & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{(i-1)} \\ \Delta \bar{O}_i \\ \Delta \bar{O}_{(i+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

5 en la que, $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$ la matriz de identidad.

10 Puede apreciarse que se trata simplemente de la ecuación anterior con una matriz de identidad que multiplica las ΔO .

15 Efectuando ahora operaciones de eliminación de filas (girando), se obtiene:

20
$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} & \cdots & \hat{B}_{1,(j-1)} & 0 & \hat{B}_{1,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{1,nind} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} & \cdots & \hat{B}_{(i-1),(j-1)} & 0 & \hat{B}_{(i-1),(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{(i-1),nind} \\ \hat{B}_{i,1} & \cdots & \hat{B}_{i,(j-1)} & -I & \hat{B}_{i,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{i,nind} \\ \hat{B}_{(i+1),1} & \cdots & \hat{B}_{(i+1),(j-1)} & 0 & \hat{B}_{(i+1),(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{(i+1),nind} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} & \cdots & \hat{B}_{ndep,(j-1)} & 0 & \hat{B}_{ndep,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{ndep,nind} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{(j-1)} \\ \Delta \bar{I}_j \\ \Delta \bar{I}_{(j+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{nind} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \cdots & 0 & -\hat{B}_{1,j} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & I & -\hat{B}_{(i-1),j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -\hat{B}_{i,j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -\hat{B}_{(i+1),j} & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -\hat{B}_{ndep,j} & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{(i-1)} \\ \Delta \bar{O}_i \\ \Delta \bar{O}_{(i+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

30

Que puede reescribirse como:

35
$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} \\ \hat{B}_{i,1} \\ \hat{B}_{(i+1),1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_1 + \cdots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j-1)} \\ \hat{B}_{i,(j-1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j-1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j-1)} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_j + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j+1)} \\ \hat{B}_{i,(j+1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j+1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j+1)} + \cdots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,nind} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),nind} \\ \hat{B}_{i,nind} \\ \hat{B}_{(i+1),nind} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,nind} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{nind}$$

40

45

50
$$= \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_1 + \cdots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i-1)} + \begin{bmatrix} -\hat{B}_{1,j} \\ \vdots \\ -\hat{B}_{(i-1),j} \\ -\hat{B}_{i,j} \\ -\hat{B}_{(i+1),j} \\ \vdots \\ -\hat{B}_{ndep,j} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i+1)} + \cdots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{ndep}$$

55

60

Que puede reordenarse para:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} \\ \hat{B}_{i,1} \\ \hat{B}_{(i+1),1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_1 + \cdots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j-1)} \\ \hat{B}_{i,(j-1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j-1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j-1)} + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,j} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),j} \\ \hat{B}_{i,j} \\ \hat{B}_{(i+1),j} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,j} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_i + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j+1)} \\ \hat{B}_{i,(j+1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j+1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j+1)} + \cdots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(i+1),ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{ndep} \\
 & = \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_1 + \cdots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i-1)} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_j + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ I \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i+1)} + \cdots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{ndep}
 \end{aligned}$$

o recomponer la ecuación matriz, obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} & \cdots & \hat{B}_{1,(j-1)} & \hat{B}_{1,j} & \hat{B}_{1,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} & \cdots & \hat{B}_{(i-1),(j-1)} & \hat{B}_{(i-1),j} & \hat{B}_{(i-1),(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{(i-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,1} & \cdots & \hat{B}_{i,(j-1)} & \hat{B}_{i,j} & \hat{B}_{i,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(i+1),1} & \cdots & \hat{B}_{(i+1),(j-1)} & \hat{B}_{(i+1),j} & \hat{B}_{(i+1),(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{(i+1),ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} & \cdots & \hat{B}_{ndep,(j-1)} & \hat{B}_{ndep,j} & \hat{B}_{ndep,(j+1)} & \cdots & \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{(j-1)} \\ \Delta \bar{O}_i \\ \Delta \bar{I}_{(j+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{ndep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & I & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & I & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & I & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{(i-1)} \\ \Delta \bar{I}_j \\ \Delta \bar{O}_{(i+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

Puede apreciarse que $\Delta \bar{O}_i$ y $\Delta \bar{I}_j$ se han intercambiado de modo que ahora la posición de la válvula es una variable independiente y el valor de referencia PID es una variable dependiente. Esto ilustra la eliminación de la dinámica PID de solamente un controlador PID, pero el algoritmo es claramente general, ya que pueden intercambiarse múltiples pares de variables independiente/dependiente para eliminar la dinámica de múltiples controladores.

Para mayor ilustración a continuación se presenta un ejemplo de problema numérico para mostrar cómo se aplica este enfoque a un controlador predictivo basado en modelo para eliminar la dinámica de un controlador PID específico.

En un modelo FIR con dos (2) variables independientes, dos (2) variables dependientes y cuatro (4) coeficientes de modelo, donde la segunda variable independiente es el valor de referencia de un controlador PID y la segunda variable dependiente es la posición de válvula del controlador PID, se desea reconstituir el modelo con la posición de válvula del PID como variable independiente en lugar del valor de referencia del PID. Esto requiere que la dinámica del controlador PID sea eliminada de todas las respuestas del sistema según el algoritmo previamente citado. Este ejemplo también es válido para las formas $\Delta O = B \Delta I$, $\delta O = B \delta I$, y $\Delta \Delta O = B \Delta \Delta I$ de la ecuación.

ES 2 271 536 T3

Variable dependiente 1

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
5	$b_{1,1,1} = 1,5$	$b_{1,2,1} = 0,5$
	$b_{1,1,2} = 0,6$	$b_{1,2,2} = 0,4$
	$b_{1,1,3} = 0,2$	$b_{1,2,3} = 0,2$
10	$b_{1,1,4} = 0,1$	$b_{1,2,4} = 0,1$

Variable dependiente 2

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
15	$b_{2,1,1} = -0,3$	$b_{2,2,1} = 0,75$
	$b_{2,1,2} = -0,4$	$b_{2,2,2} = 0,25$
	$b_{2,1,3} = -0,1$	$b_{2,2,3} = 0,15$
20	$b_{2,1,4} = -0,05$	$b_{2,2,4} = 0,05$

El problema se especifica en la matriz siguiente

Indicar el elemento de giro

30	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,2	0,6	1,5	0,1	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
35	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	-0,05	-0,1	-0,4	-0,3	0,05	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Multiplicar la ecuación 5 por (-1/0,75)

45	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,2	0,6	1,5	0,1	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
50	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0	0
	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	-0,05	-0,1	-0,4	-0,3	0,05	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 1 y sustituir la ecuación 1

Multiplicar la ecuación 5 por 0,4, añadir a la ecuación 2 y sustituir la ecuación 2

Multiplicar la ecuación 5 por 0,2, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

Multiplicar la ecuación 5 por 0,1, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

Multiplicar la ecuación 5 por 0,25, añadir a la ecuación 6 y sustituir la ecuación 6

Multiplicar la ecuación 5 por 0,15, añadir a la ecuación 7 y sustituir la ecuación 7

Multiplicar la ecuación 5 por 0,05, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

ES 2 271 536 T3

5	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0	0	-0,533	0	0	0
	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	0	1	0	-0,267	0	0	0
	0,14	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	0	1	-0,133	0	0	0
10	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-	-1,333	0	0	0
	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	-	-0,333	1	0	0
	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,2	0	1	0
	-0,03	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,067	0	0	1

Multiplicar la ecuación 6 por $(-1/0,75)$

15

20	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0	0	-0,533	0	0	0
	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	0	1	0	-0,267	0	0	0
	0,14	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	0	0	1 -0,133	0	0	0
25	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,2	0	1	0
	-0,03	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,067	0	0	1

30

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 2 y sustituir la ecuación 2

Multiplicar la ecuación 5 por 0,4, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

Multiplicar la ecuación 5 por 0,2, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

35

Multiplicar la ecuación 5 por 0,25, añadir a la ecuación 7 y sustituir la ecuación 7

Multiplicar la ecuación 5 por 0,15, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

40

45	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0	-0,089	-0,533	0	0
	0,22	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	0	1	-0,044	-0,267	0	0
50	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,089	-0,333	1	0
	0,03	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,2	0	1

Multiplicar la ecuación 7 por $(-1/0,75)$

55

60	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0	-0,089	-0,533	0	0
	0,22	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	0	1	-0,044	-0,267	0	0
65	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,199	0,4444	-1,333	0
	0,03	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,2	0	1

ES 2 271 536 T3

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

Multiplicar la ecuación 5 por 0,4, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

5 Multiplicar la ecuación 5 por 0,25, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

10	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
	0,188	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,003	-0,089	-0,533	0
15	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
	0,01	0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0,030	-0,089	-0,333	1

20 Multiplicar la ecuación 8 por (-1/0,75)

25	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
	0,188	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,003	-0,089	-0,533	0
30	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
	-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,040	0,119	0,444	-1,333

35 Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

40	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
	0,181	0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	-0,017	-0,030	-0,311	-0,667
45	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
	-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,040	0,119	0,444	-1,333

50 Reordenar las ecuaciones

55	1,7	0	0	0	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,96	1,7	0	0	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0,4	0,96	1,7	0	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0,181	0,4	0,96	1,7	0,017	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0
60	0,4	0	0	0	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-0,444	1,333	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	-0,119	-0,444	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0

65 Los nuevos coeficientes de modelo con la dinámica PID eliminada son los siguientes:

Variable dependiente 1

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
5	$\hat{b}_{1,1,1} = 1,7$	$\hat{b}_{1,2,1} = 0,667$
	$\hat{b}_{1,1,2} = 0,96$	$\hat{b}_{1,2,2} = 0,311$
	$\hat{b}_{1,1,3} = 0,4$	$\hat{b}_{1,2,3} = 0,030$
10	$\hat{b}_{1,1,4} = 0,181$	$\hat{b}_{1,2,4} = 0,017$

Variable dependiente 2

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
15	$\hat{b}_{2,1,1} = 0,4$	$\hat{b}_{2,2,1} = 1,333$
	$\hat{b}_{2,1,2} = 0,4$	$\hat{b}_{2,2,2} = -0,444$
	$\hat{b}_{2,1,3} = -0,08$	$\hat{b}_{2,2,3} = -0,119$
20	$\hat{b}_{2,1,4} = -0,0133$	$\hat{b}_{2,2,4} = 0,040$

Puede apreciarse que todos los valores de coeficiente han cambiado. Este nuevo controlador presenta ahora la dinámica de la segunda variable independiente (un valor de referencia PID) eliminada. Ahora este controlador puede utilizarse para controlar el proceso y el desarrollo de este controlador se ha realizado fuera de línea, sin necesidad de realizar una nueva verificación de identificación en el proceso, con el consiguiente ahorro de tiempo.

Algoritmo para Eliminar Dinámicas PID, forma de Respuesta Escalonada de circuito abierto

En el cálculo y el ejemplo, se ha hablado del algoritmo para eliminar dinámicas PID de un modelo FIR basado en el impulso, o forma derivada de las ecuaciones. Un algoritmo similar puede calcularse a partir de la forma de coeficiente escalonado del modelo $\delta O = A\Delta I$, como se ilustrará a continuación con un ejemplo de problema de 2 variables independientes y 2 variables dependientes. Para los fines de este ejemplo, se supondrá que la segunda variable dependiente y la segunda variable independiente deben intercambiarse. El problema puede escribirse en forma matricial tal como sigue:

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \Delta \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta \bar{O}_1 \\ \delta \bar{O}_2 \end{bmatrix}$$

se efectúa las operaciones de eliminación (giro) para obtener:

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_{1,1} & 0 \\ \hat{B}_{2,1} & -I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \Delta \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - \hat{B}_{1,2} \\ 0 - \hat{C}_{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta \bar{O}_1 \\ \delta \bar{O}_2 \end{bmatrix}$$

Reordenando, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_{1,1} & \hat{B}_{1,2} \\ \hat{B}_{2,1} & \hat{C}_{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \delta \bar{O}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta \bar{O}_1 \\ \Delta \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

Que puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \hat{A}_{1,1}\Delta \bar{I}_1 + \hat{B}_{1,2}\delta \bar{O}_2 &= \delta \bar{O}_1 \\ \hat{B}_{2,1}\Delta \bar{I}_1 + \hat{C}_{2,2}\delta \bar{O}_2 &= \Delta \bar{I}_2 \end{aligned}$$

Recordando que los coeficientes de impulso se han definido como

$$\begin{aligned} b_{i,j,k} &= a_{i,j,k} & \text{para } k = 1 \\ b_{i,j,k} &= a_{i,j,k} - a_{i,j,(k-1)} = \Delta a_{i,j,k} & \text{para } k = 2 \rightarrow \text{ncoef} \end{aligned}$$

ES 2 271 536 T3

se define similarmente los segundos coeficientes de diferencia como

$$\begin{aligned} c_{i,j,k} &= b_{i,j,k} & \text{para } k = 1 \\ c_{i,j,k} &= b_{i,j,k} - b_{i,j,(k-1)} = \Delta b_{i,j,k} & \text{para } k = 2 \rightarrow \text{ncoef} \end{aligned}$$

Puede apreciarse que:

$$b_{i,j,m} = \sum_{m=1}^l (c_{i,j,l})$$

$$a_{i,j,k} = \sum_{l=1}^k (b_{i,j,l}) = \sum_{l=1}^k \left(\sum_{m=1}^l (c_{i,j,m}) \right)$$

Puede apreciarse que la matriz es ahora un grupo heterogéneo de coeficientes de respuesta escalonada (A), coeficientes de impulso (B), y segundos coeficientes diferenciales (C). Esto se debe al hecho de que nuestra nueva variable independiente presenta la forma “acumulativa” en lugar de la forma “delta” y la nueva variable presenta la forma “delta” en lugar de la forma “acumulativa”. Para convertir este sistema de ecuación en la forma escalonada y recuperar los coeficientes escalonados, deben realizarse dos etapas:

Etapla 1: Convertir la nueva variable independiente de la forma “acumulativa” a la forma “delta”, $\delta \bar{O}_2 \Rightarrow \Delta \bar{O}_2$.

Etapla 2: Convertir la nueva variable dependiente de la forma “delta” a la forma “acumulativa”, $\Delta \hat{I}_2 \Rightarrow \delta \hat{I}_2$.

Etapla 3: Convertir la nueva variable independiente de la forma “acumulativa” a la forma “delta”.

Esta etapa sólo requiere una reordenación de los términos en las ecuaciones. Puede apreciarse que $\delta \bar{O}_2$ aparece en dos secciones de la matriz:

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,2} \delta \bar{O}_2 \\ \hat{C}_{2,2} \delta \bar{O}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{b}_{1,2,1} (O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{1,2,2} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{1,2,1} (O_{2,2} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{1,2,3} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{1,2,2} (O_{2,2} - O_{2,0}) + \hat{b}_{1,2,1} (O_{2,3} - O_{2,0}) \\ \vdots \\ \hat{c}_{2,2,1} (O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{c}_{2,2,2} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{c}_{2,2,1} (O_{2,2} - O_{2,0}) \\ \hat{c}_{2,2,3} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{c}_{2,2,2} (O_{2,2} - O_{2,0}) + \hat{c}_{2,2,1} (O_{2,3} - O_{2,0}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Ya que

$$\begin{aligned} b_{i,j,k} &= a_{i,j,k} & \text{para } k = 1 \\ b_{i,j,k} &= a_{i,j,k} - a_{i,j,(k-1)} = \Delta a_{i,j,k} & \text{para } k = 2 \rightarrow \text{ncoef} \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} c_{i,j,k} &= b_{i,j,k} & \text{para } k = 1 \\ c_{i,j,k} &= b_{i,j,k} - b_{i,j,(k-1)} = \Delta b_{i,j,k} & \text{para } k = 2 \rightarrow \text{ncoef} \end{aligned}$$

se puede escribir la fórmula anterior como:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_{1,2,1} (O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{a}_{1,2,2} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,1} (O_{2,2} - O_{2,1} + O_{2,0} - O_{2,0}) \\ \hat{a}_{1,2,3} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,2} (O_{2,2} - O_{2,1} + O_{2,0} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,1} (O_{2,3} - O_{2,2} + O_{2,0} - O_{2,0}) \\ \vdots \\ \hat{b}_{2,2,1} (O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{2,2,2} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,1} (O_{2,2} - O_{2,1} + O_{2,0} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{2,2,3} (O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,2} (O_{2,2} - O_{2,1} + O_{2,0} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,1} (O_{2,3} - O_{2,2} + O_{2,0} - O_{2,0}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{a}_{1,2,2}(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,2} - O_{2,1}) \\ \hat{a}_{1,2,3}(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,2}(O_{2,2} - O_{2,1}) + \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,3} - O_{2,2}) \\ \vdots \\ \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{2,2,2}(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,2} - O_{2,1}) \\ \hat{b}_{2,2,3}(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,2}(O_{2,2} - O_{2,1}) + \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,3} - O_{2,2}) \\ \vdots \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{1,2,1}\Delta O_{2,1} \\ \hat{a}_{1,2,2}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{1,2,1}\Delta O_{2,2} \\ \hat{a}_{1,2,3}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{1,2,2}\Delta O_{2,2} + \hat{a}_{1,2,1}\Delta O_{2,3} \\ \vdots \\ \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,1} \\ \hat{b}_{2,2,2}\Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,2} \\ \hat{b}_{2,2,3}\Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,2}\Delta O_{2,2} + \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,3} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{1,2}\Delta\bar{O}_2 \\ \hat{B}_{2,2}\Delta\bar{O}_2 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ (\hat{a}_{1,2,2} - \hat{a}_{1,2,1})(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,2} - O_{2,0}) \\ (\hat{a}_{1,2,3} - \hat{a}_{1,2,2})(O_{2,1} - O_{2,0}) + (\hat{a}_{1,2,2} - \hat{a}_{1,2,1})(O_{2,2} - O_{2,0}) + \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,3} - O_{2,0}) \\ \vdots \\ \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ (\hat{b}_{2,2,2} - \hat{b}_{2,2,1})(O_{2,1} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,2} - O_{2,0}) \\ (\hat{b}_{2,2,3} - \hat{b}_{2,2,2})(O_{2,1} - O_{2,0}) + (\hat{b}_{2,2,2} - \hat{b}_{2,2,1})(O_{2,2} - O_{2,0}) + \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,3} - O_{2,0}) \\ \vdots \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \hat{a}_{1,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{a}_{1,2,2}O_{2,1} - \hat{a}_{1,2,2}O_{2,0} - \hat{a}_{1,2,1}O_{2,1} + \hat{a}_{1,2,1}O_{2,0} + \hat{a}_{1,2,1}O_{2,2} - \hat{a}_{1,2,1}O_{2,0} \\ \hat{a}_{1,2,3}O_{2,1} - \hat{a}_{1,2,3}O_{2,0} - \hat{a}_{1,2,2}O_{2,1} + \hat{a}_{1,2,2}O_{2,0} + \hat{a}_{1,2,2}O_{2,2} - \hat{a}_{1,2,2}O_{2,0} - \hat{a}_{1,2,1}O_{2,2} + \hat{a}_{1,2,1}O_{2,0} + \hat{a}_{1,2,1}O_{2,3} - \hat{a}_{1,2,1}O_{2,0} \\ \vdots \\ \hat{b}_{2,2,1}(O_{2,1} - O_{2,0}) \\ \hat{b}_{2,2,2}O_{2,1} - \hat{b}_{2,2,2}O_{2,0} - \hat{b}_{2,2,1}O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,1}O_{2,0} + \hat{b}_{2,2,1}O_{2,2} - \hat{b}_{2,2,1}O_{2,0} \\ \hat{b}_{2,2,3}O_{2,1} - \hat{b}_{2,2,3}O_{2,0} - \hat{b}_{2,2,2}O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,2}O_{2,0} + \hat{b}_{2,2,2}O_{2,2} - \hat{b}_{2,2,2}O_{2,0} - \hat{b}_{2,2,1}O_{2,2} + \hat{b}_{2,2,1}O_{2,0} + \hat{b}_{2,2,1}O_{2,3} - \hat{b}_{2,2,1}O_{2,0} \\ \vdots \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Ya que $\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,2}\delta\bar{O}_2 \\ \hat{C}_{2,2}\delta\bar{O}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{1,2}\Delta\bar{O}_2 \\ \hat{B}_{2,2}\Delta\bar{O}_2 \end{bmatrix}$, se puede reescribir el sistema de ecuaciones como:

$$\begin{aligned}
 \hat{A}_{1,1}\Delta\bar{I}_1 + \hat{A}_{1,2}\Delta\bar{O}_2 &= \delta\bar{O}_1 \\
 \hat{B}_{2,1}\Delta\bar{I}_1 + \hat{B}_{2,2}\Delta\bar{O}_2 &= \Delta\bar{I}_2
 \end{aligned}$$

Esto completa la etapa 1.

Etapa 2: Convertir la nueva variable dependiente de la forma “delta” a la forma “acumulativa”.

Las ecuaciones para la nueva segunda variable dependiente se escriben a continuación. Es necesario acumular estas ecuaciones para convertirlas de la forma “delta” a la forma “acumulativa”.

$$\begin{aligned}
 \hat{b}_{2,1,1}\Delta I_{1,1} &+ \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,1} &= I_{2,1} - I_{2,0} = \Delta I_{2,1} \\
 \hat{b}_{2,1,2}\Delta I_{1,1} + \hat{b}_{2,1,1}\Delta I_{1,2} &+ \hat{b}_{2,2,2}\Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,2} &= I_{2,2} - I_{2,1} = \Delta I_{2,2} \\
 \hat{b}_{2,1,3}\Delta I_{1,1} + \hat{b}_{2,1,2}\Delta I_{1,2} + \hat{b}_{2,1,1}\Delta I_{1,3} &+ \hat{b}_{2,2,3}\Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,2}\Delta O_{2,2} + \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,3} &= I_{2,3} - I_{2,2} = \Delta I_{2,3} \\
 \hat{b}_{2,1,4}\Delta I_{1,1} + \hat{b}_{2,1,3}\Delta I_{1,2} + \hat{b}_{2,1,2}\Delta I_{1,3} + \hat{b}_{2,1,1}\Delta I_{1,4} &+ \hat{b}_{2,2,4}\Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,3}\Delta O_{2,2} + \hat{b}_{2,2,2}\Delta O_{2,3} + \hat{b}_{2,2,1}\Delta O_{2,4} &= I_{2,4} - I_{2,3} = \Delta I_{2,4} \\
 \vdots &\vdots &\vdots
 \end{aligned}$$

ES 2 271 536 T3

Ya que por definición $b = \alpha_{i,j,1} e i_{j,1} - i_{j,0} = \Delta I_{j,1} = \delta I_{j,1}$, La primera ecuación se convierte en:

$$\hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,1} = \delta I_{2,1}$$

Para obtener la segunda ecuación de coeficiente escalonado, se suman las dos primeras ecuaciones de coeficiente de impulso:

$$(\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2}) \Delta I_{1,1} + \hat{b}_{2,1,1} \Delta I_{1,2} + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2}) \Delta O_{2,1} + \hat{b}_{2,2,1} \Delta O_{2,2} = I_{2,2} - I_{2,1} + I_{2,1} - I_{2,0} = I_{2,2} - I_{2,0}$$

o

$$\hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,2} = \delta I_{2,2}$$

Para obtener la tercera ecuación de coeficiente escalonado se suman las tres primeras ecuaciones de coeficiente de impulso:

$$\begin{aligned} & (\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2} + \hat{b}_{2,1,3}) \Delta I_{1,1} + (\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2}) \Delta I_{1,2} + \hat{b}_{2,1,1} \Delta I_{1,3} \\ & + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2} + \hat{b}_{2,2,3}) \Delta O_{2,1} + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2}) \Delta O_{2,2} + \hat{b}_{2,2,1} \Delta O_{2,3} \\ & = I_{2,3} - I_{2,2} + I_{2,2} - I_{2,1} + I_{2,1} - I_{2,0} = I_{2,3} - I_{2,0} \end{aligned}$$

o

$$\hat{a}_{2,1,3} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,3} + \hat{a}_{2,2,3} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,2} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,3} = \delta I_{2,3}$$

Para obtener la cuarta ecuación de coeficiente escalonado, se suman las cuatro primeras ecuaciones de coeficiente de impulso:

$$\begin{aligned} & (\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2} + \hat{b}_{2,1,3} + \hat{b}_{2,1,4}) \Delta I_{1,1} + (\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2} + \hat{b}_{2,1,3}) \Delta I_{1,2} + (\hat{b}_{2,1,1} + \hat{b}_{2,1,2}) \Delta I_{1,3} + \hat{b}_{2,1,1} \Delta I_{1,4} \\ & + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2} + \hat{b}_{2,2,3} + \hat{b}_{2,2,4}) \Delta O_{2,1} + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2} + \hat{b}_{2,2,3}) \Delta O_{2,2} + (\hat{b}_{2,2,1} + \hat{b}_{2,2,2}) \Delta O_{2,3} + \hat{b}_{2,2,1} \Delta O_{2,4} \\ & = I_{2,4} - I_{2,3} + I_{2,3} - I_{2,2} + I_{2,2} - I_{2,1} + I_{2,1} - I_{2,0} = I_{2,4} - I_{2,0} \end{aligned}$$

o

$$\hat{a}_{2,1,4} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,3} \Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,3} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,4} + \hat{a}_{2,2,4} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,3} \Delta O_{2,2} + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,3} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,4} = \delta I_{2,4}$$

De este modo, el sistema de ecuaciones para la segunda variable dependiente se convierte en:

$$\begin{array}{llll} \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,1} & & + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,1} & = I_{2,1} - I_{2,0} = \delta I_{2,1} \\ \hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,2} & & + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,2} & = I_{2,2} - I_{2,0} = \delta I_{2,2} \\ \hat{a}_{2,1,3} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,3} & & + \hat{a}_{2,2,3} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,2} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,3} & = I_{2,3} - I_{2,0} = \delta I_{2,3} \\ \hat{a}_{2,1,4} \Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1,3} \Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,1,2} \Delta I_{1,3} + \hat{a}_{2,1,1} \Delta I_{1,4} & & + \hat{a}_{2,2,4} \Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2,3} \Delta O_{2,2} + \hat{a}_{2,2,2} \Delta O_{2,3} + \hat{a}_{2,2,1} \Delta O_{2,4} & = I_{2,4} - I_{2,0} = \delta I_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array}$$

Y el sistema global de ecuaciones se convierte en:

$\hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,1}$	$+\hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,1}$	$=\delta O_{1,1}$
$\hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,1} + \hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,2}$	$+\hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,2}$	$=\delta O_{1,2}$
$\hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,1} + \hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,2} + \hat{a}_{1,1}\Delta I_{1,3}$	$+\hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,2} + \hat{a}_{1,2}\Delta O_{2,3}$	$=\delta O_{1,3}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\hat{a}_{1,1,coef}\Delta I_{1,1} \dots \dots \dots + \hat{a}_{1,1,coef}\Delta I_{1,coef}$	$+\hat{a}_{1,2,coef}\Delta O_{2,1} \dots \dots \dots + \hat{a}_{1,2,coef}\Delta O_{2,coef}$	$=\delta O_{1,coef}$
$\hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,1}$	$+\hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,1}$	$=\delta I_{2,1}$
$\hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,2}$	$+\hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,2}$	$=\delta I_{2,2}$
$\hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,1} + \hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,2} + \hat{a}_{2,1}\Delta I_{1,3}$	$+\hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,1} + \hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,2} + \hat{a}_{2,2}\Delta O_{2,3}$	$=\delta I_{2,3}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\hat{a}_{2,1,coef}\Delta I_{1,1} \dots \dots \dots + \hat{a}_{2,1,coef}\Delta I_{1,coef}$	$+\hat{a}_{2,2,coef}\Delta O_{2,1} \dots \dots \dots + \hat{a}_{2,2,coef}\Delta O_{2,coef}$	$=\delta I_{2,coef}$

que puede reescribirse como:

$$\begin{aligned}\hat{A}_{1,1}\Delta\bar{I}_1 + \hat{A}_{1,2}\Delta\bar{O}_2 &= \delta \bar{O}_1 \\ \hat{A}_{2,1}\Delta\bar{I}_1 + \hat{A}_{2,2}\Delta\bar{O}_2 &= \delta \bar{I}_2\end{aligned}$$

Para ilustrar mejor la aplicación de esta invención, se da otro ejemplo numérico para mostrar la utilización del algoritmo calculado a partir del modelo de respuesta escalonada de circuito abierto. Este algoritmo se aplica a ecuaciones de la forma $\delta O = \Delta I$. Con un modelo con dos (2) variables independientes, dos (2) variables dependientes y cuatro (4) coeficientes de modelo, en el cual la segunda variable independiente es el valor de referencia de un controlador PID y la segunda variable dependiente es la posición de válvula del controlador PID, se desea reconstituir el modelo con la posición de válvula PID como variable independiente en lugar del valor de referencia PID. Esto requiere la eliminación de la dinámica del controlador PID de todas las respuestas del sistema según el algoritmo previamente citado. El modelo subyacente en este ejemplo es el mismo que el utilizado en el apéndice 2.

Variable dependiente 1

Variable independiente 1	Variable independiente 2
$\alpha_{1,1,1} = 1,5$	$\alpha_{1,2,1} = 0,5$
$\alpha_{1,1,2} = 2,1$	$\alpha_{1,2,2} = 0,9$
$\alpha_{1,1,3} = 2,3$	$\alpha_{1,2,3} = 1,1$
$\alpha_{1,1,4} = 2,4$	$\alpha_{1,2,4} = 1,2$

Variable dependiente 2

Variable independiente 1	Variable independiente 2
$\alpha_{2,1,1} = 0,3$	$\alpha_{2,2,1} = 0,75$
$\alpha_{2,1,2} = -0,7$	$\alpha_{2,2,2} = 1,0$
$\alpha_{2,1,3} = -0,8$	$\alpha_{2,2,3} = 1,15$
$\alpha_{2,1,4} = -0,85$	$\alpha_{2,2,4} = 1,2$

El problema se especifica en la matriz siguiente

ES 2 271 536 T3

Indicar el elemento de giro

5	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2,3	2,1	1,5	0	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	2,4	2,3	2,1	1,5	1,2	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0
	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	-0,8	-0,7	-0,3	0	1,15	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1	0
15	-0,85	-0,8	-0,7	-0,3	1,2	1,15	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1

Multiplicar la ecuación 5 por $(-1/0,75)$

20

25	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2,3	2,1	1,5	0	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	2,4	2,3	2,1	1,5	1,2	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0
30	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0
	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	-0,8	-0,7	-0,3	0	1,15	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	-0,85	-0,8	-0,7	-0,3	1,2	1,15	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0	1

35

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 1 y sustituir la ecuación 1

Multiplicar la ecuación 5 por 0,9, añadir a la ecuación 2 y sustituir la ecuación 2

40

Multiplicar la ecuación 5 por 1,1, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

Multiplicar la ecuación 5 por 1,2, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

45

Multiplicar la ecuación 5 por 1,0, añadir a la ecuación 6 y sustituir la ecuación 6

Multiplicar la ecuación 5 por 1,15, añadir a la ecuación 7 y sustituir la ecuación 7

Multiplicar la ecuación 5 por 1,2, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

50

55	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	-1,200	0	0	0
	2,74	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	1	0	-1,467	0	0	0
	2,88	2,3	2,1	1,5	0	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	-1,600	0	0	0
60	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	-1,333	1	0	0
	-0,34	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0	-1,5	0	1	0
	-0,37	-0,8	-0,7	-0,3	0	1,15	1	0,75	0	0	0	0	-1,600	0	0	1

65

Multiplicar la ecuación 6 por $(-1/0,75)$

ES 2 271 536 T3

5	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	-1,200	0	0	0
	2,74	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	1	0	-1,467	0	0	0
	2,88	2,3	2,1	1,5	0	1,1	0,9	0,5	0	0	0	1	-1,600	0	0	0
10	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	-0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
	-0,34	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0	-1,533	0	1	0
	-0,37	-0,8	-0,7	-0,3	0	1,15	1	0,75	0	0	0	0	-1,600	0	0	1

15 Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 2 y sustituir la ecuación 2

Multiplicar la ecuación 5 por 0,9, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

20 Multiplicar la ecuación 5 por 1,1, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

Multiplicar la ecuación 5 por 1,0, añadir a la ecuación 7 y sustituir la ecuación 7

Multiplicar la ecuación 5 por 1,15, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

30	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	3,1	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0,133	-1,200	0	0
	3,32	2,74	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	0	0,356	-1,467	0	0
35	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
	0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0,244	-1,333	1	0
	0,09	-0,34	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0,444	-1,533	0	1

40 Multiplicar la ecuación 7 por (-1/0,75)

45	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
	3,1	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0,133	-1,200	0	0
	3,32	2,74	2,1	1,5	0	0	0,9	0,5	0	0	0	1	0,356	-1,467	0	0
50	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-0,326	1,778	-1,333	0
	0,09	-0,34	-0,7	-0,3	0	0	1	0,75	0	0	0	0	0,444	-1,533	0	1

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 3 y sustituir la ecuación 3

60 Multiplicar la ecuación 5 por 0,9, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

Multiplicar la ecuación 5 por 1,0, añadir a la ecuación 8 y sustituir la ecuación 8

65

ES 2 271 536 T3

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
3,06	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
3,248	3,1	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,062	0,133	-1,200	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-0,326	1,778	-1,333	0
0,01	0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0,119	0,244	-1,333	1

Multiplicar la ecuación 8 por (-1/0,75)

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1-0,667	0	0	0
2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
3,06	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
3,248	3,1	2,46	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,062	0,133	-1,200	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-0,326	1,778	-1,333	0
-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,158	-0,326	1,778	1,333

Multiplicar la ecuación 5 por 0,5, añadir a la ecuación 4 y sustituir la ecuación 4

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0 - 0,667	0	0	0
2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
3,06	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
3,241	3,06	2,66	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	-0,017	-0,030	-0,311	-0,667
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1,778	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-0,326	1,778	-1,333	0
-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,158	-0,326	1,778	-1,333

Reordenar las ecuaciones

1,7	0	0	0	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2,66	1,7	0	0	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3,06	2,66	1,7	0	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3,241	3,06	2,66	1,7	0,017	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0
0,4	0	0	0	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0 - 1,778	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0,326	-1,778	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0
-0,013	-0,08	0,4	0,4	0,158	0,326	-1,778	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1

ES 2 271 536 T3

Acumular coeficientes para las nuevas segundas variables independientes

5	1,700	0,000	0,000	0,000	0,667	0,000	0,000	0,000
	2,660	1,700	0,000	0,000	0,978	0,667	0,000	0,000
	3,060	2,660	1,700	0,000	1,007	0,978	0,667	0,000
	3,241	3,060	2,660	1,700	1,024	1,007	0,978	0,667
10	0,400	0,000	0,000	0,000	1,333	0,000	0,000	0,000
	0,400	0,400	0,000	0,000	-0,444	1,333	0,000	0,000
	-0,080	0,400	0,400	0,000	-0,119	-0,444	1,333	0,000
15	-0,013	-0,080	0,400	0,400	0,040	-0,119	-0,444	1,333

Acumular coeficientes para las nuevas segundas variables independientes

25	1,700	0,000	0,000	0,000	0,667	0,000	0,000	0,000
	2,660	1,700	0,000	0,000	0,978	0,667	0,000	0,000
	3,060	2,660	1,700	0,000	1,007	0,978	0,667	0,000
	3,241	3,060	2,660	1,700	1,024	1,007	0,978	0,667
30	0,400	0,000	0,000	0,000	1,333	0,000	0,000	0,000
	0,800	0,400	0,000	0,000	0,889	1,333	0,000	0,000
	0,720	0,800	0,400	0,000	0,770	0,889	1,333	0,000
	0,707	0,720	0,800	0,400	0,810	0,770	0,889	1,333

Los nuevos coeficientes de modelo con la dinámica PID eliminada son los siguientes:

Variable dependiente 1

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
45	$\alpha_{1,1,1} = 1,700$ $\alpha_{1,1,2} = 2,660$ $\alpha_{1,1,3} = 3,060$ $\alpha_{1,1,4} = 3,241$	$\alpha_{1,2,1} = 0,667$ $\alpha_{1,2,2} = 0,978$ $\alpha_{1,2,3} = 1,007$ $\alpha_{1,2,4} = 1,024$

Variable dependiente 2

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
55	$\alpha_{2,1,1} = 0,400$ $\alpha_{2,1,2} = 0,800$ $\alpha_{2,1,3} = 0,720$ $\alpha_{2,1,4} = 0,707$	$\alpha_{2,2,1} = 1,333$ $\alpha_{2,2,2} = 0,889$ $\alpha_{2,2,3} = 0,770$ $\alpha_{2,2,4} = 0,810$

Puede apreciarse que todos los valores de los coeficientes han cambiado.

Comprobar que los coeficientes de impulso correspondientes coinciden con los identificados con el ejemplo FIR.

ES 2 271 536 T3

Variable dependiente 1

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
5	$b_{1,1,1} = 1,700$	$b_{1,2,1} = 0,667$
	$b_{1,1,2} = 0,960$	$b_{1,2,2} = 0,311$
	$b_{1,1,3} = 0,400$	$b_{1,2,3} = 0,030$
10	$b_{1,1,4} = 0,181$	$b_{1,2,4} = 0,017$

Variable dependiente 2

	Variable independiente 1	Variable independiente 2
15	$b_{2,1,1} = 0,400$	$b_{12,2,1} = 1,333$
	$b_{2,1,2} = 0,400$	$b_{2,2,2} = -0,444$
20	$b_{2,1,3} = -0,080$	$b_{2,2,3} = -0,119$
	$b_{12,1,4} = -0,013$	$b_{2,2,4} = 0,040$

25 Ejemplo de simulación de columna

El ejemplo siguiente muestra otra forma de realización de la utilización del algoritmo. Este ejemplo ilustra lo siguiente:

30 Utilización de un modelo de Respuesta Impulsiva Finita (FIR) basado en válvulas como simulador de procesos.

Prueba de etapa de planta e identificación de un modelo FIR basado en una configuración de control regulador específica.

35 Utilización del algoritmo propuesto para eliminar la dinámica del controlador PID y recuperar el modelo basado en válvulas subyacente.

40 En este ejemplo, se utiliza un modelo FIR basado en posiciones de válvula como modelo de proceso para simular el comportamiento de un fraccionador complejo. El control regulador para el fraccionador consiste en tres controladores de realimentación PI (proporcional/integral). En la simulación se realiza una prueba de etapa de planta utilizando los valores e referencia del controlador regulador. Se obtiene un modelo FIR para el fraccionador basándose en los valores de referencia de los controladores PI. Este modelo basado en el esquema del control regulador se introduce a continuación en el algoritmo para eliminar la dinámica del controlador PI y recuperar el modelo de proceso FIR original.

45 Se apreciará que el término modelo de Respuesta impulsiva Finita (FIR) se utiliza para referirse a la forma de respuesta escalonada de circuito abierto de los modelos, ya que la forma escalonada podría calcularse directamente a partir de los coeficientes de impulso.

50 Descripción de Esquema de fraccionador Complejo

55 El esquema de Fraccionador Complejo se muestra en la figura 1. El caudal del flujo de alimentación 5 se controla mediante la unidad aguas arriba y se precalienta en un horno 6. El fraccionador 7 presenta un producto superior, un producto medio y un producto inferior. La temperatura superior se controla con un controlador 8 que elimina el reflujo superior. La temperatura de salida del producto medio se controla mediante un controlador PI 9 que cambia el caudal de salida del producto medio. Un tercer controlador PI 10 cambia el caudal de producto inferior para controlar el nivel inferior del fraccionador. La composición del producto inferior (componente ligero) se mide con un analizador 11.

Descripción del Modelo de Respuesta impulsiva Finita (FIR)

60 El modelo de proceso utilizado en este ejemplo es un modelo de respuesta escalonada, de circuito abierto, basado en las posiciones de válvula, resumidas del modo siguiente:

Variables independientes del modelo

65 TIC-2001.OP- Válvula de Flujo de Reflujo Superior

ES 2 271 536 T3

TIC-2002.OP-	Válvula de Flujo de Producto Medio
LIC-2007.OP-	Válvula de Flujo de Producto Inferior
5 FIC-2004.SP-	Caudal del Flujo de Reflujo Medio
FI-2005.PV-	Caudal de Alimentación del Fraccionador

Variables dependientes del modelo

TIC-2001.PV-	Temperatura de la parte Superior del Fraccionador
TIC-2002.PV-	Temperatura de Salida del Producto Medio
15 LIC-2007.PV-	Nivel Inferior del Fraccionador
AI-2022.PV-	Composición Inferior del Fraccionador (Componente Ligero)

El modelo de respuesta escalonada de circuito abierto puede considerarse en sentido idealizado como habiendo sido generado del modo siguiente. Con el sistema en régimen permanente, las primeras variables independientes se incrementan mediante una unidad de ingeniería en el tiempo = 0, mientras todas las demás variables independientes se mantienen constantes. A continuación, los valores de todas las variables dependientes se miden a intervalos de tiempo espaciados uniformemente hasta que el sistema vuelve a alcanzar el régimen permanente. Las curvas de respuesta de modelo para cada variable dependiente respecto a la primera variable independiente se calculan a continuación restando el valor de la variable dependiente en el tiempo = 0 de cada uno de los valores medidos a cada uno de los intervalos de tiempo futuros para estas variables dependientes. Esencialmente, una curva de respuesta escalonada representa el efecto en la variable dependiente de un cambio en la variable independiente. A continuación, este proceso se repite de forma sucesiva para todas las variables independientes, con el fin de generar el modelo completo. El tiempo de régimen permanente para el modelo se define por el tiempo de régimen permanente de la curva de respuesta más lenta del sistema.

Evidentemente, en el mundo real, el modelo no puede generarse de este modo, ya que con frecuencia el proceso no se encuentra en régimen permanente. Además, resulta imposible evitar que perturbaciones no medidas afecten al sistema durante una etapa de variable independiente. La generación del modelo requiere la realización de múltiples etapas en cada variable independiente (prueba de etapa de planta). Los datos así recogidos se analizan a continuación con un paquete de software tal como el programa Aspen Tech's DMCplus Model para calcular el modelo de respuesta escalonada de circuito abierto.

Una vez un modelo de este tipo ha sido identificado, puede utilizarse para predecir la respuesta futura del sistema basándose en cambios pasados de las variables independientes. Es decir, si se sabe cómo han cambiado todas las variables independientes para un tiempo de régimen permanente en el pasado, se podrá utilizar el modelo para predecir cómo cambiarán las variables dependientes para un tiempo de régimen permanente en el futuro, suponiendo que no habrá otros cambios de variables independientes. Esto ilustra la utilización del modelo para predicción. (Es la base para la utilización de un modelo FIR como simulador de proceso).

Conociendo la respuesta futura del sistema basándose en la ausencia de más cambios de las variables independientes y las restricciones en todas las variables independientes y dependientes, puede utilizarse el modelo para planear una estrategia de movimientos de variables independientes para mantener todas las variables dependientes e independientes dentro de las restricciones. Esto ilustra la utilización del modelo para control.

Utilización de un Modelo de Respuesta impulsiva Finita (FIR)

El modelo para este ejemplo presenta un tiempo de régimen permanente de noventa (90) minutos. Se utiliza un intervalo de tiempo de tres (3) minutos. Las curvas de respuesta resultantes se definen cada una por un vector de treinta (30) números que representan el cambio acumulativo en esta variable dependiente a través del tiempo respecto a un cambio escalonado en la variable independiente en tiempo = 0, mientras todas las demás variables independientes se mantienen constantes.

Los coeficientes del modelo se muestran en la tabla 1 y los gráficos del modelo se muestran en la figura 2. Este modelo, basado en posiciones de válvula, se utiliza para predecir el comportamiento futuro del sistema en las variables dependientes del modelo basándose en cambios pasados y presentes de las variables independientes del modelo.

ES 2 271 536 T3

TABLA 1

Coefficientes de modelo basado en válvulas de simulación del fraccionador

Coeficientes de Respuesta Escalonada para Variable Dependiente 1: TIC-2001.PV DEG F					
Minutos	TIC-2001.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	FIC-2004.SP +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0	FI-2005.PV +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0
0	0,000	0,000	0,0	0,00	0,0
3	-0,101	-0,048	0,0	-2,05	2,9
6	-0,175	-0,076	0,0	-3,58	6,1
9	-0,206	-0,088	0,0	-4,43	7,5
12	-0,227	-0,068	0,0	-5,03	7,8
15	-0,245	-0,040	0,0	-5,58	8,2
18	-0,262	-0,015	0,0	-6,16	8,5
21	-0,277	0,010	0,0	-6,65	8,6
24	-0,292	0,033	0,0	-7,04	8,9
27	-0,306	0,054	0,0	-7,37	9,0
30	-0,323	0,069	0,0	-7,67	9,3
33	-0,340	0,084	0,0	-7,95	9,5
36	-0,356	0,096	0,0	-8,18	9,6
39	-0,372	0,105	0,0	-8,37	9,8
42	-0,386	0,113	0,0	-8,52	9,8
45	-0,399	0,121	0,0	-8,65	9,8
48	-0,410	0,128	0,0	-8,75	9,9
51	-0,420	0,135	0,0	-8,84	10,0
54	-0,428	0,140	0,0	-8,92	10,1
57	-0,435	0,145	0,0	-8,98	10,3
60	-0,440	0,149	0,0	-9,04	10,4
63	-0,445	0,153	0,0	-9,09	10,5
66	-0,450	0,156	0,0	-9,13	10,5
69	-0,453	0,159	0,0	-9,17	10,5
72	-0,457	0,161	0,0	-9,21	10,5
75	-0,460	0,163	0,0	-9,24	10,4
78	-0,462	0,165	0,0	-9,26	10,4
81	-0,464	0,166	0,0	-9,28	10,4
84	-0,465	0,167	0,0	-9,29	10,4
87	-0,466	0,167	0,0	-9,29	10,4
90	-0,466	0,167	0,0	-9,29	10,5

ES 2 271 536 T3

TABLA 1 (continuación)

Coeficientes de Respuesta Escalonada para Variable Dependiente 2: TIC-2002.PV DEG F					
Minutos	TIC-2001.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	FIC-2004.SP +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0	FI-2005.PV +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0
0	0,000	0,000	0,0	0,00	0,00
3	-0,002	0,020	0,0	-0,28	0,46
6	-0,008	0,052	0,0	-0,73	1,06
9	-0,012	0,081	0,0	-1,26	1,62
12	-0,021	0,118	0,0	-1,77	2,63
15	-0,032	0,157	0,0	-2,23	3,12
18	-0,046	0,201	0,0	-2,64	3,34
21	-0,061	0,242	0,0	-3,06	3,50
24	-0,077	0,277	0,0	-3,40	3,69
27	-0,097	0,308	0,0	-3,67	4,05
30	-0,117	0,335	0,0	-3,93	4,18
33	-0,136	0,360	0,0	-4,19	4,22
36	-0,153	0,380	0,0	-4,42	4,26
39	-0,170	0,396	0,0	-4,62	4,33
42	-0,186	0,407	0,0	-4,78	4,46
45	-0,201	0,416	0,0	-4,90	4,55
48	-0,214	0,423	0,0	-4,99	4,61
51	-0,225	0,430	0,0	-5,07	4,64
54	-0,236	0,436	0,0	-5,13	4,70
57	-0,245	0,440	0,0	-5,19	4,77
60	-0,253	0,445	0,0	-5,23	4,85
63	-0,260	0,449	0,0	-5,27	4,90
66	-0,266	0,452	0,0	-5,30	4,94
69	-0,272	0,455	0,0	-5,33	4,96
72	-0,276	0,458	0,0	-5,36	4,98
75	-0,279	0,460	0,0	-5,38	4,98
78	-0,282	0,462	0,0	-5,40	4,99
81	-0,284	0,463	0,0	-5,42	5,00
84	-0,285	0,464	0,0	-5,44	5,01
87	-0,285	0,465	0,0	-5,45	5,02
90	-0,285	0,465	0,0	-5,46	5,04

ES 2 271 536 T3

TABLA 1 (continuación)

Coeficientes de Respuesta Escalonada para Variable Dependiente 3: LIC-2001.PV %					
Minutos	TIC-2001.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	FIC-2004.SP +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0	FI-2005.PV +1MBBL/D Movimiento en Tiempo = 0
0	0,00	0,00	, 0,0	0,0	0,0
3	0,00	0,00	-0,8	0,0	2,3
6	0,00	0,00	-1,5	0,0	4,5
9	0,11	-0,23	-2,3	1,1	6,8
12	0,23	-0,45	-3,0	2,3	9,0
15	0,34	-0,68	-3,8	3,4	11,3
18	0,45	-0,90	-4,5	4,5	13,5
21	0,56	-1,13	-5,3	5,6	15,8
24	0,68	-1,35	-6,0	6,8	18,0
27	0,79	-1,58	-6,8	7,9	20,3
30	0,90	-1,80	-7,5	9,0	22,5
33	1,01	-2,03	-8,3	10,1	24,8
36	1,13	-2,25	-9,0	11,3	27,0
39	1,24	-2,48	-9,8	12,4	29,3
42	1,35	-2,70	-10,5	13,5	31,5
45	1,46	-2,93	-11,3	14,6	33,8
48	1,58	-3,15	-12,0	15,8	36,0
51	1,69	-3,38	-12,8	16,9	38,3
54	1,80	-3,60	-13,5	18,0	40,5
57	1,91	-3,83	-14,3	19,1	42,8
60	2,03	-4,05	-15,0	20,3	45,0
63	2,14	-4,28	-15,8	21,4	47,3
66	2,25	-4,50	-16,5	22,5	49,5
69	2,36	-4,73	-17,3	23,6	51,8
72	2,48	-4,95	-18,0	24,8	54,0
75	2,59	-5,18	-18,8	25,9	56,3
78	2,70	-5,40	-19,5	27,0	58,5
81	2,81	-5,63	-20,3	28,1	60,8
84	2,93	-5,85	-21,0	29,3	63,0
87	3,04	-6,08	-21,8	30,4	65,3
90	3,15	-6,30	-22,5	31,5	67,5

ES 2 271 536 T3

TABLA 1 (continuación)

Coeficientes de Respuesta Escalonada para Variable Dependiente 4: AL-2022.PV MOLE %					
Minutos	TIC-2001.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% Movimiento en Tiempo = 0	FIC-2004.SP +1MBBUD Movimiento en Tiempo = 0	FI-2005.PV +1MBBUD Movimiento en Tiempo = 0
0	0,00000	0,0000	0,0	0,000	0,000
3	0,00004	0,0004	0,0	0,004	-0,010
6	0,00010	0,0005	0,0	0,008	-0,073
9	-0,00014	0,0008	0,0	0,017	-0,076
12	-0,00006	-0,0007	0,0	0,037	-0,105
15	-0,00003	-0,0034	0,0	0,060	-0,112
18	0,00013	-0,0062	0,0	0,090	-0,104
21	0,00033	-0,0087	0,0	0,114	-0,113
24	0,00075	-0,0109	0,0	0,134	-0,126
27	0,00125	-0,0125	0,0	0,152	-0,124
30	0,00193	-0,0137	0,0	0,165	-0,130
33	0,00277	-0,0145	0,0	0,175	-0,134
36	0,00368	-0,0151	0,0	0,183	-0,137
39	0,00459	-0,0157	0,0	0,189	-0,144
42	0,00542	-0,0161	0,0	0,194	-0,154
45	0,00615	-0,0164	0,0	0,199	-0,161
48	0,00679	-0,0167	0,0	0,203	-0,162
51	0,00733	-0,0170	0,0	0,206	-0,162
54	0,00778	-0,0172	0,0	0,208	-0,163
57	0,00815	-0,0174	0,0	0,211	-0,165
60	0,00846	-0,0175	0,0	0,213	-0,168
63	0,00872	-0,0177	0,0	0,214	-0,171
66	0,00893	-0,0178	0,0	0,216	-0,173
69	0,00911	-0,0179	0,0	0,217	-0,175
72	0,00926	-0,0180	0,0	0,218	-0,176
75	0,00938	-0,0181	0,0	0,219	-0,176
78	0,00948	-0,0182	0,0	0,220	-0,175
81	0,00956	-0,0182	0,0	0,221	-0,175
84	0,00962	-0,0183	0,0	0,222	-0,175
87	0,00966	-0,0184	0,0	0,222	-0,175
90	0,00967	-0,0185	0,0	0,223	-0,175

Como se ha mencionado anteriormente, existen tres controladores PI (Proporcional/Integral) en el sistema. Estos controladores PI están configurados como sigue:

TABLA 2

Controladores PID del Fraccionador

Nombre del circuito PID	Valor Referencia	Variable Proceso	Salida	K _p	K _i
Temperatura Parte Superior	TIC-2001.SP	TIC-2001.PV	TIC-2001.OP	-2,0	3,0
Temperatura Salida Producto Medio	TIC-2002.SP	TIC-2002.PV	TIC-2002.OP	3,0	8,0
Nivel Parte Inferior	LIC-2001.SP	LIC-2001.PV	LIC-2007.OP	-1,0	4,0

Se realizó una prueba de planta (gráficos de datos de la figura 3) con estos controladores PI que regulan el proceso. Las variables independientes y dependientes para el sistema fueron las siguientes:

Variables independientes del modelo

TIC-2001.SP-	Válvula de Flujo de Reflujo Superior SP
TIC-2002.SP-	Válvula de Flujo de Producto Medio SP
LIC-2007.SP-	Válvula de Flujo de Producto Inferior SP
FIC-2004.SP-	Caudal del Flujo de Reflujo Medio
FI-2005.PV-	Caudal de Alimentación del Fraccionador

Variables dependientes del modelo

	TIC-2001.PV-	Temperatura de la parte Superior del Fraccionador
5	TIC-2002.PV-	Temperatura de Salida del Producto Medio
	LIC-2007.PV-	Nivel Inferior del Fraccionador
	TIC-2001.OP-	Válvula de Flujo de Reflujo Superior
10	TIC-2002.OP-	Válvula de Flujo de Producto Medio
	LIC-2007.OP-	Válvula de Flujo de Producto Inferior
15	AI-2022.PV-	Composición Inferior del Fraccionador (Componente Ligero)

Esto ilustra la utilización de un modelo FIR basado en válvula como simulador de proceso. Como se ha descrito anteriormente, los cálculos de control PID se realizaron externamente a la simulación del proceso.

20 Los datos resultantes se analizaron y se identificó un modelo basado en esta configuración PID, como muestra la figura 4.

El nuevo algoritmo para eliminar la dinámica PID se aplicó al modelo que muestra la figura 4, y este modelo con la dinámica PID eliminada se compró con el modelo de simulación original. Como puede apreciarse en la figura 5, el algoritmo recupera con éxito el modelo original basado en válvulas. Se observará que el tiempo de régimen permanente del modelo recuperado es superior al tiempo de régimen permanente del modelo original. Esto es el resultado de un tiempo de régimen permanente más largo para el modelo con los controladores PID. El modelo de simulación basado en válvulas original presenta un tiempo de régimen permanente de 90 minutos. Cuando se configuraron los controladores PID y se realizó la prueba de etapa de planta, el proceso para alcanzar el régimen permanente duró 180 minutos, debido a que tuvo que esperar al restablecimiento del control de realimentación PID. El tiempo de régimen permanente del modelo basado en válvulas recuperado es el mismo tiempo de régimen permanente que el modelo que contienen la dinámica PID a partir del cual se generó. No obstante, puede apreciarse que el modelo recuperado ha alcanzado el régimen permanente en 90 minutos, i si se hubiera interrumpido en este punto, coincidiría exactamente con el modelo basado en válvulas original.

35 Aplicabilidad industrial

En el pasado, cuando los controladores PID se resintonizaban, o cuando el esquema de control regulador se re-configuraba, se realizaba una nueva planta y se construía un nuevo modelo. La invención descrita en este documento elimina la dinámica del controlador PID sin necesidad de efectuar una nueva prueba de planta.

Esta capacidad de eliminar la dinámica PID permite la creación de un simulador de proceso fuera de línea basado solamente en posiciones de válvula en lugar de valores de referencia PID. La prueba de planta puede realizarse con cualquier configuración reguladora estable y puede obtenerse la sintonización de PID y el modelo correspondiente. A 45 continuación se aplica el algoritmo para eliminar la dinámica PID al modelo resultante para eliminar la dinámica de todos los controladores PID y convertir las entradas del modelo de valores de referencia a válvulas. A continuación el esquema de control regulador puede ser emulado externamente al modelo de proceso a través de una consola DSC o emulador de consola. Esto permite al operador colocar los controladores PID en modo manual, interrumpir cascadas, resintonizar el controlador PID o incluso reconfigurar el esquema de control regulador.

50 Respecto a aplicaciones de control basadas en modelo, hay momentos en los cuales es necesario modificar la sintonización de PID de un controlador PID en el sistema. Con la capacidad de eliminar la dinámica PID, puede generarse un modelo basado la válvula de este controlador PID. El cálculo de la simulación fuera de línea puede realizarse a continuación para generar un nuevo modelo de proceso que contienen la nueva sintonización de PID, y este modelo actualizado puede incorporarse al controlador basado en modelo evitando una prueba de etapa de planta. Esta técnica también puede aplicarse si el esquema de control regulador debe reconfigurarse. Se supone que se tiene un valor de referencia de controlador de temperatura como entrada a nuestro modelo. Si esta válvula está pegada y no puede repararse sin desmontar la unidad, el algoritmo podría aplicarse para eliminar la dinámica del controlador de temperatura y la aplicación de control podría continuar utilizándose sin el controlador de temperatura.

60 Otra ventaja de la presente invención es que el proceso puede comprobarse en una configuración reguladora y puede designarse un controlador basado en modelo con una configuración diferente. Un ejemplo es una Unidad de Cracking Catalítico de Lecho Fluidizado (FCCU) en la cual se controla la presión del sistema mediante un controlador PID cambiando la velocidad del Compresor de Gas Húmedo.

65 Con frecuencia, el ajuste más económico para el funcionamiento de la unidad es con el compresor a velocidad máxima, pero en este caso la presión no se controla directamente. Comprobar la unidad con la presión de control

resulta difícil. La solución es comprobar la planta con el controlador PID cambiando la velocidad del compresor, manteniendo la velocidad bajo control. Cuando se obtiene el modelo, se elimina la dinámica PID del controlador de presión y entonces la aplicación de control basada en modelo cambiará la velocidad del compresor directamente. En este ejemplo, la aplicación de control basado en modelo controla la presión del sistema como una salida manipulando otras entradas cuando la velocidad del compresor se encuentra en el punto máximo.

Con frecuencia, al comprobar una unidad, las válvulas de determinados controladores PID se accionan fuera de control durante la verificación de planta. Actualmente estos datos no pueden utilizarse para la construcción del modelo de proceso. Con el nuevo algoritmo, es posible utilizar todos los datos, incluso cuando un controlador PID se encuentra fuera de control. Esto se realiza identificando primero el modelo como antes, utilizando solamente los datos de cuando el controlador PID está bajo control. Este modelo se modifica a continuación para eliminar la dinámica PID y los nuevos datos "se filtran dentro" del modelo.

Por lo tanto, esta nueva invención permitirá la construcción de simuladores de proceso fuera de línea utilizables, de alta fidelidad y mejorará la capacidad de implementación y mantenimiento de aplicaciones de control basado en modelo.

Aunque se ha expuesto y descrito en los dibujos una forma de realización preferida de la invención, puesto que para los expertos en la materia resultarán evidentes variaciones de la misma, la invención no debe entenderse como limitada a las formas específicas mostradas y descritas, sino como se establece en las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento utilizado en aplicaciones de control predictivo basado en un modelo, para la eliminación del efecto de perturbaciones no medidas de la dinámica de un modelo de controlador de un proceso que presenta una pluralidad de variables manipulables controlables independientemente y por lo menos una variable controlada dependiente de dichas variables manipuladas controlables independientemente, que comprende las etapas siguientes:

recoger datos sobre dicho proceso introduciendo separadamente una perturbación de prueba en cada una de dichas variables manipulada y midiendo el efecto de las perturbaciones en dicha variable controlada; y

utilizar dichos efectos de las perturbaciones en dicha variable controlada para generar un primer modelo dinámico linealizado que relaciona dicha por lo menos una variable controlada con dichas variables manipuladas controlables independientemente;

caracterizado por

el intercambio de variables controladas de posición de válvula seleccionada con sus correspondientes variables de valor de referencia de controlador PID manipuladas controlables independientemente de dicho primer modelo dinámico linealizado utilizando matemática de eliminación de filas de matrices para generar un segundo modelo dinámico linealizado que tiene un nuevo conjunto de variables manipulables controlables independientemente, teniendo dicho segundo modelo dinámico linealizado la dinámica de dichas variables de valor de referencia de controlador PID manipuladas controlables independientemente, eliminadas de dicho segundo modelo dinámico.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho primer modelo dinámico linealizado es un modelo de respuesta escalonada.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho primer modelo dinámico linealizado es un modelo de respuesta finita.

4. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además las etapas siguientes:

medir el valor actual de dichas variables;

calcular para intervalos discretos de tiempo, a partir de dichos datos recogidos sobre dicho proceso, dichos valores actuales medidos y restricciones operativas preseleccionadas, un conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros para por lo menos dichas variables manipuladas para obtener nuevos valores para dichas variables manipuladas y para desplazar dicha por lo menos una variable controlable dependiente hacia por lo menos una de dichas restricciones; y

cambiar dicho proceso ajustando dichas variables manipuladas para dicho conjunto de desplazamientos para tiempos presentes y futuros para provocar que dicho proceso desplace dicha por lo menos una variable controlable dependiente hacia por lo menos una de dichas restricciones.

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicho proceso comprende por lo menos una variable incontrolada que es dependiente de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros comprende además el cálculo de dicho conjunto de movimientos de modo que la variable incontrolada esté limitada a una restricción predeterminada.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros comprende además el cálculo de dicho conjunto de movimientos de modo que por lo menos una de dichas variables manipuladas esté limitada a una restricción predeterminada.

7. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos utilizando técnicas de programación cuadrática.

8. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos utilizando técnicas de programación lineal.

9. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros que además comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos para que por lo menos una de dichas variables manipuladas esté limitada a una restricción predeterminada.

10. Procedimiento según la reivindicación 7 ó 8, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros además comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos para que por lo menos una de dichas variables manipuladas esté limitada para una restricción predeterminada.

ES 2 271 536 T3

11. Procedimiento según cualquiera de la reivindicaciones 7 a 9, en el que dicho proceso comprende por lo menos una variable incontrolada que es dependiente de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para el tiempo presente y tiempos futuros además comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos para que dicha variable incontrolada esté limitada a una restricción predeterminada.

5

12. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además las etapas siguientes: emulación externa de esquemas de control regulador deseados mediante de emuladores matemáticos para emular controladores PID en modo manual, cascada o automático.

10

13. Simulador de proceso fuera de línea creado a partir de un modelo dinámico empírico mediante el procedimiento según la reivindicación 12.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

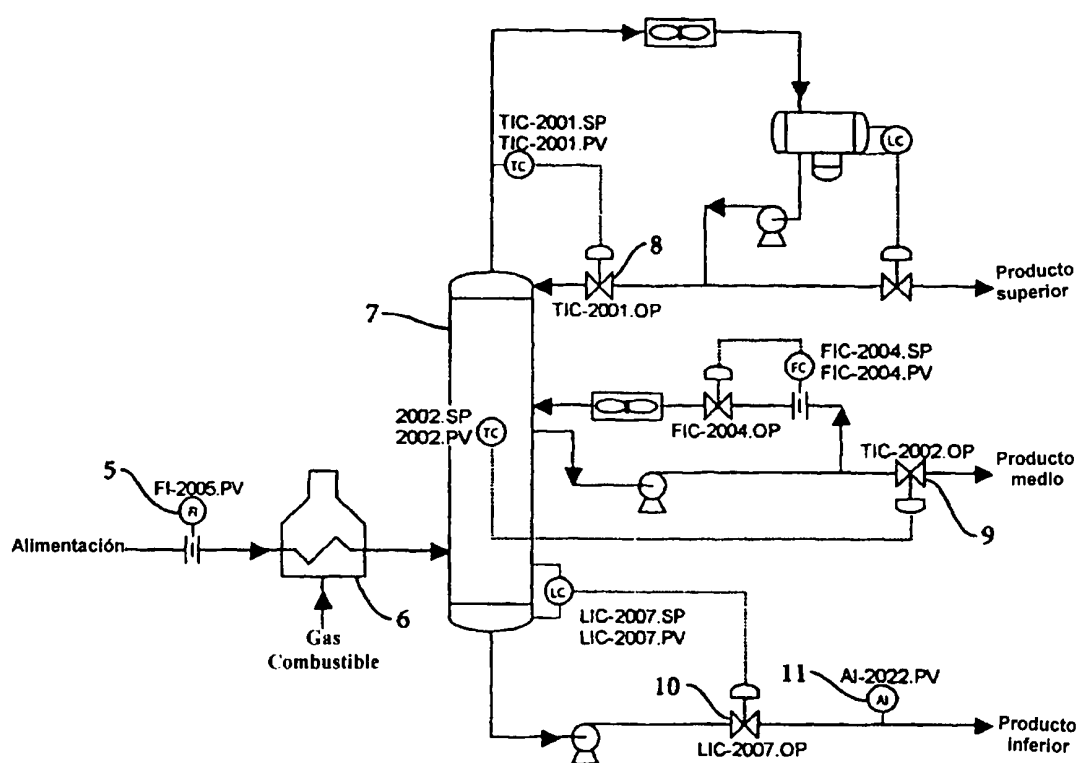


Figura 1/5: Esquema de fraccionador complejo

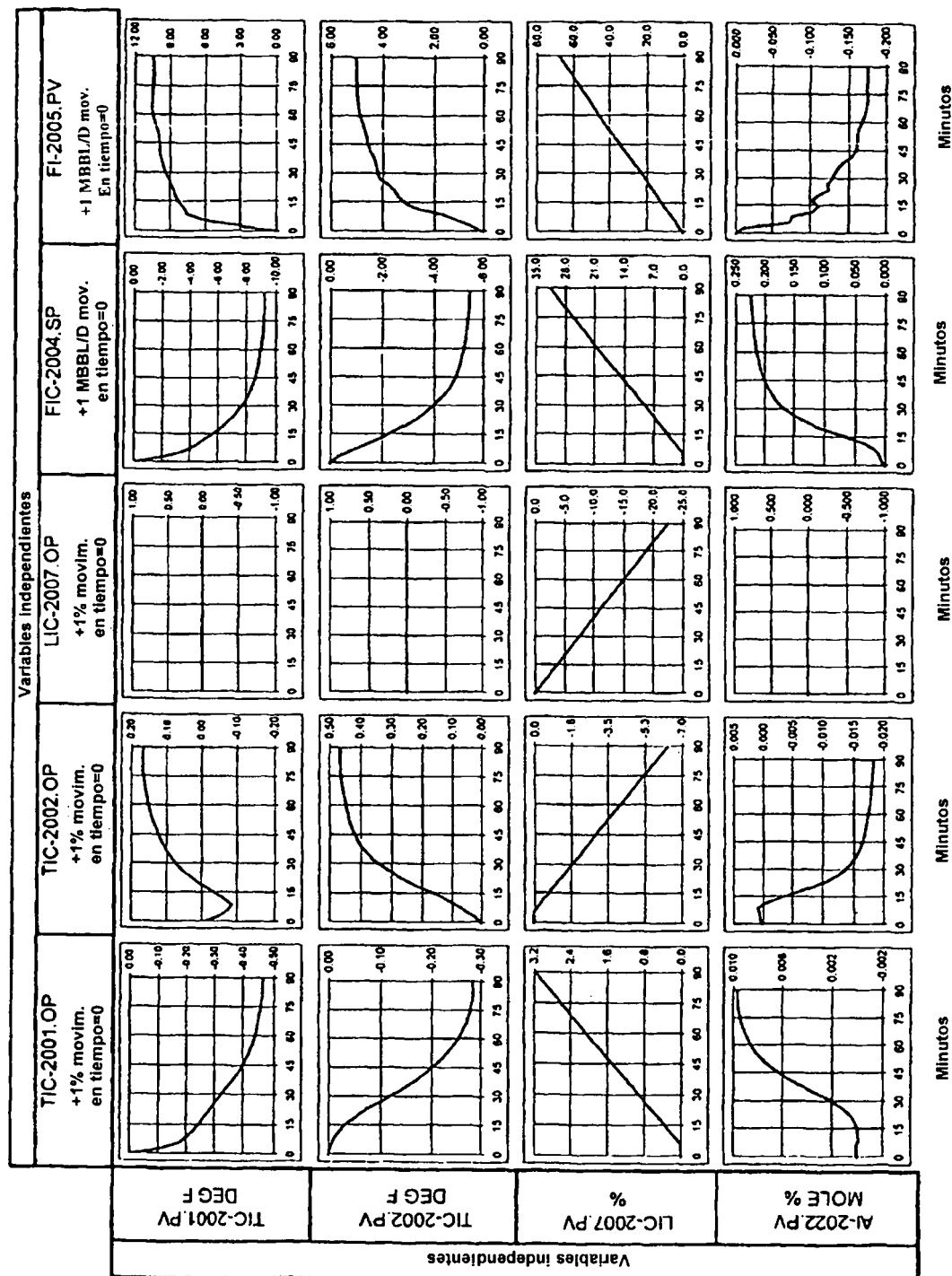


Figura 2/5: Modelo de simulación de fraccionador basado en posiciones de válvula

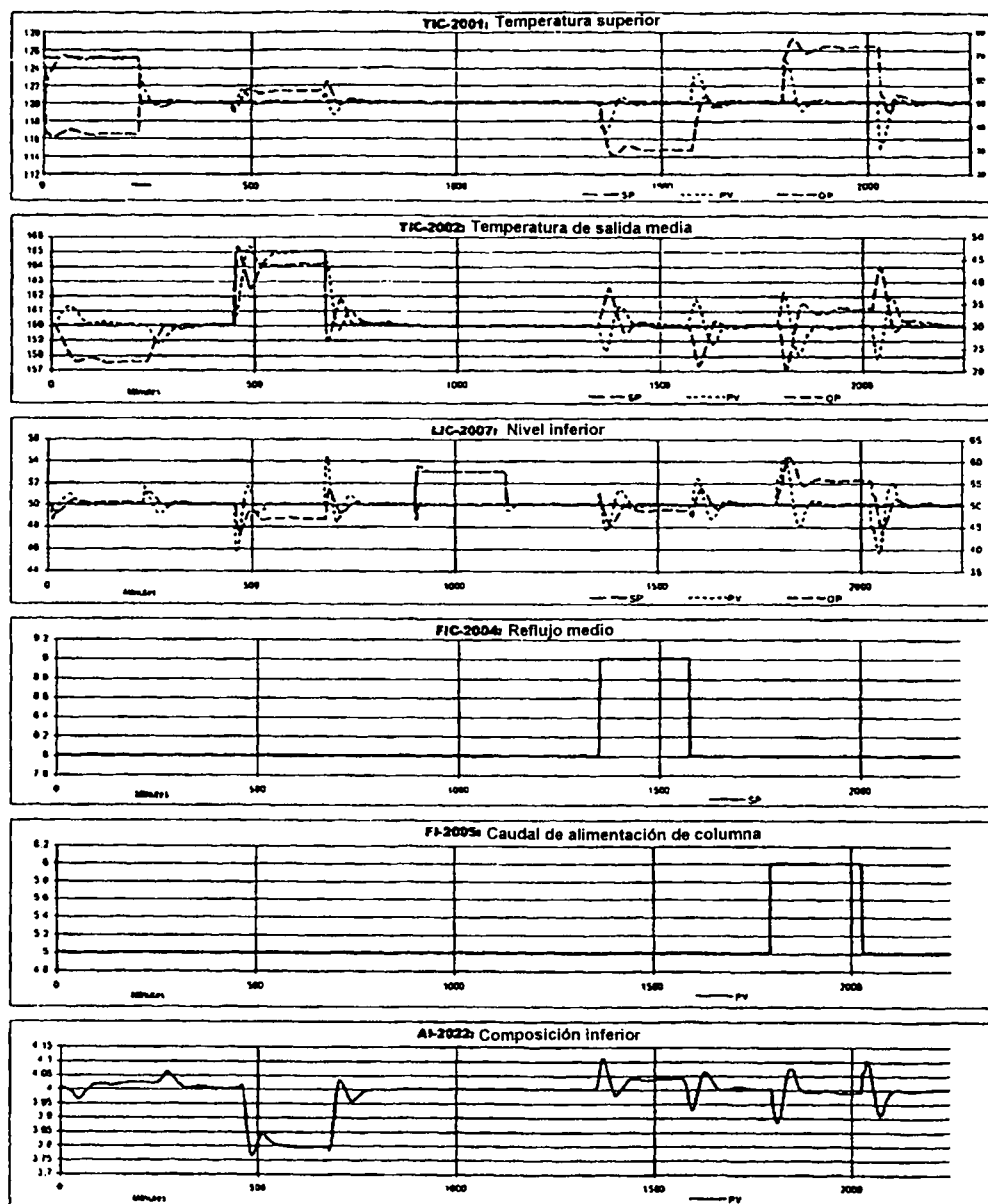


Figura 3/5: Prueba de planta de simulación de columna

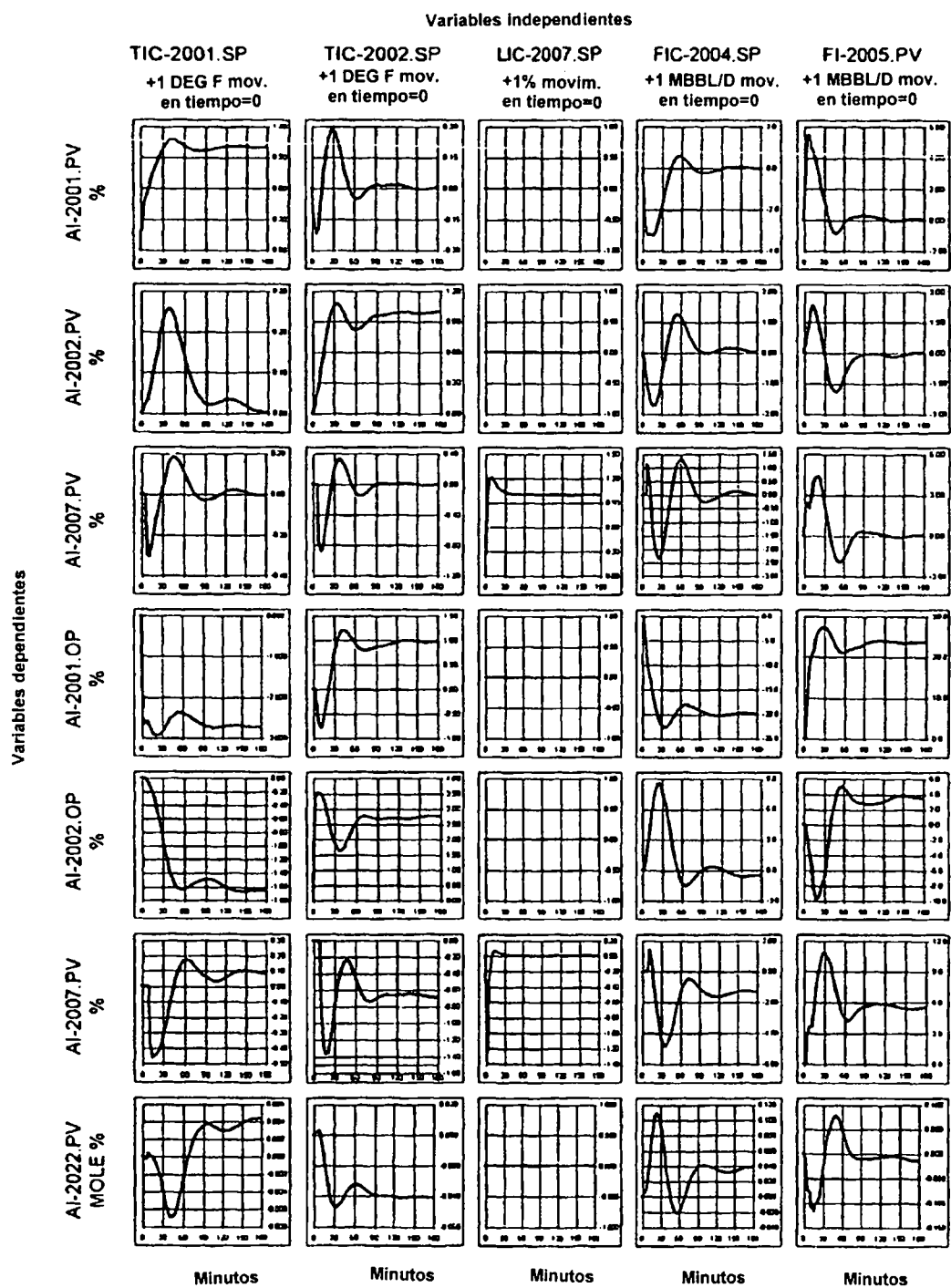


Figura 4/5: Modelo de fraccionador con controladores PID

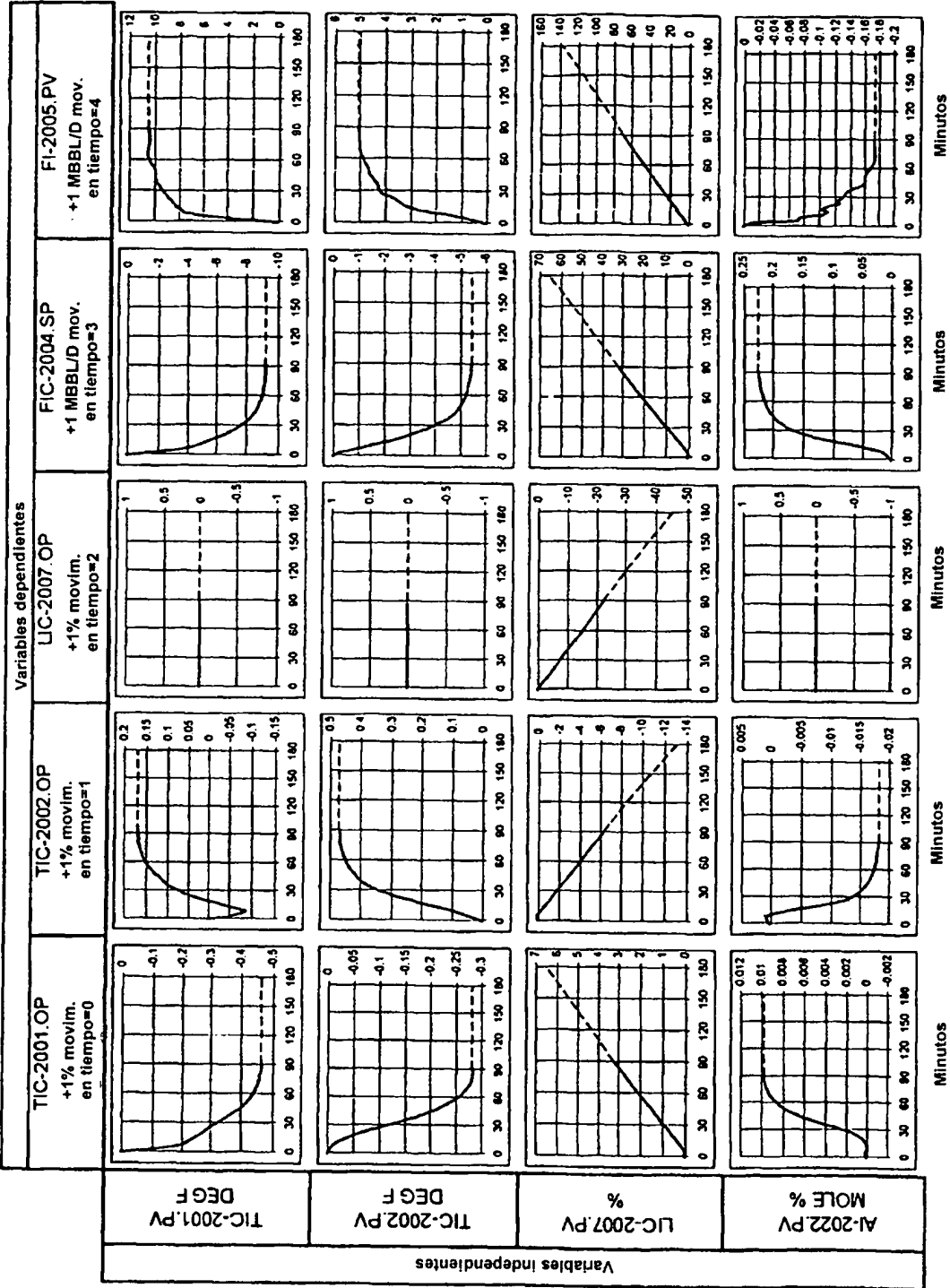


Figura 5/5: Módulos basados en válvula originales y recuperados para fraccionador