

GESTIÓN AUTOMÁTICA DE PUNTOS DE AJUSTE BASADA EN DATOS DE BOMBA

SUMERGIBLE ELÉCTRICA

ANTECEDENTES

Campo de la invención

La invención se relaciona generalmente con motores eléctricos, y más particularmente a sistemas y métodos para controlar automáticamente un motor eléctrico de un sistema de bomba sumergible eléctrica (ESP, por sus siglas en inglés) para ajustar los puntos de ajuste del equipo y alterar el comportamiento de la ESP.

Técnica relacionada.

El petróleo y el gas natural se producen, frecuentemente, al perforar pozos en depósitos de petróleo y, después, producir el petróleo y el gas de los depósitos. Si no existe suficiente presión en un pozo para expulsar estos fluidos fuera del pozo, puede ser necesario usar un sistema de elevación artificial para extraer los fluidos del depósito a través del pozo. Un sistema de elevación artificial típico usa una bomba eléctrica sumergible (ESP) que se posiciona en una zona productora del pozo para bombear los fluidos fuera del pozo.

Un sistema ESP incluye una bomba y un motor que se acopla a la bomba, donde el motor acciona la bomba para extraer el fluido del pozo. La operación de la ESP implica muchas variables, y son muchas las incógnitas que surgen entre el diseño de una ESP y la instalación y operación de la ESP en el campo. Un número de los factores que afectan la operación también pueden cambiar con el tiempo. Por lo tanto, es difícil establecer y ajustar los puntos de ajuste para la operación de la ESP de manera que se optimiza la producción lograda por la ESP.

Un enfoque para optimizar la operación de una ESP implica la creación de un modelo de física integral (un “gemelo digital” de la ESP). El modelo de física puede usarse para predecir la respuesta de la ESP y los cambios en la producción que resultan de los cambios en la operación de la ESP. Por lo tanto, el modelo de física puede usarse para identificar los puntos de ajuste correctos para la operación de la ESP. Sin embargo, los modelos de física para las ESP son típicamente difíciles de crear debido a la falta de datos. Adicionalmente, estos modelos de física son difíciles de mantener porque existe una necesidad de mediciones precisas del flujo producido a partir del sistema ESP de manera que los modelos de física pueden calibrarse a las condiciones de fondo de pozo cambiantes. Además, estas mediciones usualmente requieren

pruebas de pozo que son costosas y poco frecuentes. Aún además, los pozos no convencionales, tales como los que producen a partir de recursos de esquisto de EE. UU., tienen un comportamiento más dinámico y, por lo tanto, requieren una calibración más frecuente de los modelos de física.

Por lo tanto, sería deseable proporcionar sistemas y métodos que reduzcan el costo y la complejidad de determinar parámetros para optimizar la operación de las ESP, particularmente en pozos que tienen condiciones rápidamente cambiantes y/o comportamientos inusuales.

SUMARIO

Las modalidades descritas en la presente usan un sistema de control para adaptar automáticamente la operación de un sistema de accionamiento eléctrico para una ESP. El sistema de control recibe mediciones en vivo de las condiciones de operación de la ESP (que pueden incluir parámetros del motor de ESP, condiciones del pozo, y lo similar) mientras la ESP está en operación. El sistema de control calcula los ajustes a la configuración del accionamiento eléctrico que genera la potencia de salida que acciona la ESP, donde los ajustes se calculan basados, al menos en parte, en las mediciones en vivo, y sin

intervención del usuario. De esta manera, el sistema de control controla automáticamente el accionamiento para modificar la potencia de salida proporcionada a la ESP, que a su vez controla la operación de la ESP. Los ajustes pueden aumentar la estabilidad de la operación de la ESP, mejorar el rendimiento de la ESP, y adaptar la operación de la ESP a las condiciones del pozo cambiantes.

Una modalidad comprende un sistema de control para adaptar automáticamente la operación de un sistema de accionamiento eléctrico para una ESP. El sistema de control incluye uno o más procesadores informáticos acoplados a uno o más dispositivos de almacenamiento de datos, donde los procesadores informáticos se adaptan para recibir mediciones en vivo de las condiciones de operación de la ESP mientras la ESP está en operación. Los procesadores calculan los ajustes a la configuración de un accionamiento eléctrico que genera la potencia de salida que acciona la ESP basados, al menos en parte, en las mediciones en vivo. Los procesadores también realizan esto sin la intervención del usuario. De esta manera, el sistema de control controla automáticamente el accionamiento para modificar la potencia de salida proporcionada a la ESP, que a su vez controla la operación de la ESP.

En algunas modalidades, los procesadores informáticos y los dispositivos de almacenamiento de datos son integrales al accionamiento eléctrico, mientras que en otras modalidades el sistema de control es externo al accionamiento eléctrico. El sistema de control configurado externamente incluye uno o más puertos de entrada adaptados para recibir las mediciones en vivo de uno o más sensores, así como la entrada de usuario a través de una interfaz de usuario. El sistema de control externo también incluye uno o más puertos de salida adaptados para acoplarse al accionamiento eléctrico y para transmitir los ajustes de las configuraciones del accionamiento.

En algunas modalidades, el sistema de control se adapta para determinar, basado al menos en parte en los datos de los sensores en vivo, si la ESP está en operación de manera estable. En respuesta a la determinación de que la ESP no está en operación de manera estable, el sistema de control realiza ajustes correctivos a una o más configuraciones que afectan la estabilidad de la operación de la ESP. Después, a intervalos configurables, vuelve a determinar si la ESP está en operación de manera estable y puede realizar ajustes correctivos adicionales a las configuraciones que afectan la estabilidad de la ESP hasta que opere de manera estable. En respuesta a la determinación de que el sistema ESP está en operación de manera

estable, el sistema de control puede realizar ajustes de optimización a una o más configuraciones que afectan el rendimiento de la ESP. El sistema de control puede determinar las mejoras de rendimiento resultantes de los ajustes de optimización, y puede realizar ajustes de optimización adicionales en las configuraciones que afectan el rendimiento de la ESP hasta que no resulten más mejoras de rendimiento a partir de los ajustes de optimización adicionales.

En algunas modalidades, el sistema de control se adapta para, en una etapa de arranque de operación, recibir la entrada de usuario que define una o más configuraciones iniciales del accionamiento eléctrico, y comenzar la operación del accionamiento eléctrico usando las configuraciones iniciales. Después, en una etapa posterior al arranque de operación, el sistema de control recibe mediciones en vivo de las condiciones de operación de ESP y calcula los ajustes a las configuraciones del accionamiento eléctrico para ajustar la operación del accionamiento para adaptarse a las condiciones de operación de ESP cambiantes.

En algunas modalidades, el sistema de control acepta la entrada de usuario que indica un modo de operación de ESP y un conjunto de parámetros asociados con el modo de operación de ESP indicado. Los dispositivos de almacenamiento de datos del sistema de control pueden

adaptarse para almacenar parámetros predeterminados para uno o más modos de operación de ESP seleccionables, donde el sistema de control recupera un conjunto de parámetros predeterminados para el uno seleccionado de los modos de operación ESP y después proporciona el modo de operación ESP seleccionado y el conjunto correspondiente de parámetros predeterminados al accionamiento eléctrico.

En algunas modalidades, el sistema de control se adapta para calcular los ajustes a las configuraciones del accionamiento eléctrico en respuesta a la detección de un cambio en las condiciones de operación de la ESP como se indica mediante las mediciones en vivo. El sistema de control puede adaptarse para ajustar automáticamente las configuraciones del accionamiento eléctrico a intervalos configurables. El sistema de control también puede adaptarse para generar una notificación que se presente a un usuario en respuesta a la detección de un cambio en las condiciones de operación de la ESP como se indica mediante las mediciones en vivo.

Una modalidad alternativa puede comprender un método para adaptar automáticamente la operación de un accionamiento eléctrico para una ESP. El método incluye recibir, en un sistema de control para un accionamiento eléctrico de una ESP, datos de los sensores en vivo para las

condiciones de operación de la ESP y ajustar automáticamente una o más configuraciones del accionamiento eléctrico basado al menos en parte en los datos de los sensores en vivo sin la intervención de un usuario. El método también puede incluir que el sistema de control determine, basado al menos en parte en los datos de los sensores en vivo, si la ESP está en operación de manera estable y que realice ajustes correctivos a una o más configuraciones que afectan la estabilidad de la ESP en respuesta a la determinación de que la ESP no está en operación de manera estable. El sistema de control puede incluir después de eso volver a determinar si la ESP está en operación de manera estable a intervalos configurables.

En algunas modalidades, el método incluye realizar repetidamente ajustes correctivos a las configuraciones que afectan la estabilidad de la ESP hasta que la ESP está en operación de manera estable. El método también puede incluir, en respuesta a la determinación de que el sistema ESP está en operación de manera estable, realizar ajustes de optimización a una o más configuraciones que afectan el rendimiento de la ESP y determinar las mejoras de rendimiento resultantes de los ajustes. El método puede incluir además repetir los ajustes de optimización a las configuraciones que afectan el rendimiento de la ESP hasta

que no resulte ninguna mejora de rendimiento a partir de la realización de los ajustes de optimización. El método también puede incluir generar notificaciones que se presentan a un usuario en respuesta a la determinación de que la ESP no está en operación de manera estable. En algunas modalidades, el método puede incluir ajustar automáticamente las configuraciones del accionamiento eléctrico a intervalos configurables.

También son posibles numerosas modalidades alternativas adicionales.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Otros objetivos y ventajas de la invención pueden ser evidentes al leer la siguiente descripción detallada y al hacer referencia a las figuras adjuntas.

La Figura 1 es un diagrama que ilustra algunos de los componentes primarios de un sistema ESP.

Las Figuras 2A y 2B son diagramas que ilustran el control convencional de una ESP.

Las Figuras 3A y 3B son diagramas que ilustran el control automatizado de una ESP de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso de alto nivel implementado por un sistema de control automatizado para controlar la operación de un accionamiento para una ESP de acuerdo con algunas modalidades.

Las Figuras 5A-5C son un conjunto de diagramas de flujo que ilustran la operación de un sistema de control automatizado para un accionamiento cuando el accionamiento ha comenzado a generar potencia de salida para accionar una ESP de acuerdo con algunas modalidades.

Si bien la invención se somete a diversas modificaciones y formas alternativas, las modalidades específicas de estas se muestran a manera de ejemplo en las figuras y la descripción detallada adjunta. Debe entenderse, sin embargo, que las figuras y la descripción detallada no pretenden limitar la invención a la modalidad particular que se describe. En cambio, esta descripción pretende cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que están dentro del alcance de la presente invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE MODALIDADES ILUSTRATIVAS

A continuación se describen una o más modalidades de la invención. Cabe señalar que estas y cualquier otra modalidad descrita a continuación son ilustrativas y pretenden ser ilustrativas de la invención en lugar de limitantes.

Antes de describir modalidades ilustrativas de la invención, puede ser útil revisar la estructura general de una ESP. Con referencia a la Figura 1, se muestra un diagrama que ilustra un sistema ESP ilustrativo. En esta modalidad, la ESP 120 incluye una sección de motor 121, una sección de sello 122 y una sección de bomba 123. La ESP 120 puede incluir varios otros componentes que no se describirán en detalle en la presente porque se conocen bien en la técnica y no son importantes para una descripción de la invención. La sección de motor 121 se opera para accionar la sección de bomba 123.

En la Figura 1, el sistema ESP 120 se instala en un pozo. La ESP 120 se acopla al extremo de una sarta de tubería 150, y la ESP y la sarta de tubería se bajan al pozo para colocar la ESP en una porción productora del pozo. La ESP 120 se conecta a un equipo de superficie que incluye un sistema de accionamiento 110. El sistema de accionamiento 110 se acopla a la ESP 120 mediante el cable de alimentación 112,

que corre por el pozo a lo largo de la sarta de tubería 150 hasta la ESP. La sarta de tubería 150 y el cable de alimentación 112 pueden variar de menos de mil pies en un pozo poco profundo, a muchos miles de pies en un pozo más profundo.

El sistema de accionamiento 110 puede ser, por ejemplo, un accionamiento de velocidad variable (VSD, por sus siglas en inglés). El sistema de accionamiento 110 produce energía (p. ej., energía trifásica de AC) que se transporta a través del cable de alimentación 112 a la sección de motor 121 de la ESP para accionar la sección de motor. La forma de onda de la potencia de salida generada por el sistema de accionamiento 110 puede variarse para cambiar la operación de la sección de motor 121. El sistema de accionamiento 110 genera la potencia de salida basado en un número de configuraciones, tales como un modo de operación seleccionado (p. ej., un control proporcional-integral-derivativo (PID, por sus siglas en inglés) típicamente basado en las lecturas de amperios del motor o de presión de admisión, o una frecuencia de salida fija de la forma de onda de potencia) y un número de valores de punto de ajuste asociados con el modo de operación seleccionado.

La potencia de salida generada por el sistema de accionamiento 110 se proporciona a la sección de motor 121 de

la ESP, que acciona el motor. A medida que la sección de motor 121 de la ESP se opera, esta acciona la sección de bomba 123, bombeando de esta manera el petróleo u otro fluido a través de la sarta de tubería 150 y fuera del pozo. La eficiencia con la que la ESP bombea fluidos fuera del pozo depende de las condiciones del pozo, las condiciones del motor y las diversas configuraciones del sistema de accionamiento 110. A medida que cambian las condiciones del pozo y las condiciones del motor, cambian las configuraciones óptimas para el sistema de accionamiento 110, por lo que es necesario modificar las configuraciones de accionamiento para mantener la ESP en operación de manera óptima. Para los propósitos de esta descripción, todas estas condiciones pueden denominarse colectivamente condiciones de operación de la ESP.

Con referencia a la Figura 2A, se muestra un diagrama para ilustrar los componentes del sistema implicados en el control de un sistema ESP convencional. Como se señaló anteriormente, el sistema de accionamiento 110 está configurado para generar potencia de salida que se proporciona al sistema ESP 120 para de accionar el sistema ESP. Como se ilustra en esta figura, una interfaz de usuario 220 se conecta al sistema de accionamiento 110. La interfaz de usuario 220 permite a un usuario proporcionar una entrada que configura el sistema de

accionamiento 110 para generar la potencia de salida apropiada para el sistema ESP 120.

Se proporciona un conjunto de sensores 210 para monitorear las condiciones asociadas con la operación del sistema ESP. Algunos de estos sensores están configurados para monitorear las condiciones del pozo (p. ej., la temperatura, presión, etc.), mientras que otros están configurados para monitorear los parámetros asociados con el sistema ESP 120 (p. ej., la corriente del motor, temperatura del motor, velocidad del motor, presión de entrada de bomba, etc.). Los sensores 210 pueden colocarse en diversas ubicaciones que son ventajosas para el tipo particular de sensor. Por ejemplo, la presión del pozo se medirá usando sensores que se colocan en el fondo de pozo del pozo, cerca del sistema ESP, la temperatura del motor se medirá usando sensores que se colocan en el motor de ESP, y los sensores de corriente pueden medirse usando sensores que se colocan en la salida del sistema de accionamiento. Los datos generados por los sensores 210 se proporcionan a la interfaz de usuario 220, que puede mostrar los datos al usuario.

Con referencia a la Figura 2B, se muestra un diagrama para ilustrar el control del sistema ESP 120 convencional. En este diagrama, las líneas discontinuas muestran el flujo de información en el sistema. El usuario proporciona la entrada a la interfaz de usuario 220, y esta

información se usa para configurar el sistema de accionamiento 110. El sistema de accionamiento 110 genera potencia de salida de acuerdo con la información recibida de la interfaz de usuario 220, este proporciona esta potencia al sistema ESP 120 para accionar el sistema ESP. Típicamente, la entrada de usuario proporcionada a la interfaz de usuario 220 y el sistema de accionamiento 110 incluye selecciones de usuario de un modo de accionamiento y puntos de ajuste asociados. Estos datos controlan la potencia de salida generada por el sistema de accionamiento 110 y controlan de esta manera la operación del sistema ESP 120.

Mientras el sistema ESP 120 está en operación, los sensores 210 monitorean las condiciones asociadas con el pozo y el sistema ESP. Esta información es transmitida por los sensores 210 a la interfaz de usuario 220 de manera que puede proporcionarse (p. ej., mostrarse) al usuario. Los datos de sensor no son usados convencionalmente de manera directa por la interfaz de usuario 220 o el sistema de accionamiento 110 para cambiar la operación del sistema ESP 120. En su lugar, la información se proporciona al usuario, quien evalúa manualmente la información y toma una decisión en cuanto a si debe modificarse o no la operación del sistema ESP 120. Después, el usuario introduce manualmente cualquier cambio en la información de control (p. ej., el modo y los puntos de

ajuste) a través de la interfaz de usuario 220, modificando de este modo el control del sistema de accionamiento 110 y el sistema ESP 120.

Por ejemplo, cuando un usuario en el campo opera un sistema ESP convencional, el usuario puede obtener información a partir del accionamiento, tal como la corriente del motor y la frecuencia del motor, así como información del fondo de pozo tal como la presión de entrada de la bomba, la presión de descarga y la temperatura del motor. Cuando el usuario obtiene esta información, este es capaz de trazar la información y ver patrones en la información. Basado en los patrones que ve el usuario, este puede determinar a partir de su experiencia que puede ser deseable cambiar el accionamiento a un modo de operación diferente. Después, el usuario puede cambiar manualmente el accionamiento al nuevo modo. El usuario también debe seleccionar las configuraciones apropiadas para el nuevo modo de control. Por lo tanto, el usuario debe tener el conocimiento y la experiencia para reconocer los patrones e identificar tanto el nuevo modo de operación como las configuraciones apropiadas asociadas al nuevo modo.

En un escenario, el usuario puede ver un patrón que indica una condición de interferencia de gas o bloqueo de gas. El usuario puede reconocer que un modo de control de presión

existente para el sistema de accionamiento no es adecuado para la condición de interferencia de gas o bloqueo de gas. El usuario puede determinar que un modo de control actual es más adecuado para la condición y que un valor particular de punto de ajuste para ese modo debe establecerse basado en la operación estable del pozo en sus datos de sensor registrados recientemente. El usuario realiza un cambio al modo y las configuraciones del sistema de accionamiento y después observa el rendimiento de los nuevos controles del motor y determina actualizaciones adicionales a los puntos de ajuste nuevamente si es necesario. Este es un proceso manual y debe repetirse a lo largo del tiempo porque los pozos son tan dinámicos que solo una única instancia de aplicación de configuraciones al sistema de accionamiento típicamente no logrará un rendimiento óptimo del sistema ESP.

En otro escenario, puede realizarse un control de purga de gas. El control de purga de gas es una rutina de control que es común, al menos en concepto, a muchos VSD que ajustarán automáticamente la frecuencia de salida de la potencia de VSD de una manera que puede ayudar a liberar una bomba bloqueada por gas. Aunque puede haber un control de presión, control de corriente o control de frecuencia que se puede operar en el sistema, la ESP puede bloquearse con gas si hay demasiado gas en el pozo. En el caso de un bloqueo de gas,

el usuario tiene la opción de habilitar el control de gas para anular cualquier modo de control actual y habilitar el control de gas en el accionamiento. En respuesta a la habilitación del control de gas para anular el modo de control, el accionamiento ejecuta una rutina en la que ralentiza la velocidad de la bomba y, después, aumenta la velocidad de la bomba a intervalos predeterminados para intentar superar el bloqueo de gas. Al igual que con los cambios de modo descritos anteriormente, el control de purga de gas es iniciado manualmente por el usuario en respuesta al reconocimiento de la condición de bloqueo de gas. Sin embargo, tales rutinas de control configuradas manualmente pueden no ser efectivas porque frecuentemente no están configuradas correctamente, lo que puede resultar en que las configuraciones estén desactualizadas debido a que han cambiado las condiciones del pozo.

Con referencia a la Figura 3A, se muestra un diagrama para ilustrar los componentes del sistema implicados en el control de un sistema ESP de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención. En este sistema, al igual que el sistema de las Figuras 2A y 2B, el accionamiento 110 está configurado para generar la potencia de salida que se proporciona al sistema ESP 120. Esto acciona el sistema ESP 120 para operar y bombear fluido desde el pozo.

La modalidad de la Figura 3A difiere del sistema de las Figuras 2A y 2B en que incluye un sistema de control automatizado 330 que se acopla al sistema de accionamiento 110. El sistema de control 330 también se acopla a una interfaz de usuario 320 a través de la cual un usuario puede proporcionar entradas de control, tales como selecciones de modo y valores de punto de ajuste. El sistema de control automatizado 330 también recibe datos de los sensores 310, que pueden incluir mediciones de los parámetros del sistema ESP y las condiciones del pozo. La información introducida por el usuario a través de la interfaz 320 y la información proporcionada por los sensores 310 es usada por el sistema de control 330 para adaptar la operación del sistema de accionamiento 110 y el sistema ESP 120 para optimizar el rendimiento del sistema ESP. En algunas modalidades, el sistema de control puede construirse como un sistema informático independiente que está configurado para acoplarse a un sistema de accionamiento separado. Esto permite reacondicionar los sistemas de accionamiento convencionales para tener estas características. En otras modalidades, el sistema de control puede integrarse en el sistema de accionamiento.

Cabe señalar que “optimizar”, como se usa en la presente, se refiere a cambios que mejoran el rendimiento del

sistema ESP, y no debe interpretarse como que incluye únicamente acciones que logran el mejor rendimiento posible. Por lo tanto, si bien las acciones de optimización hacen que el rendimiento del sistema ESP se mueva hacia el mejor rendimiento posible, no necesariamente logran ese objetivo.

Con referencia a la Figura 3B, se muestra un diagrama para ilustrar la manera en la que se controla el sistema ESP 120 en las presentes modalidades. En este ejemplo, un usuario proporciona entradas que identifican un punto de partida para la operación del sistema de accionamiento 110 y el sistema ESP 120. Esta entrada puede incluir, por ejemplo, un modo de operación seleccionado y un número de puntos de ajuste asociados con el modo de operación. Estas entradas se proporcionan a través de la interfaz de usuario 320, y el sistema de accionamiento 110 usa el modo seleccionado y los puntos de ajuste como punto de partida para generar la potencia de salida que impulsa el sistema ESP 120.

Una vez que se inicia la operación del sistema ESP 120, los sensores 310 realizan mediciones de los parámetros del sistema y las condiciones del pozo y, en lugar de simplemente proporcionar esta información a un usuario como en los sistemas convencionales, la información del sensor se proporciona al sistema de control 330. El sistema de control

330 monitorea la información recibida de los sensores 310 y usa la información de los sensores para modificar la operación de la ESP. Si la operación del sistema ESP no es estable, el sistema de control modifica la potencia de salida generada para intentar estabilizar su operación. Si la operación de la ESP ya es estable, el sistema de control 330 modifica la potencia de salida generada para tratar de mejorar el rendimiento del sistema ESP.

Aquí, “mejorar el desempeño” del sistema ESP significa aumentar el fluido producido por el sistema ESP. Por lo tanto, el sistema de control 330 ajusta automáticamente la operación del sistema de accionamiento (por lo tanto, el sistema ESP) sin la intervención del usuario, al ajustar de manera autónoma los parámetros de operación del sistema de accionamiento y el sistema ESP para adaptarse a las condiciones cambiantes.

Con referencia a la Figura 4, se muestra un diagrama de flujo para ilustrar, a un alto nivel, un proceso implementado por el sistema de control para controlar la operación del sistema de accionamiento y el sistema ESP. Las etapas 402-406 de este proceso generalmente reflejan una etapa de inicialización del proceso, mientras que las etapas 408-414 reflejan una etapa de operación del proceso durante la cual el sistema de control modifica la operación del sistema de

accionamiento y ESP. Cabe señalar que, dado que el sistema de control controla el sistema ESP a través del sistema de accionamiento, las referencias en la presente al control del sistema de accionamiento y al control del sistema ESP deben interpretarse esencialmente indistintamente.

En la etapa 402, el sistema de control recibe la entrada de usuario para seleccionar un modo de controlador. Este es el modo del sistema de control, principalmente para inicializar el sistema para la operación del motor. En una modalidad, los modos de controlador incluyen un modo simple y un modo avanzado. Estos dos modos determinan cuánta información es introducida por el usuario en la selección del modo de operación de ESP.

[Cada modo disponible para seleccionarse por el usuario en esta etapa representa un resultado operativo más elevado al que permiten los modos típicos de controlador de ESP. Por ejemplo, el usuario puede elegir una presión de entrada objetivo, frecuencia de operación o reducción (la diferencia entre la presión de flujo del fondo del orificio y una presión de depósito predefinida). Aún otros resultados operativos objetivo son posibles. Después, la lógica del sistema de control gestiona los modos de operación (p. ej., la frecuencia establecida y amperios/presión PID) para lograr el objetivo seleccionado. La capacidad del sistema de

control para gestionar las configuraciones de control para lograr el objetivo de alto nivel identificado libera al usuario de tener que lidiar con los detalles de la implementación de los controles. Además de automatizar la gestión de las configuraciones de control de ESP, el sistema de control puede hacerlo en tiempo real en respuesta a los datos de los sensores en vivo, y puede hacerlo de manera más consistente que un usuario que debe confiar en la experiencia y, hasta cierto punto, en la intuición.

En la etapa 404, el usuario elige un modo de operación de ESP. Si el usuario ha seleccionado el modo de controlador simple, el sistema de control solicitará al usuario seleccionar un modo de operación de ESP (p. ej., el modo de presión de entrada objetivo, modo de frecuencia de operación objetivo, modo de reducción objetivo). Una vez que el modo de operación de ESP es seleccionado por el usuario, el sistema de control suministrará las configuraciones predeterminados asociadas con el modo seleccionado. En algunas modalidades, las configuraciones particulares que se usan como configuraciones predeterminadas pueden seleccionarse basados en tal información como el tipo de equipo. Si el usuario ha elegido el modo de controlador avanzado, el sistema de control solicitará al usuario seleccionar un modo de operación de ESP, así como todas las configuraciones de control que están disponibles para el

modo seleccionado. En algunas modalidades, se presenta al usuario una visualización de todas las configuraciones de control y el usuario puede editar las configuraciones como desee.

Las configuraciones de control pueden incluir diversos parámetros de configuración. Estos pueden incluir, por ejemplo, períodos de tiempo entre los cambios de variables de control, la magnitud máxima y/o mínima de cambios a lo largo del tiempo para las variables de control, parámetros que definen el comportamiento analítico (tal como los que determinan la estabilidad y el reconocimiento de características de series temporales), y las variables que definen las características observadas del pozo o campo (tal como la presión de entrada estática, geometría de pozo y propiedades de fluidos producidos).

En la etapa 406, después de que el usuario ha seleccionado el modo de operación de la ESP y las configuraciones para el modo seleccionado, si es necesario, el sistema de control comprobará la configuración definida por el modo y las configuraciones seleccionadas para determinar si la configuración se aproxima a algún punto de ajuste de disparo. Si las configuraciones se aproximan a cualquier punto de ajuste de disparo, el sistema de control proporciona una advertencia al usuario de que las

configuraciones seleccionadas no son válidas. Después, puede solicitarse al usuario cambiar la configuración no válida de manera que puede proceder la operación de la ESP. Si la configuración definida no se aproxima a ningún punto de ajuste de disparo, el sistema de control iniciará la operación del sistema de accionamiento usando el modo de operación de ESP seleccionado y las configuraciones asociados (etapa 408).

A medida que operan el sistema de accionamiento y el sistema ESP, la corriente del motor de ESP se monitorea y compara con umbrales de operación predeterminados que definen un rango aceptable para la operación del motor (etapa 410). En la etapa 412, se determina si la corriente del motor está dentro del rango aceptable y, por lo tanto, opera de manera estable. La estabilidad de la operación del motor puede, en algunas modalidades, evaluarse al determinar el porcentaje de tiempo que el accionamiento pasa ya sea en una frecuencia de limitación alta o una frecuencia de limitación baja, en lugar de frecuencias intermedias entre estos dos límites. Esto incluye escenarios en los que el accionamiento permanece ya sea en el límite alto o el límite bajo, así como escenarios en los que el accionamiento oscila abruptamente, hacia adelante y hacia atrás, entre los límites alto y bajo. Si el porcentaje de tiempo en los límites alto y bajo excede un

umbral, la operación del accionamiento se considera inestable.

Si la operación del motor no es estable, el sistema de control modificará las configuraciones para la operación del sistema para intentar estabilizar la operación del motor (etapa 414). Después, el sistema de control verificará la corriente del motor nuevamente para determinar si la operación del motor se ha estabilizado. Esto se repetirá hasta que se logre una operación estable. Si la operación del motor no se puede lograr dentro de la cantidad de tiempo predeterminada, el sistema de control puede proporcionar una advertencia al usuario, o puede suspender la operación del motor.

Si, cuando se comprueba la corriente del motor para determinar si refleja la operación estable del motor (etapa 412), se encuentra que la operación del motor es estable, el sistema de control comienza una rutina que modifica las configuraciones de control del sistema de accionamiento en un intento de mejorar la operación del sistema ESP (etapa 416). Esto puede implicar cambiar gradualmente la configuración usada por el sistema de accionamiento, así como cambiar el modo de operación de ESP usado por el sistema. Después de modificar las configuraciones para mejorar el rendimiento del sistema ESP, el sistema de control retorna a la etapa 410.

Los intentos del sistema de control para mejorar el rendimiento incluyen determinar la idoneidad del modo de accionamiento. En algunas modalidades, el sistema de control determina primero si la inestabilidad de la operación del motor se indica mediante (1) la frecuencia que permanece limitada en uno de los límites alto o bajo, o (2) la oscilación hacia adelante y hacia atrás entre los límites. Como se señaló anteriormente, la inestabilidad en sí se indica mediante la cantidad de tiempo en los límites alto y/o bajo que excede un umbral. Si la inestabilidad entra dentro de la clase (1) o clase (2) puede determinarse usando la condición

$$\text{ABS}(\text{LOG}(L/H)) \leq \text{CR_THRES}$$

donde L es el número de puntos de datos en el límite de baja frecuencia, H es el número de puntos de datos en el límite de alta frecuencia y CR_THRES es un valor umbral. ABS() es una función de valor absoluto, y LOG() es una función logarítmica. Si la condición se satisface, la inestabilidad entra dentro de la clase (2). De lo contrario, la inestabilidad está dentro de la clase (1).

Si la inestabilidad está en la clase (1), la “función objetiva” de optimización es demasiado agresiva para

las condiciones del pozo actuales. Por lo tanto, el sistema de control procede con la retroalimentación de que las configuraciones actuales causan una carga excesiva del sistema (lo que resulta en una limitación de frecuencia alta) o una carga insuficiente del sistema (lo que resulta en una limitación de frecuencia baja). Por lo tanto, el sistema de control puede proporcionar un ajuste a los puntos de ajuste en el modelo de control actual o un cambio del modo de control por completo.

Si la inestabilidad está en la clase (2), los parámetros del modo de control existentes no son adecuados para las condiciones del pozo actuales, por lo que en un modo PID, pueden ajustarse los parámetros básicos del bucle PID (p. ej., la ganancia proporcional, ganancia integral, ganancia derivativa, y frecuencia de bucle), junto con las condiciones de operación existentes. Esto puede lograrse en algunas modalidades usando un flujo de trabajo de ajuste PID automatizado.

El sistema de control comprueba repetidamente la corriente del motor para asegurar que la operación del motor es estable y que las configuraciones usadas por el sistema de accionamiento para operar el sistema ESP están optimizados para mejorar el rendimiento del sistema ESP. El sistema de control realiza ciclos de comprobaciones de estabilidad y

modificaciones de mejora del rendimiento para adaptar las configuraciones del sistema de accionamiento a las condiciones cambiantes del sistema ESP y el pozo. En algunas modalidades, el sistema de control puede realizar ciclos a través de estas comprobaciones y actualizaciones de las configuraciones a intervalos configurables.

La operación del sistema de control se muestra en mayor detalle en las Figuras 5A-5C. Estos diagramas de flujo ilustran la operación del sistema de control una vez que el sistema de accionamiento ha comenzado a generar potencia de salida para accionar el sistema ESP.

Con referencia a la Figura 5A, una vez que ha comenzado la operación del sistema de accionamiento y el sistema ESP, el sistema de control comienza a muestrear la corriente del motor (etapa 502). La corriente puede muestrearse durante una ventana de tiempo configurable, y puede muestrearse a una velocidad de muestreo configurable. Después de haber muestreado la corriente del motor, los datos de las muestras se comparan con los umbrales de datos preconfigurados para determinar si los datos cumplen con estos umbrales de calidad (etapa 504).

Si el sistema de control determina en la etapa 506 que los datos no cumplen con los umbrales de calidad, se registra la ocurrencia de datos de baja calidad (etapa 508),

y el sistema de control nuevamente muestrea la corriente del motor (etapa 502) y compara los datos de corriente del motor recién muestreados con los umbrales preconfigurados (etapa 504) para determinar si los nuevos datos cumplen con los requisitos de calidad.

Si, en la etapa 506, se determina que los datos de corriente del motor muestreados cumplen con los umbrales de calidad, el sistema de control procede a determinar si la operación del motor es estable (etapa 510). Si la operación del motor no es estable, el sistema de control comienza un procedimiento para intentar estabilizar la operación del motor como se muestra en la Figura 5B. Si la operación del motor es estable, el sistema de control comienza un procedimiento para intentar modificar la operación del motor para mejorar el rendimiento del sistema ESP como se muestra en la Figura 5C. La modificación de la operación del sistema de accionamiento y el sistema ESP se realiza mediante el sistema de control sin intervención del usuario.

Si el sistema de control ha determinado que la operación del motor no es estable, el sistema de control realizará una evaluación de la idoneidad del modo de operación de ESP seleccionado actualmente y las condiciones del pozo (paso 512). Esta evaluación puede basarse en un número de factores, tales como datos de series temporales, un modelo de

física suplementario o metadatos de la ESP y/o pozo, y el ciclo del pozo en la historia del pozo. El análisis de datos de series temporales en el que el sistema compara los datos medidos del sensor con firmas asociadas a condiciones problemáticas conocidas puede ser muy importante. La evaluación se basa, al menos en parte, en datos de sensores en vivo recibidos por el sistema de control que muestran diversas condiciones del pozo y el sistema ESP.

Si en la etapa 514 se determina que el modo de accionamiento no es adecuado, el sistema de control cambia el modo de operación de ESP y aplica un conjunto de ajustes preconfigurados asociados con el nuevo modo de operación (etapa 516). El sistema de control también notifica al operador del cambio en las configuraciones del modo de operación. Después, el sistema de control retorna a la etapa 502 y vuelve a muestrear la corriente del motor.

Si, en la etapa 514, el sistema de control determina que el modo de accionamiento es adecuado, el sistema de control procede a la etapa 518, en la que determina si existen o no indicaciones de un bloqueo de gas. Estas indicaciones pueden accionarse mediante un número de factores, incluido el número de apagados y su duración durante un período de tiempo reciente. Si existe una indicación de bloqueo de gas, el sistema de control procede a la etapa 520, donde este

actualiza el algoritmo de manejo de gas del sistema de accionamiento si el algoritmo está presente y activo. Alternativamente, el sistema de control puede iniciar un algoritmo de manejo de gas. También puede notificarse al usuario del cambio con respecto al algoritmo de manejo de gas. Después de realizar esta actualización, el sistema de control retorna a la etapa 502.

Si, en la etapa 518, el sistema de control determina que no existen indicaciones de bloqueo de gas, el sistema de control procede a la etapa 522, en la que este realiza una determinación en cuanto a si existen indicaciones de problemas de arranque. Si existen indicaciones de problemas de arranque, el sistema de control procede a la etapa 524, en la que el sistema de control actualiza el algoritmo de inicio duro si uno está presente y activo. El sistema de control también notifica al usuario la actualización del algoritmo de inicio duro y/o los problemas de arranque. Después, el sistema de control retorna a la etapa 502.

Si el sistema de control ha determinado que el modo de accionamiento es adecuado (etapa 514), que no hay indicaciones de bloqueo de gas (etapa 518), y que no hay indicaciones de problemas de arranque (etapa 522), el sistema de control simplemente retorna a la etapa 502, donde se

muestrea nuevamente la corriente del motor antes de volver a comprobar la estabilidad del sistema ESP (en la etapa 510).

Si el sistema de control ha determinado en la etapa 510 que la operación del motor es estable, el sistema de control realizará una evaluación de si el sistema de accionamiento se aproxima a algún punto de disparo que activaría una alarma, y si el parámetro objetivo puede optimizarse adicionalmente (etapa 526). En la etapa 528, el sistema de control determina si existe potencial para explotar adicionalmente el objetivo. En caso negativo, el controlador retorna a la etapa 502 y continúa el proceso de monitoreo de la corriente del motor y determinar la estabilidad operativa del sistema ESP y la posibilidad de mejorar su rendimiento.

Si, en la etapa 528, el sistema de control determina que existe potencial para optimizar la operación (es decir, optimizar alguna función objetiva), procede a determinar si el sistema de accionamiento está en operación en un modo de frecuencia establecido (etapa 530). Si el sistema está en operación en un modo de frecuencia establecido, el sistema de control procede a la etapa 532, y la frecuencia de salida del sistema de accionamiento se incrementa en una cantidad preconfigurada. Después, el sistema de control retorna a la etapa 502 y continúa el proceso de monitoreo de la operación del sistema.

Si, en la etapa 530, el sistema de control determina que el sistema de accionamiento no está en operación en un modo de frecuencia establecido, el sistema de control procede a la etapa 534, donde el sistema de control determina si el sistema de accionamiento está en operación en un modo PID. Si el sistema de control determina que el sistema de accionamiento está en operación en un modo PID, el sistema de control procede a la etapa 536, donde expande el punto de ajuste del proceso PID en una cantidad preconfigurada. Después, el sistema de control retorna a la etapa 502 y continúa el proceso de monitoreo de la operación del sistema. Si, en la etapa 534, el sistema de control determina que el sistema de accionamiento no está en operación en modo PID, el sistema de control simplemente retorna a la etapa 502 y continúa monitoreando la operación de los sistemas de accionamiento y ESP.

Las modalidades de los sistemas de control descritos anteriormente pueden implementarse usando sistemas informáticos que incluyen, por ejemplo, un procesador informático y la memoria asociada. El procesador informático puede ser un circuito integrado para procesar instrucciones, tal como, pero sin limitarse a, una CPU. Por ejemplo, el procesador puede comprender uno o más núcleos o micronúcleos de un procesador. La memoria puede incluir memoria volátil,

memoria no volátil, memoria semivolátil o una combinación de estas. La memoria, por ejemplo, puede incluir RAM, ROM, memoria flash, una unidad de disco duro, una unidad de estado sólido, un medio de almacenamiento óptico (p. ej., CD-ROM), u otra memoria legible por ordenador o combinación de estos. La memoria puede implementar una jerarquía de almacenamiento que incluye memoria caché, memoria primaria o memoria secundaria. En algunas modalidades, la memoria puede incluir espacio de almacenamiento en una matriz de almacenamiento de datos.

Los beneficios y ventajas que pueden proporcionarse por la presente invención se han descrito anteriormente con respecto a modalidades específicas. Estos beneficios y ventajas, y cualquier elemento o limitación que pueda causar que ocurran o se vuelvan más pronunciados, no deben interpretarse como características críticas, requeridas o esenciales de cualquiera o todas las modalidades descritas. Como se usa en la presente, los términos “comprende”, “que comprende”, o cualquier otra variante de estos, pretenden interpretarse como que incluyen no exclusivamente los elementos o limitaciones que siguen esos términos. Por consiguiente, un sistema, método u otra modalidad que comprende un conjunto de elementos no se limita solo a esos elementos, y puede incluir otros que no estén expresamente enumerados o sean inherentes a la modalidad descrita.

Si bien la presente invención se ha descrito con referencia a modalidades particulares, debe entenderse que las modalidades son ilustrativas y que el alcance de la invención no se limita a estas modalidades. Son posibles muchas variaciones, modificaciones, adiciones y mejoras a las modalidades descritas anteriormente. Se contempla que estas variaciones, modificaciones, adiciones y mejoras están dentro del alcance de la invención como se detalla en las reivindicaciones de la solicitud.