

MÉTODO PARA EL CONTROL DEL PERFIL TÉRMICO Y LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN POZOS GEOTÉRMICOS

CAMPO TÉCNICO

[0001] La presente invención se refiere al control térmico de la energía térmica absorbida en pozos y, más en particular, la presente invención se refiere al control de la disipación de temperatura y la recuperación eficiente de la energía en pozos geotérmicos, y la optimización del diseño y la operación de sistemas de pozos geotérmicos de bucle cerrado.

ANTECEDENTES DEL ESTADO DE LA TÉCNICA

[0002] Actualmente, Estados Unidos es líder mundial en capacidad geotérmica instalada con más de 3300 megavatios en ocho estados. La mayor parte se encuentra en California.

[0003] Como se sabe, en la energía geotérmica el calor se genera continuamente dentro de la capa de magma a través de descomposición radiactiva. Se ha informado que la cantidad de calor dentro de los 10.000 metros de la superficie de la Tierra contiene 50.000 veces más energía que todos los recursos de petróleo y gas natural del mundo. Claramente, este es un punto de interés dentro de la comunidad de desarrolladores de energía.

[0004] A estas profundidades previamente se han notificado problemas relacionados con las altas temperaturas que dañan los equipos. En algunos casos estos han sido mitigados o se han vuelto satisfactoriamente tolerables.

[0005] Uno de los puntos clave en la producción de energía geotérmica es la gestión de las pérdidas térmicas dentro del pozo y por lo mismo la capacidad de extraer el calor con el fluido de trabajo utilizado como medio de captación y transporte.

[0006] El estado de la técnica se ha desarrollado en esta área como lo demuestran los documentos expuestos.

[0007] Shulman, en la patente estadounidense No 5.515.679, emitida el 14 de mayo de 1996, proporciona un método para la minería del calor geotérmico y la utilización de la energía recuperada. Un múltiple recibe una red de pozos dispersos dentro de una formación. Se proporcionan varias formaciones o matrices de pozos, en donde los pozos

se encuentran dispersos dentro de cada formación específica de pozos. El documento guarda silencio con respecto a la disipación térmica a lo largo de los pozos.

[0008] En la patente estadounidense No 9.556.856, emitida el 31 de enero de 2017, Stewart et al., proporcionan un sistema de energía geotérmica y un método de operación. En la divulgación al hacer referencia a la Figura 15, los titulares de la patente sostienen:

[0009] “La tubería interior 304 está centralizada en el revestimiento exterior 302 por medio de aletas centralizadoras 318 localizadas a intervalos a lo largo de la tubería 304 y se deja con el “extremo abierto” a una corta distancia por encima del tapón inferior 314 con el fin de establecer un trayecto eficiente de bucle cerrado para la circulación del fluido de trabajo (a base de agua) que actúa como el medio de transferencia de energía térmica. Estas aletas 318 también actúan como “turbuladores” mecánicos que inducen características de flujo en el anillo del intercambiador de calor de pozo 320 entre el revestimiento exterior 302 y la tubería interna 304 que mejoran moderadamente la transferencia de energía geotérmica hacia o desde las formaciones de tierra al tiempo que minimizan las pérdidas de presión. Típicamente el fluido de trabajo se bombea por el anillo 320 abajo (flecha A) y retrocede por la tubería interna 304 (flecha B) para salir a la superficie bajo el control del módulo de control de superficie, aunque con base en la aplicación precisa la dirección de la circulación puede invertirse en algunos casos para proporcionar un desempeño óptimo”.

[0010] Este pasaje enseña una inversión de flujo del fluido de trabajo dentro de un solo pozo, pero no aborda ningún mecanismo para controlar los problemas térmicos dentro de la formación en la cual se está llevando a cabo la minería de calor.

[0011] Guodong et al., en Explotación geotérmica de rocas secas calientes a través de la transmisión de calor en un pozo horizontal (Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission in a horizontal well), Energy 128 (2017) p366-377, concluyen que el intercambio de calor mejora entre la formación rocosa circundante caliente a través de largos segmentos horizontales de un pozo de bucle cerrado utilizando fluidos de trabajo específicos, un aumento en la longitud del pozo horizontal y la tasa de inyección de fluidos en tubería térmicamente insultada aumentan la tasa de la minería de calor y que se desprenden beneficios del uso de segmentos horizontales de múltiples ramas.

[0012] Tomadas en su conjunto, las enseñanzas del estado de la técnica resultan útiles, pero no abordan cuestiones como: La gran huella inherente a múltiples pozos horizontales ramificados, la disposición y configuración de los pozos dentro de un volumen de

formación de roca dado para mejorar la minería de calor o la temperatura máxima y mínima a lo largo de la longitud del pozo.

[0013] Reconociendo estas deficiencias, la tecnología en estudio estipulada en este documento hace avanzar la tecnología geotérmica un paso más allá y combina operaciones unitarias determinante de una manera única para recuperar eficientemente la energía térmica dentro de un gradiente geotérmico con independencia de la calidad y variación del gradiente, la porosidad de la formación, las condiciones ambientales, la localización geográfica, entre otros.

[0014] En el estado de la técnica paralelo de la industria del petróleo y el gas, las técnicas de perforación de pozos multilaterales, los fluidos de perforación específicos, etc. están bien establecidos, pero la simple transferencia a la exploración y recuperación geotérmicas no es realista o factible; la recuperación de energía geotérmica presenta sus propias complicaciones. Se deben tener en cuenta varios factores para sintetizar un protocolo de recuperación viable. Esto requiere la capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros termodinámicos durante la recuperación de energía, mitigar cualquier problema de integridad o desempeño del pozo, revertir, redirigir o detener el flujo del fluido de trabajo, cambiar la composición del fluido de trabajo entre otros. La unificación en la secuencia adecuada requiere un análisis basado en una vasta apreciación de una serie de tecnologías; si esto no existe, la solución llega a ser laberíntica.

[0015] Esto se evidencia en la infinidad de antecedentes del estado de la técnica geotérmica que ha enfrentado problemas de perforación, formulaciones de fluidos de trabajo, arreglos complejos de intercambiadores de calor con posicionamiento tanto en el fondo del pozo como en la superficie, calidad y ubicación de gradientes, bucles continuos y discontinuos, revestimientos de pozos y variaciones de estos.

[0016] Debido al panorama del estado de la técnica geotérmica, una técnica que navegue a través de las notables complicaciones para eludirlas y dar lugar a una solución universal sería de gran provecho.

[0017] La presente invención proporciona soluciones efectivas a las limitaciones actuales en la medida en que la producción de energía geotérmica puede convertirse económicamente en un método de producción de energía de primer nivel.

DIVULGACIÓN DE LA INVENCION

[0018] Uno de los objetos de la presente invención es proporcionar control del perfil de temperatura en la roca que rodea los pozos geotérmicos.

[0019] Otro objeto de una modalidad de la presente invención es proporcionar un método para maximizar la recuperación de energía geotérmica dentro de una formación que tiene un gradiente geotérmico, que comprende: Determinar el gradiente geotérmico dentro del volumen de roca de la mencionada formación;

formar una configuración de pozo para ubicación y posicionamiento dentro del mencionado volumen de roca, en donde la configuración del pozo está basada en un gradiente geotérmico determinado para lograr la máxima recuperación térmica, la configuración del pozo comprende un bucle cerrado que tiene un pozo de entrada y pozo de salida y sección de interconexión lateral en comunicación fluida, la cual sección lateral de la mencionada configuración está posicionada dentro del mencionado volumen de roca;

seleccionar por lo menos un fluido de trabajo para hacerlo circular en una secuencia predeterminada dentro de la mencionada configuración basada en:

configuración del pozo;

variación de gradiente geotérmico; y

geología de la formación;

determinar la temperatura del fluido de trabajo a partir de la circulación secuenciada dentro de la mencionada configuración del pozo; y

seleccionar por lo menos uno de entre:

redirección y distribución del fluido de trabajo dentro de la mencionada configuración;

composición del fluido de trabajo;

velocidad de flujo de fluido de trabajo dentro de la mencionada configuración;

dirección del flujo del fluido de trabajo; y

combinaciones de estos para maximizar la recuperación de energía con el mencionado fluido de trabajo a partir del mencionado volumen de roca.

[0020] La transferencia de calor de la roca es inversamente proporcional a la temperatura del fluido de trabajo dentro del pozo. La máxima de transferencia de calor se produce en el "talón" del pozo de entrada en donde la temperatura del fluido de trabajo dentro del pozo es mínima. El fluido de trabajo se calienta a medida que atraviesa la sección horizontal del pozo hacia la "puntera" del pozo. Esto se evidencia con los datos del perfil

térmico. El perfil de transferencia de calor se observa generalmente como un estrechamiento del talón a la puntera con el mínimo en el pozo de salida.

[0021] Se ha encontrado que varias configuraciones de pozos combinados tienen un efecto beneficioso en el perfil, permitiendo una mayor extracción de calor de un volumen dado de roca y reduciendo los costos de construcción del pozo y los “puntos muertos” en los cuales la extracción de calor es ineficiente.

[0022] Se ha encontrado que la disposición interdigitada o en malla de secciones horizontales de pozos cercanos compensa la temperatura máxima y la mínima en los pozos. El efecto se realiza con proximidad suficiente para el contacto térmico entre pozos. Con el flujo de fluido de trabajo en oposición entre pozos próximos se puede inducir un equilibrio de temperatura en la formación geotérmica de tal manera que la máxima de un pozo contrarresta o mitiga la mínima de un pozo próximo.

[0023] Para mejorar aún más la extracción de energía térmica desde el interior de la formación, la red de configuración del pozo puede formarse sellando el pozo durante la perforación con ausencia de revestimiento en secciones laterales de los pozos. Esto obviamente tiene un beneficio de costo pronunciado junto con una termodinámica ventajosa. Esto contribuye a la aplicabilidad universal del protocolo; la configuración se puede utilizar en cualquiera de un gradiente alto de temperatura, gradiente bajo de temperatura, zona conductora dentro del gradiente, zona convectiva dentro del gradiente, zona de alta permeabilidad dentro de la formación, zona de baja permeabilidad dentro de la formación y combinaciones de estos.

[0024] La composición de sellamiento también puede incluir materiales para mejorar la conductividad térmica del sello. Las composiciones adecuadas se pueden ver en el estado de la técnica conocido típicamente por Halliburton, Baker Hughes y otros.

[0025] Además, la composición del fluido de trabajo puede incluir aditivos para mantener la integridad del pozo en la configuración y la densidad de fluido para la resistencia a la compresión de los pozos en la configuración.

[0026] Pueden incluirse operaciones de unidades mecánicas o químicas auxiliares y combinaciones de estos para mantener una integridad del pozo. Esto puede comprender el uso de sellantes químicos y agentes densificantes introducidos en la configuración del pozo en ubicaciones predeterminadas por lo menos en una de entre una sola operación y operaciones en fases secuenciales, dependiendo de los requerimientos.

[0027] Con respecto a las operaciones mecánicas, se pueden incorporar revestimientos/uniones multilaterales en lugares predeterminados según sea necesario.

[0028] Se pueden añadir agentes reductores de arrastre u otros aditivos al fluido de trabajo para mejorar su desempeño termodinámico, reducir o eliminar la carga parasitaria de la bomba, y permitir que se perforen redes de pozos más grandes a la vez que se mantiene un desempeño hidráulico óptimo.

[0029] Además, el método facilita proporcionar suficientes pérdidas de presión por fricción hidráulica en cada sección lateral para controlar pasivamente la distribución del flujo dentro de las secciones laterales en la mencionada configuración.

[0030] Con respecto a las configuraciones del pozo, estas pueden ser espaciadas, en ángulo, apiladas, conglomeradas, interdigitadas e interconectadas y combinaciones de estas individuales dentro del volumen de roca para maximizar la extracción de energía. La orientación también mitigará cualquier interferencia térmica o “puntos muertos”, así como la posible necesidad de recarga térmica de pozos individuales que pueden requerir inactividad con flujo de fluido de trabajo en reposo en un marco de tiempo predeterminado.

[0031] Los pozos de entrada y los pozos de salida de las configuraciones pueden ser comunes a por lo menos algunas de las configuraciones de pozos próximos. También se contemplan sitios individuales o múltiples. Además de esto, los bucles cerrados de las configuraciones de pozos pueden estar por encima o por debajo del sitio de superficie. Esto dependerá de los detalles de la situación individual.

[0032] Habiendo descrito así generalmente la invención, ahora se hará referencia a los dibujos que la acompañan.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0033] La Figura 1 es un perfil de temperatura que ilustra la temperatura a la distancia radial de la línea central del pozo en relación con la posición axial a lo largo del pozo horizontal;

[0034] La Figura 2 es una ilustración térmica del volumen radial de roca extraída para el calor para un par de pozos horizontales separados;

[0035] La Figura 3 es una vista similar a la Figura 2, en donde el flujo de fluido de trabajo se invierte para un par de pozos horizontales;

[0036] La Figura 4 es una ilustración esquemática de un sistema de pozos que tiene una pluralidad de pozos horizontales comúnmente conectados a un pozo de entrada y un pozo de salida;

[0037] La Figura 5 es una vista similar a la Figura 4, que ilustra un sistema de pozos interdigitados de acuerdo con una modalidad de la presente invención;

[0038] La Figura 6 es una vista de plano superior de una modalidad alternativa de la presente invención;

[0039] La Figura 7 es un corte transversal de una disposición de pozos;

[0040] La Figura 8 es un corte transversal de otra disposición de pozos;

[0041] La Figura 9 es una vista de plano superior de una modalidad alternativa de la presente invención;

[0042] La Figura 10 es un corte transversal a lo largo de la línea 9-9 de la Figura 9;

[0043] La Figura 11 es una ilustración esquemática de una red de configuración de pozos situados dentro de un gradiente geotérmico de una formación rocosa;

[0044] La Figura 12 es una ilustración esquemática de una secuencia de circulación dentro de sistemas de pozos en una red de configuración;

[0045] La Figura 13 es un diagrama de flujo de eventos involucrados en el protocolo; y

[0046] La Figura 14 es una red de pozos de bucle cerrado sobrepuesta en un mapa de distribución de temperatura de la formación;

[0047] Los números similares utilizados en las figuras denotan elementos similares

APLICABILIDAD INDUSTRIAL

[0048] La tecnología tiene aplicabilidad en la técnica de recuperación de energía geotérmica.

MEJOR MODO PARA LLEVAR A CABO LA INVENCION

[0049] Refiriéndose ahora a la Figura 1, se muestra una ilustración térmica que representa la disminución gradual de la temperatura a lo largo de la posición axial del pozo horizontal para un volumen de roca circundante dado. Cabe destacar que hay un calentamiento del fluido de trabajo desde el talón hasta la puntera del pozo. La transferencia de calor desde la roca es inversamente proporcional a esta temperatura del fluido de trabajo. En consecuencia, la mayor parte de la energía térmica es captada a un máximo del talón y un mínimo de la puntera. Esto obviamente tiene limitaciones de eficiencia, ya que se crean máximas y mínimas.

[0050] Refiriéndose ahora a la Figura 2, se muestra una vista de plano de dos pozos horizontales separados espaciados 10 y 12 dispuestos dentro de una formación geotérmica 14. Los pozos 10 y 12 están separados, pero permanecen en contacto térmico. Cada pozo 10 y 12 en este ejemplo tiene un flujo del fluido de trabajo en la misma dirección que se identifica en la figura. El perfil térmico, como se discute con referencia a la Figura 1, se representa para cada pozo 10 y 12, en donde los perfiles divergen entre sí saliendo así del área 16, un “punto muerto” del cual no se extrae energía térmica en un tiempo relevante.

[0051] La Figura 3 ilustra una primera solución al problema de extracción planteado con respecto a la Figura 2. En esta figura, la dirección del flujo entre los pozos horizontales 10 y 12 se invierte como se muestra. De esta manera, la temperatura máxima y mínima se equilibran para cada pozo 10 y 12 y el volumen de roca entre los dos pozos 10 y 12 no tiene “punto muerto” o “región no explotada”, es decir, el área 16. En este sentido, para un volumen dado de roca dentro del cual están dispuestos los pozos 10 y 12, se puede explotar un mayor volumen radial de roca para obtener calor o, en lengua vernácula, se puede recuperar una mayor cantidad de calor por unidad de área. Los pozos también están más juntos espacialmente, proporcionando una reducción significativa en los costos de perforación/construcción de pozos.

[0052] La Figura 4 es una ilustración esquemática de un sistema de pozos laterales u horizontales múltiples del estado de la técnica, generalmente denotado por el número 18. En esta modalidad, los pozos horizontales 20 a 32 están en una relación generalmente radial separada, todos compartiendo un pozo de entrada 36 y un pozo de salida 38 comunes. En esta modalidad, los pozos horizontales tienen, a manera de ejemplo, entre 2000 m y 8000 m de longitud.

[0053] La Figura 5 ilustra una disposición interdigitada o en malla de dos sistemas de pozos 18. Se ha constatado debido a la eficacia del arreglo examinado con respecto a la Figura 3, que disponer los dos sistemas de pozos 18 en contacto térmico separado presenta el beneficio descrito en relación con la Figura 3. El segundo sistema de pozos 18 incluye los pozos horizontales 38 a 50, y similar a la Figura 4 tienen un pozo de entrada común 52 y pozo de salida común 54. Con este arreglo, cada uno de los pozos próximos como, por ejemplo, 20, 38; 22, 40; 24, 42, etc., tiene una dirección de flujo del fluido de trabajo opuesta entre sí y así lograr el resultado como se indica con respecto a la Figura 3. Como se apreciará, esto aumenta sustancialmente la densidad del pozo para un

volumen dado de roca dentro de la formación geotérmica y por ende la cantidad de energía térmica extraída dentro del fluido de trabajo.

[0054] Volviendo ahora a la Figura 6, se muestra una modalidad alternativa de la presente invención en la cual los sistemas de pozos 18 están dispuestos lado a lado en una disposición invertida. En este arreglo, el primer sistema de pozos 18 incluye múltiples pozos 56, 58 y 60 conectados comúnmente al pozo de entrada 62 y al pozo de salida común 64. Desde la entrada 62 hasta la salida 64, los múltiples pozos 56, 58 y 60 convergen y, por tanto, el espaciamiento entre ellos varía de 62 a 64. La dirección del flujo del fluido de trabajo va de 62 a 64 como se indica. Trabajar en conjunto con los múltiples pozos 56, 58 y 60 se encuentra un segundo conjunto de pozos múltiples 66, 68 y 70. Estos últimos comparten una entrada común 72 y una salida común 74. Este arreglo es el mismo que el de los pozos 56, 58 y 60, con la excepción de que la convergencia es opuesta a la del primer sistema de pozos 18, es decir, el flujo del fluido va de 72 a 74. Además, el pozo múltiple 66 está espaciado, pero térmicamente próximo al pozo múltiple 60. Cada uno de los sistemas de pozos 18 está vinculado a 76 y 78 para el intercambio de fluidos entre ellos. Como se señaló, se trata de un arreglo alternativo para mitigar el perfil de temperatura máxima y mínima inducido en el volumen de roca.

[0055] La Figura 7 ilustra un corte transversal de 7 pozos múltiples en el punto convergente discutido en relación con la Figura 6, cerca del pozo de salida, en donde la relación de espaciamiento entre los pozos múltiples 82 a 92 se muestra denotado por la distancia "X" con una distancia de ejemplo de 20 m a 80 m. Los pozos están saliendo de la página. La Figura 8 ilustra un corte transversal de 7 pozos múltiples 82 a 92 en el punto divergente, cerca del pozo de entrada, con ejemplo de espaciamiento "Y" que es equidistante entre 80 m y 120 m.

[0056] Este arreglo es una alternativa al examinado con respecto a la Figura 5, pero logra el mismo beneficio térmico debido a la dirección de flujo del fluido y la proximidad térmica de los pozos múltiples.

[0057] Con referencia a la Figura 9, se muestra una modalidad alternativa del arreglo de la Figura 6. En esta modalidad se proporciona conexión interdigital. En este ejemplo, varios pozos 96, 98 y 100 que tienen un pozo de entrada común 100 y un pozo de salida común 102 y divergen de 100 a 102. Los pozos múltiples 96, 98 y 100 están interdigitados con los pozos múltiples 104, 106 y 108. Estos últimos comparten un pozo de entrada común 110 y un pozo de salida común 112. El patrón de pozos difiere de 112 a 110. Las relaciones de espaciamiento se observan igual que con las modalidades anteriores para

lograr los resultados de captación térmica. Cada uno de los sistemas de pozos está vinculado para el intercambio de fluidos en 114 y 116.

[0058] La Figura 10 es una ilustración esquemática en corte transversal de un sistema de pozos 118, 120 y 122 en relación espacial y contacto térmico similar con los pozos 124, 126 y 128. El flujo del fluido de trabajo de 118, 120 y 122 es opuesto al de los pozos 124, 126 y 128. El espaciamiento entre pozos depende de una serie de factores.

[0059] Refiriéndose ahora a la Figura 11, se muestra una ilustración esquemática de una red de configuración planificada de pozos dentro de una formación de roca que tiene un gradiente geotérmico variable, denotado por el número 130. Como se ilustra en el ejemplo, los sistemas de pozos laterales se denotan por el número 18 como se hace referencia con respecto a las figuras descritas anteriormente y pueden suscribirse a cualquiera o a combinaciones de las configuraciones discutidas anteriormente. La designación numérica tiene solo fines de claridad.

[0060] Con respecto a la disposición de los sistemas de pozos, estos pueden estar espaciados, angulados, apilados, conglomerados, interdigitados, interconectados y combinaciones de estos dentro del volumen de roca para maximizar la extracción de energía. La disposición se realizará una vez que se determine el gradiente geotérmico, junto con la conductividad térmica de la roca. Esta flexibilidad en la metodología se ve reforzada por el hecho de que la perforación de los pozos se puede hacer mientras se sella el revestimiento ausente del pozo. En algunos escenarios específicos, el revestimiento se puede utilizar en ubicaciones predeterminadas dentro de la red.

[0061] La configuración puede incluir configuraciones discretas de pozo de bucle cerrado que tienen una entrada 36 y una salida 38 y laterales 20 a 32 (que se muestran más claramente en la Figura 3) dispuestos dentro del gradiente 130 y/o pueden estar interconectados con la conexión común de las entradas 36 y salidas 38 entre configuraciones en una red. Las conexiones de entrada comunes están indicadas por el número 132 y las salidas comunes por número 134. Además, la salida común 134 o las salidas individuales 38 pueden estar conectadas en red a configuraciones de pozos adyacentes o próximos a las que se hace referencia con el número 136. Esto se denota por la línea punteada y el número 138.

[0062] El gradiente puede comprender un gradiente de alta temperatura, gradiente de baja temperatura, zona conductora dentro del mencionado gradiente, zona convectiva dentro del mencionado gradiente, zona de alta permeabilidad dentro de la formación, zona de baja permeabilidad dentro de la formación y combinaciones de estos.

[0063] La Figura 12 representa esquemáticamente el intercambio cruzado del fluido de trabajo dentro de la red. De esta manera se evita la variación térmica o bajo producción en la red de pozos. En consecuencia, el fluido de trabajo puede ser redirigido y distribuido dentro de la configuración, la composición del fluido de trabajo puede cambiarse completamente o modificarse con aditivos, la velocidad de flujo de fluido puede ser alterada, la dirección puede ser alterada y combinaciones de estos para maximizar la recuperación de energía con el fluido de trabajo del gradiente geotérmico. Además, el flujo de fluido de trabajo puede detenerse por completo en una ubicación predeterminada dentro de la red dependiendo del desempeño y/o los problemas térmicos. Este procedimiento también facilita la recarga térmica de un pozo o sistema de pozos.

[0064] Volviendo a la Figura 11, los pozos de bucle cerrado 18 pueden cerrarse por encima o por debajo de la superficie, S, como se ilustra. Esto dependerá de las condiciones ambientales y otras variables que están al alcance del experto. El control operativo, como el suministro de fluidos, el monitoreo de la temperatura, el muestreo de fluidos, la dirección, la velocidad, entre otras cosas, se puede realizar en la superficie, S, en 140 utilizando cualquiera de los mecanismos e instrumentos adecuados conocidos en el estado de la técnica para lograr los resultados deseados. La energía térmica recuperada se puede transferir a un convertidor de energía 142 adecuado para ser distribuida y/o almacenada en un dispositivo de almacenamiento 144 para uso diferido. Ventajosamente, la energía recuperada se puede utilizar para generar vapor para usar en un proceso industrial. Dependiendo de las condiciones específicas, la red de pozos puede configurarse adyacente o próxima a un proyecto industrial existente.

[0065] La Figura 13 ilustra el protocolo general con las fases individuales delineadas. Dentro de las fases 2 a 4, la secuencia de eventos puede variar dependiendo de las condiciones ambientales, la geología, el gradiente, el tipo y la variabilidad de la roca, etc. La intención es establecer la elegancia del protocolo con las operaciones clave necesarias para maximizar la recuperación térmica independientemente de las condiciones que es una característica distintiva de la presente tecnología.

[0066] La Figura 14 ilustra cómo los conceptos anteriores presentados se ponen en el contexto de una distribución variable de temperatura dentro de la formación diana, ilustrada por los contornos de la isotérmica. La configuración óptima de la red de pozos, el espaciamiento entre los laterales, la dirección del flujo y la velocidad de flujo varían de acuerdo con el gradiente geotérmico y la distribución de la temperatura en la zona de destino.

[0067] Ahora se hará referencia a un ejemplo del protocolo.

[0068] Generalmente, el primer paso para optimizar un sistema de bucle cerrado es la determinación del gradiente de temperatura geotérmica en el área. El gradiente suele estar entre 28-35 °C/km en cuencas sedimentarias, pero puede aumentar hasta 50 °C en cuencas sedimentarias con una profundidad poco profunda de punto de Currie (corteza delgada), y en áreas con alto flujo de calor puede ser de hasta 150 °C/km.

[0069] Las zonas diana se identifican para disponer los pozos geotérmicos. A diferencia de la tecnología geotérmica tradicional, para los sistemas de bucle cerrado cualquier roca es una zona disponible ya que no se necesitan características de permeabilidad, porosidad o geológicas raras. Las zonas diana pueden ser arenisca, esquisto, aleurolita, lutita, dolomita, carbonatos o roca cristalina de basamento.

[0070] Algunas zonas diana son preferibles debido a una combinación de distribución de temperatura, conductividad térmica y tasa de penetración de la perforación. Por tanto, el siguiente paso es utilizar el gradiente geotérmico para determinar la distribución de la temperatura del volumen de roca como se ilustra en la Figura 14, que muestra un mapa de arriba hacia abajo de los contornos de temperatura (isotérmicas) de una formación dada. Las temperaturas adecuadas pueden ser de 85 °C a 250 °C o tan altas como 350 °C.

[0071] Se estima la distribución de conductividad térmica dentro del volumen de roca. Esto puede basarse en mediciones directas, datos de laboratorio extrapolados o calculados a partir de datos indirectos como velocidad sísmica, mineralogía o tipo de roca. La conductividad térmica oscila entre 1,7 W/m K para esquistos blandos y más de 4 W/m K para areniscas ricas en cuarzo.

[0072] El siguiente paso es determinar la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de las zonas diana y luego estimar la tasa de penetración de la perforación que es una función fuerte de la fuerza de compresión no confinada.

[0073] La tecnología geotérmica tradicional implica la búsqueda de una zona hidrotérmica y luego la optimización de la planificación y el desarrollo del recurso. En contraposición, dado que cualquier formación geológica es adecuada para sistemas de bucle cerrado, la selección de la zona diana puede basarse en parte en la tasa óptima de penetración de la perforación. EL SCP gobierna la tasa de penetración y normalmente oscila entre 40 MPa para esquistos débiles y tan alta como 300 MPa para rocas de basamento cristalino. La tasa de penetración durante la perforación es generalmente de 5 m/h para roca dura a más de 300 m/h para roca blanda.

[0074] Todas las operaciones de unidades mecánicas y químicas se consideran para mantener la integridad del pozo en el pozo de un sistema de bucle cerrado. El tipo de roca y la resistencia a la compresión no confinada dictarán en gran medida la solución óptima. Uno determina si basta con un sellante y/o aditivos de fluidos de trabajo, o si se requieren cubiertas y/o uniones mecánicas, o cualquier combinación de estos.

[0075] Con las entradas de diseño del subsuelo identificadas en gran medida, el siguiente paso es analizar el perfil de energía dependiente de la temperatura requerido por el usuario final. Esto puede ser un perfil de energía térmica, potencia de enfriamiento, o energía eléctrica, o una combinación. Por lo general, el perfil varía a lo largo del día y de las estaciones. Del mismo modo, las condiciones ambientales del sitio de superficie y los precios basados en el tiempo pueden variar a lo largo del día y la estación y, opcionalmente, se pueden analizar.

[0076] La configuración de la red de pozos en tres dimensiones está diseñada para maximizar la extracción de energía útil del volumen de roca. Parte de este diseño implica determinar el espaciamiento relativo entre los pozos en la red para minimizar la interferencia térmica y los "puntos muertos", o áreas del volumen de roca en las cuales la energía no se extrae eficientemente. El espaciamiento óptimo es una función de la distribución de la temperatura en la zona diana, la conductividad térmica y las características y la velocidad de flujo del fluido de trabajo. También se deben tener en cuenta los costos de perforación. El espaciamiento suele estar entre 20 m y 120 m entre los pozos. El espaciamiento entre los pozos adyacentes en la red puede variar a lo largo de la longitud de los pozos para maximizar el desempeño, minimizar las interferencias y minimizar los "puntos muertos".

[0077] La configuración de la red de pozos también está diseñada para proporcionar suficientes pérdidas de presión por fricción hidráulica en cada lateral para controlar pasivamente la distribución del flujo entre los diversos laterales dentro de la configuración.

[0078] Los equipos de superficie deben integrarse en el diseño del sistema, ya que la salida de la infraestructura de superficie es simplemente la entrada en el sistema de bucle cerrado del subsuelo. Por tanto, el diseño y el desempeño de los equipos de las instalaciones de superficie tiene impacto sobre el diseño y el desempeño del subsuelo y viceversa. Por ejemplo, un motor de calor con una temperatura de salida de 70 °C tendrá un diseño de red de pozos subsuperficial óptimo diferente que cuando se acopla a un motor de calor con una temperatura de salida de 90 °C.

[0079] La composición del fluido de trabajo dentro de la red de pozos se determina junto con la velocidad de flujo óptimo a lo largo del tiempo. La composición del fluido de trabajo se selecciona para obtener un desempeño termodinámico óptimo, así como para mantener la integridad del pozo. El fluido de trabajo puede ser agua, fluidos supercríticos, hidrocarburos, refrigerantes o cualquier otro fluido. Los aditivos de integridad de pozo pueden consistir en sellantes, reactivos, partículas sólidas, agentes de puenteo, material de circulación perdido, agentes densificantes para mantener suficiente resistencia a la compresión en el pozo, o cualquier combinación. Se pueden añadir agentes reductores de arrastre al fluido de trabajo para permitir una configuración de red de pozos más grande sin alcanzar los límites hidráulicos ni afectar la eficiencia termodinámica general.

[0080] El fluido de trabajo circula por la red. La velocidad de flujo suele ser de entre 40 Us y 200 Us equivalentes de agua a través de una red de pozos en serie. Si la red de pozos está organizada con bucles de pozo paralelos o una combinación de bucles de pozos en serie o en paralelo, la velocidad de flujo total se escala de manera correspondiente.

[0081] La energía térmica se recupera del fluido de trabajo que circula a través de la red de pozos de bucle cerrado. Opcionalmente, el flujo se puede volver a distribuir dentro de la red para maximizar el desempeño.

[0082] La energía recuperada se distribuye, almacena y convierte en electricidad. La conversión entre diversas formas de energía y almacenamiento puede ser determinada de acuerdo con los requerimientos del usuario final y/o precios dinámicos.

[0083] Durante las operaciones se monitorean la temperatura del fluido y las anomalías de la composición, opcionalmente se monitorean y/o se estiman los perfiles térmicos de los pozos en la red y, opcionalmente, se monitorea y estima la integridad del pozo en la red.

[0084] Con base en el monitoreo y las estimaciones en tiempo real se pueden poner en marcha operaciones para optimizar el desempeño termodinámico. Como ejemplos se incluyen cambios en la velocidad de flujo, la dirección del flujo y la distribución del flujo entre los pozos de la red. Por ejemplo, la temperatura del fluido de salida en una parte de la red puede ser mayor de lo esperado, en tanto que la temperatura del fluido en otra parte de la red puede ser baja; las velocidades de flujo se pueden ajustar de conformidad.

[0085] La integridad del pozo se puede monitorear a través de caídas de presión medidas a través de la red de pozos, balance medido del volumen de fluido de trabajo (fuga o adición de volumen), variaciones de composición y volumen y características de los sólidos producidos. La reparación dinámica de los pozos se puede iniciar, como con

aditivos de fluidos de trabajo, reactivos o mediante pulsos de fluidos circulantes que contienen sellantes, agentes de puenteo o material de circulación perdido.

[0086] Se apreciará que las operaciones de la unidad descritas arriba se pueden realizar en serie, o en paralelo en un proceso iterativo integrado, o una combinación.

RESUMEN

Un método para controlar la temperatura máxima y mínima desde el talón hasta la puntera en secciones laterales del pozo geotérmico. El método incluye disponer por lo menos un par de pozos en proximidad en donde el contacto térmico es posible. El fluido de trabajo se hace circular en un pozo del par en una dirección y el fluido de trabajo del segundo pozo se hace circular en la dirección opuesta a la primera. De esta manera se puede alcanzar el equilibrio de la temperatura para mitigar la máxima y la mínima para dar lugar a una temperatura sustancialmente más uniforme de los fluidos de trabajo en los respectivos pozos y el área de formación rocosa situada entre ellos. El protocolo de operación específico se divulga teniendo en cuenta el control de temperatura para maximizar la recuperación de energía térmica.