

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 568 468**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04 (2006.01)

G05B 9/03 (2006.01)

F03D 80/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.03.2012 E 12714205 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.03.2016 EP 2691647**

54 Título: **Sistema de control de turbina eólica con votación descentralizada**

30 Prioridad:

30.03.2011 US 201161469209 P

24.06.2011 DK 201170325

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

29.04.2016

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

BENGTSON, JOHN;

DONESCU, VICTOR;

KJÆR, PHILIP CARNE y

SKAUG, KENNETH

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 568 468 T3

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

Sistema de control de turbina eólica con votación descentralizada

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un sistema de control de turbina eólica con tolerancia a fallos que comprende un esquema de votación descentralizada, teniendo como objetivo dicho esquema de votación descentralizada seleccionar el valor de punto de referencia de turbina eólica más fiable de entre una pluralidad de valores de punto de referencia de turbina eólica disponibles.

Antecedentes de la invención

10 Los sistemas de control con tolerancia a fallos se implementan normalmente como sistemas redundantes que comprenden duplicados de diversos módulos/dispositivos importantes. En caso de que un módulo/dispositivo importante falle su funcionalidad queda a cargo de un módulo/dispositivo similar.

15 El documento EP 2 080 903 A1 da a conocer un sistema de control a prueba de fallos para aplicaciones de turbina eólica. Según el documento EP 2 080 903 A1 una primera unidad de control realiza las denominadas funciones de control críticas, mientras que una segunda unidad de control independiente realiza las denominadas funciones de control no críticas. Las unidades de control primera y segunda están acopladas entre sí por medio de una red. El documento EP 2 080 903 A1 comenta las desventajas asociadas con sistemas de control de turbina eólica redundantes, en los que se duplican las unidades de control críticas. Sin embargo, tal como se especifica en el párrafo [0014] del documento EP 2 080 903: "Además, las funciones de control del primer conjunto también pueden incluirse de manera redundante en el segundo conjunto, para proporcionar una degradación delicada dentro del sistema de control global".

20 Los documentos US 2009/0309360 y US 2009/0309361 comentan un método y un sistema para controlar un parque de energía eólica. En los documentos US 2009/0309360 y US 2009/0309361 una unidad de comunicación principal controla varias unidades de control priorizadas. En caso de que una unidad de control dada con una prioridad dada falle, la unidad de comunicación principal selecciona una unidad de control de menor prioridad para que se encargue de la funcionalidad de la unidad de control defectuosa.

25 Es una desventaja del método y el sistema sugeridos en los documentos US 2009/0309360 y US 2009/0309361 que la unidad de comunicación principal seleccione qué unidad de control queda a cargo en caso de que otra unidad de control se averíe o tenga un mal funcionamiento de cualquier otro modo. Sin embargo, en caso de que la propia unidad de comunicación principal se averíe, no hay unidad de sustitución alguna disponible. Por tanto, el método de control y el sistema de control sugeridos en los documentos US 2009/0309360 y US 2009/0309361 no puede considerarse un método/sistema de control con tolerancia a fallos, al menos no al nivel de la unidad de comunicación principal.

Puede considerarse como un objeto de las realizaciones de la presente invención proporcionar un sistema de control de turbina eólica con tolerancia a fallos.

35 Descripción de la invención

El objeto mencionado anteriormente puede cumplirse proporcionando, en un primer aspecto, un sistema de control con tolerancia a fallos para una turbina eólica que comprende una pluralidad de componentes de turbina eólica controlables, comprendiendo el sistema de control

- medios de control para generar una réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes,
- 40 - una red de comunicación de datos para transmitir la réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes a la pluralidad de componentes de turbina eólica, y
- una pluralidad de medios de votación descentralizada que están dispuestos de modo que unos medios de votación descentralizada se asignan a cada componente de turbina eólica, estando adaptado cada medio de votación descentralizada para seleccionar un valor de punto de referencia de la réplica de valores de punto de referencia.

45 Los componentes de turbina eólica que van a controlarse pueden ser ángulo de paso, guiñada, árbol principal, engranaje, generador, freno de potencia, estación hidráulica, bomba de agua, refrigeración, fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) o estación de metrología.

Las siguientes ventajas están asociadas con el primer aspecto de la presente invención:

- 50 1. La arquitectura del sistema de control de la presente invención satisface los altos requisitos de fiabilidad planteados en el control de turbinas eólicas modernas.
2. La arquitectura del sistema de control de la presente invención integra seguridad funcional y puede soportar

clases de funciones relacionadas con la seguridad tanto de modos de demanda baja, como de modos de demanda alta y modo continuo tal como se especifica en la norma IEC61508.

3. La arquitectura del sistema de control de la presente invención es escalable y puede componerse de un modo que permite la personalización de la funcionalidad a diversas disposiciones de plataformas de turbina eólica.

5 La arquitectura del sistema de control de la presente invención refleja de manera general el principio de diseño establecido "la función determina la forma". La arquitectura del sistema de control puede comprender subsistemas de turbina eólica adaptados para controlar uno o más de los componentes de turbina eólica mencionados anteriormente.

10 La arquitectura del sistema de control presentada puede utilizar varios subsistemas que pueden tener una tolerancia a fallos inherente mediante nodos de control distribuido replicados (DCN). Además, la arquitectura del sistema de control presentada puede utilizar una red de comunicación en tiempo real (RTCN) con tolerancia a fallos.

15 Las funciones de control de los subsistemas de turbina eólica se realizan mediante DCN y componentes eléctricos adicionales como por ejemplo sensores, relés, arrancadores de motores, contactores o relés de estado sólido. Un DCN también puede servir como por ejemplo interfaz de sensor. Los DCN pueden integrar funciones relacionadas con la seguridad que soportan seguridad funcional con tolerancia a fallos a nivel de nodo y sistema.

El control con tolerancia a fallos puede comprender además medios de controlador principal centralizado adaptados para generar señales de referencia para los medios de control para generar la réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes.

20 Además, el sistema de control con tolerancia a fallos puede comprender además un sistema de sensor con tolerancia a fallos que comprende una pluralidad de sensores, estando dispuesta dicha pluralidad de sensores de manera redundante. La pluralidad de sensores pueden estar adaptados para medir al menos un parámetro eléctrico.

25 La red de comunicación de datos puede comprender una red de comunicación en tiempo real, tal como una Ethernet activada por tiempo. La red de comunicación Ethernet activada por tiempo puede implementarse como una red con tolerancia a fallos individual, una red con tolerancia a fallos doble o una red con tolerancia a fallos múltiple. La red de comunicación en tiempo real puede soportar comunicación de datos relacionados con la seguridad. Además, pueden proporcionarse medios para establecer una hora global.

30 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende un sistema de control con tolerancia a fallos según el primer aspecto. La pluralidad de componentes de turbina eólica controlables puede seleccionarse del grupo que consiste en: ángulo de paso, guiñada, árbol principal, engranaje, generador, freno de potencia, estación hidráulica, bomba de agua, refrigeración, UPS o estación de metrología.

En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un método para controlar una turbina eólica que comprende una pluralidad de componentes de turbina eólica controlables, comprendiendo el método las etapas de

- generar una réplica de valores de punto de referencia de componente de turbina eólica esencialmente concurrentes,

35 - transmitir los valores de punto de referencia a los componentes de turbina eólica en la turbina eólica a través de una red de comunicación de datos,

- realizar, en cada componente de turbina eólica, un proceso de votación descentralizada que comprende la etapa de seleccionar un valor de punto de referencia de la réplica de valores de punto de referencia, y

- aplicar el valor de punto de referencia seleccionado a una componente de turbina eólica.

40 El valor de punto de referencia seleccionado puede aplicarse a un componente de turbina eólica individual o a varios componentes de turbina eólica dentro de la turbina eólica. Tal como se mencionó anteriormente dichos componentes de turbina eólica que van a controlarse pueden ser ángulo de paso, guiñada, árbol principal, engranaje, generador, freno de potencia, estación hidráulica, bomba de agua, refrigeración, UPS o estación de metrología.

Breve descripción de los dibujos

45 A continuación se describirá la presente invención en mayor detalle con referencia a las figuras adjuntas, en las que la figura 1 muestra una estructura de control con tolerancia a fallos de ejemplo en una turbina eólica,

la figura 2 muestra una Ethernet individual activada por tiempo con tolerancia a fallos de ejemplo,

la figura 3 muestra una Ethernet activada por tiempo con tolerancia a fallos doble de ejemplo,

la figura 4 muestra la arquitectura del sistema no relacionado con la seguridad,

la figura 5 muestra la arquitectura del sistema relacionado con la seguridad a prueba de fallos,
 la figura 6 muestra la arquitectura del sistema de control distribuido,
 la figura 7 ilustra una hora global de precisión,
 la figura 8 muestra un escenario de fallo individual de ejemplo en un sistema con tolerancia a fallos individual,
 5 la figura 9 muestra una vista de implementación de un sistema con tolerancia a fallos individual,
 la figura 10 muestra un escenario de fallo doble de ejemplo en un sistema con tolerancia a fallos doble,
 la figura 11 muestra una vista de implementación de un sistema con tolerancia a fallos doble,
 la figura 12 muestra un subsistema redundante n+m genérico de ejemplo, y
 la figura 13 muestra un sistema de control con tolerancia a fallos genérico en una turbina eólica.

10 Aunque la invención es susceptible a diversas modificaciones y formas alternativas, se han mostrado realizaciones específicas a modo de ejemplos en los dibujos y se describirán en detalle en el presente documento. Sin embargo, ha de entenderse que no se pretende que la invención se limite a las formas particulares dadas a conocer. En cambio, la invención va a cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que entran dentro del espíritu y alcance de la invención tal como se define por las reivindicaciones adjuntas. La aplicación de esta invención no se limita a una máquina generadora de turbina eólica sino que se extiende a aplicaciones de alto par de torsión y baja velocidad como elevadores y dispositivos de transporte que emplean máquinas de PM que funcionan normalmente con un funcionamiento de modo de motor.

Descripción detallada de la invención

20 En general, la presente invención tiene como objetivo proporcionar un sistema de control con tolerancia a fallos para turbinas eólicas. En las turbinas eólicas, el control con tolerancia a fallos se consigue proporcionando un método y un sistema que soportan una votación descentralizada, es decir en la que la selección de un punto de referencia se realiza en el sitio de un componente de turbina eólica. Un punto de referencia de componente de turbina eólica puede reflejar por ejemplo la potencia (activa y/o reactiva), la frecuencia, la tensión o la corriente que va a generar la turbina eólica. Los puntos de referencia de componente de turbina eólica también pueden reflejar otros parámetros
 25 tales como ángulo de paso, temperatura de fluidos de refrigeración, etc.

La presente invención se basa en una red de comunicación de datos de turbina eólica que debe ser de alta fiabilidad y tener capacidades que garantizan el suministro de datos dentro de un tiempo límite específico con una probabilidad muy alta. Redes adecuadas podrían ser Ethernet/IP, Ethernet POWERLINK, EtherCAT, SERCOS III, PROFINet-IRT, TTEthernet u otras redes de comunicación de datos con propiedades similares.

30 La siguiente descripción usará el término "RTCN" (red de comunicación en tiempo real) como término genérico para una red de comunicación con las propiedades deseadas.

La figura 1 muestra un ejemplo de un sistema con tolerancia a fallos de una turbina eólica. En la figura 1 tres DCN dispuestos de manera redundante 106-111 dando servicio cada uno a un módulo de generador de turbina eólica dado (WTG) 103 - 105 que incluye sensores 112, 114, 116, 118, 120, 121, 123, 124, 125, 127 y actuadores 113,
 35 115, 117, 119, 122, 126 están interconectados por una RTCN redundante a través de dos conmutadores de RTCN 101, 102. Por tanto, los datos procedentes de sensores y actuadores se pasan dentro de cada módulo de WTG 103-105 hacia/desde el RTCN a través de los DCN dispuestos de manera redundante 106-111. Por ejemplo, en el módulo de WTG 103, DCN dispuestos de manera redundante 106, 107 conectan sensores 112, 114 y actuadores 113, 115 con conmutadores de RTCN 101, 102, respectivamente. Si por ejemplo el DCN 106 falla, el DCN 107 que
 40 incluye el sensor 114 y el actuador 115 queda a cargo en lo relativo al módulo de WTG 103.

En general, los DCN pueden utilizar datos en esquemas de redundancia 2oo2 (2 de 2) o 2oo3 (2 de 3) dependiendo de la criticidad de la función. En caso de fallo en un DCN, se garantiza el funcionamiento continuado mediante el nodo replicado dentro del mismo módulo de WTG, véase el ejemplo anterior. Si ambos DCN dentro de un módulo de WTG dado funcionan sobre datos disponibles de la RTCN y si se toman medidas para garantizar que los DCN
 45 funcionan sobre los mismos datos, puede soportarse el determinismo de réplica.

Las RTCN pueden combinar las ventajas del paradigma de comunicación activada por tiempo con la flexibilidad de la Ethernet de amplia difusión. Por tanto, soportan tráfico Ethernet convencional al tiempo que garantizan una no interferencia con el tráfico de datos críticos. La utilización de tales redes de comunicación se considera ventajosa en relación con la presente invención.

50 El paradigma de comunicación activada por tiempo soporta el establecimiento de determinismo de réplica. En tales paradigmas de comunicación, la comunicación de datos en tiempo real en el RTCN se planifica en la fase de diseño y los nodos de control distribuido determinísticos de réplica asociados tienen un conocimiento a priori de cuándo hay

datos disponibles. Esta propiedad habilita que puede garantizarse que dos o más DCN replicados por subscripción funcionen sobre los mismos datos, ejecuten las mismas funciones al mismo tiempo, y por tanto es determinístico de réplica, o habilita por ejemplo que dos controladores principales funcionen sobre los mismos datos y produzcan la misma salida al mismo tiempo y por tanto es determinístico de réplica.

- 5 Las RTCN pueden proporcionar funcionalidad, por ejemplo funciones de conmutador, con propiedades específicas que soportan funciones relacionadas con la seguridad de “modo continuo” tal como se define en la norma IEC61508. Las funciones de seguridad de modo continuo dependerán de datos relacionados con la seguridad comunicados en la RTCN para realizar su función de seguridad. Tal tipo de red podría ser TTEthernet. Al utilizar este tipo de red de comunicación, la capacidad de la arquitectura con tolerancia a fallos de la presente invención puede extenderse para comprender funciones de seguridad de modo continuo.

En sistemas de control distribuido, las propiedades de tolerancia a fallos y tiempo real pueden soportarse por el establecimiento de una hora global precisa en la que los controladores y DCN tienen una noción común de la hora que se desvía muy poco, normalmente en el intervalo de un microsegundo o menos, sin embargo no se limita a esta precisión, véase la figura 7 y la descripción asociada.

- 15 La hora global dentro de sistemas de control distribuido soporta:

- Sincronización de adquisición de datos a través de controladores y DCN
- Sincronización de procesos a través de controladores y DCN
- Sincronización de comunicación de datos (comunicación activada por tiempo)
- Determinismo de réplica en controladores y DCN con tolerancia a fallos

- 20 La hora global puede establecerse por implementación de un Protocolo de Tiempo de Precisión compatible con IEEE-1588 en la turbina eólica. Alternativamente, la hora global puede establecerse utilizando el soporte inherente para una hora global de precisión que forma parte de muchas RTCN industriales. En sistemas en los que la hora global de precisión es crítica para la disponibilidad y/o seguridad de sistema, debe establecerse un nivel suficiente de tolerancia a fallos y fiabilidad en la distribución de la hora global de precisión para soportar esto.

- 25 Haciendo referencia ahora a la figura 2, los DCN 205-214 en el sistema de control con tolerancia a fallos están configurados para formar una RTCN redundante 200. La figura 2 pone como ejemplo una RTCN con tolerancia a fallos individual 200 que aplica conmutadores de comunicación dispuestos de manera redundante 201-204, en los que los conmutadores 201, 202 y los conmutadores 203, 204 están replicados/dispuestos de manera redundante. Cada uno de los DCN están conectados a dos conmutadores de comunicación. Esta estructura satisface la tolerancia a fallos requerida para una alta fiabilidad de sistema. Una conexión 215 a otros conmutadores de comunicación/RTCN también está disponible.

- 30 La figura 3 pone como ejemplo una RTCN con tolerancia a fallos doble 300 que aplica una arquitectura de comunicación redundante triple. Cada uno de los DCN 304-309 está conectado a tres de los conmutadores de comunicación dispuestos de manera redundante 301-303. Esta arquitectura de red satisface la tolerancia a fallos requerida para una muy alta fiabilidad de sistema y para sistemas con tolerancia a fallos con un largo tiempo medio para reparación tras el primer fallo. De nuevo, una conexión 310 a otros conmutadores de comunicación/RTCN está disponible.

- 35 En un sistema de control distribuido, se obtiene tolerancia a fallos mediante replicación de canales de comunicación y de los DCN, véanse las figuras 2 y 3. La propia RTCN puede ser de redundancia doble (figura 2) o triple (figura 3). Los controladores distribuidos pueden replicarse en dos, tres o más dependiendo del requisito de fiabilidad para cada subsistema y de la arquitectura con tolerancia a fallos elegida para el subsistema. También pueden proporcionarse conexiones a otras RTCN.

- 40 Preferiblemente, los DCN presentan un comportamiento de “silencio ante fallos” con el fin de permitir a los nodo(s) replicado(s) mantener el control sobre el objeto controlado. Esta propiedad debe permanecer estable hasta que el mantenimiento sobre la unidad defectuosa ha restaurado el sistema. Esto significa que el comportamiento de silencio ante fallos debe mantenerse con una muy alta probabilidad en caso de un segundo fallo en el nodo ya defectuoso. De otro modo, el nodo defectuoso puede perturbar el funcionamiento de la turbina eólica y provocar posiblemente un fallo de sistema crítico.

- 45 La arquitectura del sistema de control con tolerancia a fallos según la presente invención soporta tres clases de control diferentes, estas clases de control soportan los requisitos en aplicaciones relacionadas con turbina eólica.

50 1. Tolerancia a fallos, no relacionado con la seguridad: Esta clase de control cubre todos los controles que no tienen propiedades relacionadas con la seguridad. La tolerancia a fallos permite un funcionamiento continuado de la turbina en caso de fallo de componente. La arquitectura puede soportar tolerancia a fallos individual, doble o múltiple.

2. Tolerancia a fallos, relacionado con la seguridad, a prueba de fallos: Esta clase de control cubre controles

relacionados con la seguridad que pueden entrar inmediatamente en un estado seguro en caso de un fallo crítico en el sistema mientras que proporciona al mismo tiempo una tolerancia a fallos que permite el funcionamiento continuado de la turbina en caso de fallo de componente. La arquitectura puede soportar tolerancia a fallos individual, doble o múltiple.

5 3. Tolerancia a fallos, relacionado con la seguridad, modo continuo: Esta clase de control cubre controles relacionados con la seguridad que no tienen un estado seguro inmediato en caso de un fallo crítico. La tolerancia a fallos permite el funcionamiento continuado en caso de fallo de componente. Puede soportarse tolerancia a fallos individual, doble o múltiple. Esta clase de control puede requerir una RTCN con características específicas que garanticen la integridad de tráfico de datos críticos para la seguridad.

10 Además, la arquitectura del sistema de control con tolerancia a fallos según la presente invención soporta tres dominios de ejecución diferentes con paradigmas de ejecución diferentes:

1. Dominio de ejecución no relacionado con la seguridad maestro centralizado, véase la figura 4.

2. Dominio de ejecución relacionado con la seguridad maestro centralizado, véase la figura 5.

3. Dominio de ejecución de control distribuido, véase la figura 6.

15 La RTCN sirve como estructura principal de comunicación compartida para las funciones en estos dominios de ejecución. Pueden intercambiarse datos entre nodos de producción y nodos de consumo mediante patrones de mensaje apropiados como por ejemplo publicar/suscribir u otro patrón adecuado.

20 El Dominio de ejecución no relacionado con la seguridad maestro centralizado comprende funciones relacionadas con el control normal de la turbina eólica. La ejecución en este dominio está caracterizada por un paradigma maestro-esclavo replicado que utiliza uno o más controladores principales 401 y DCN de réplica 405, 407, 410, 412, 414, 416 interconectados por la RTCN replicada 400, véanse los elementos de línea continua de la figura 4. Los elementos de línea discontinua están inactivos en este dominio. Cuando se utiliza una RTCN determinística 400, este dominio soporta tolerancia a fallos mediante los DCN determinísticos de réplica redundantes 405, 407, 410, 412, 414, 416. La replicación de la RTCN 400 y los DCN 405, 407, 410, 412, 414, 416 se ilustran como estructuras apiladas (de RTCN y DCN) en la figura 4.

25 El dominio de ejecución de control de seguridad maestro centralizado comprende funciones relacionadas con la seguridad relacionadas con la protección de personas o bienes. La ejecución en este dominio está caracterizada por un paradigma de maestro centralizado que utiliza controladores de seguridad maestros replicados 502 (línea continua) y DCN relacionados con la seguridad replicados asociados 506, 508, 511, 513, 515 (línea continua), véase la figura 5. Los controladores replicados 502 y los DCN replicados 506, 508, 511, 513, 515 están interconectados por la RTCN replicada 500 (línea continua). Los elementos de línea discontinua están inactivos en este dominio. Cuando se utiliza una RTCN determinística, este dominio soporta tolerancia a fallos mediante DCN determinísticos de réplica redundantes.

30 El dominio de ejecución de control distribuido habilita un enfoque sin maestro para el control. El enfoque soporta tolerancia a fallos mediante DCN determinísticos de réplica redundantes 603, 604, 607, 609, 610, 616 interconectados a través de RTCN replicada 600, véanse los elementos de línea continua de la figura 6. Los elementos de línea discontinua están inactivos. Este dominio no aplica ningún controlador(es) maestro(s) y el área primaria de aplicación para este dominio es el control relacionado con la seguridad de modo continuo. Sin embargo, este paradigma también puede usarse en relación con controles relacionados con la seguridad y no relacionados con la seguridad.

35 En general, los controladores principales con tolerancia a fallos, los controladores de seguridad maestros y DCN pueden funcionar en cualquiera de modo activo, modo en espera pasivo, modo en espera frío dependiendo de los requisitos en el subsistema de turbina eólica controlado.

40 El modo activo se utiliza en caso de que la pérdida de control en tiempo real sea crítica. Los nodos se hacen funcionar como determinístico de réplica, lo que significa que funcionan sobre los mismos datos y producen la misma salida esencialmente al mismo tiempo (salida de datos/control esencialmente concurrente). Pueden aplicarse propiedades determinísticas de réplica a todos los tipos de controlador en el sistema de control incluyendo pero sin limitarse a, controladores principales, controladores y DCN de seguridad maestros. Las salidas de control de un conjunto de DCN con tolerancia a fallos se combinan y votan de manera implícita en la interfaz de actuador o sistema de actuador. Este esquema de redundancia no provoca pérdida temporal de control si un nodo de control distribuido falla. Un requisito previo para una tolerancia a fallos por DCN replicados es un comportamiento predecible de un nodo fallado. El modo de fallo deseado tiene silencio ante fallos.

45 El modo en espera pasivo, sólo está activo un nodo en un subsistema de turbina eólica redundante y el/los otro(s) nodo(s) está(n) listo(s) para asumir el control si el primer nodo falla. Las salidas de control de DCN todavía pueden combinarse y votarse de manera implícita en el sistema de actuador, pero sólo un nodo está activo en el control. Este esquema de redundancia podría utilizarse si la pérdida temporal de la función de control no es crítica durante la

duración de la integración del nodo en espera pasivo. El modo en espera pasivo requiere que el nodo pasivo tenga medios para detectar si el nodo activo ha fallado o no. Esto puede conseguirse mediante la supervisión de la función, mediante un servicio de membresía, mediante un protocolo de acuerdo entre los nodos o mediante un protocolo de acuerdo entre el nodo pasivo y el controlador relacionado.

- 5 En modo en espera frío, sólo un nodo en un subsistema redundante está activo y el/los otro(s) nodo(s) está(n) apagado(s). Deben encenderse para asumir el control. Todavía pueden combinarse y votarse de manera implícita salidas de control de DCN en el sistema de actuador, pero sólo un nodo está activo en el control. Este esquema de redundancia podría utilizarse si la pérdida de función de control no es crítica durante la duración del arranque y la integración del nodo en espera frío. El modo en espera frío requiere que el sistema tenga medios para detectar si el
10 nodo activo ha fallado o no y posteriormente activar el nodo en espera frío. La activación podría controlarse desde el controlador relacionado.

Con el fin de garantizar la fiabilidad y seguridad deseadas de sistemas de control con tolerancia a fallos en aplicaciones de turbina eólica, los nodos en el sistema deben garantizar que la propiedad de silencio ante fallos permanecerá válida durante la vida útil de funcionamiento con una muy alta probabilidad.

- 15 Tal como se expresó anteriormente con referencia a la figura 7, las propiedades de tolerancia a fallos y tiempo real en sistemas de control distribuido pueden soportarse por el establecimiento de una hora global precisa 717 en la que los controladores replicados 701, 702 y DCN replicados 703-716 tienen una noción común del tiempo que se desvía muy poco, normalmente en el intervalo de un microsegundo o menos, véase la figura 7. En la figura 7 una RTCN replicada 700 interconecta controladores replicados 701, 702 y DCN replicados 703-716. Los controladores
20 replicados 701, 702 y DCN replicados 703-716 pueden ser de los mismos tipos que los dados a conocer en conexión con los dominios ilustrados en las figuras 4-6.

Tolerancia a fallos individual

- Una arquitectura con tolerancia a fallos individual en subsistemas, tales como en uno de los módulos de WTG 103-105 de la figura 1, será en la mayoría de casos suficiente para cumplir con los requisitos de fiabilidad en turbinas
25 eólicas.

- La figura 8 muestra una vista de red de fiabilidad genérica en DCN con silencio ante fallos, con tolerancia a fallos 801-804 en un subsistema de turbina eólica de un sistema de control con tolerancia a fallos 800. Los DCN 801-804 pueden implementarse como nodos replicados activos o nodos en espera fríos o pasivos. Valores de sensor procedentes de los sensores 805-810 están disponibles para los DCN 801-804 como datos sobre RTCN y
30 opcionalmente también como datos de sensor locales. Los datos pueden utilizarlos los controladores en esquemas de redundancia 2oo2 (2 de 2) o 2oo3 (2 de 3) dependiendo de la criticidad de la función.

El dibujo superior de la figura 8 muestra un subsistema de turbina eólica para controlar un objeto 811 en condiciones de funcionamiento normales. Los sensores replicados 805-807 proporcionan datos a DCN replicados 801 802 con el fin de controlar el objeto 811.

- 35 En el dibujo inferior de la figura 8 se representa una situación de fallo. En caso de fallo en un DCN 803, el funcionamiento continuado se garantiza por el nodo replicado 804. Por tanto, incluso aunque el DCN 803 falle, todavía pueden aplicarse señales de sensor procedentes de los sensores 808-810 para controlar el objeto 812 a través del DCN 804.

- 40 Si ambos DCN 801, 802 ó 803, 804 funcionan sobre datos disponibles de la RTCN y no sobre datos internos y si se toman medidas para garantizar que los DCN funcionan sobre los mismos datos, puede soportarse determinismo de réplica.

- La implementación de las unidades con tolerancia a fallos individual en el sistema de control con tolerancia a fallos 900 para controlar el objeto 907 se pone como ejemplo en la figura 9. Los sensores 908, 909 están conectados a los DCN con silencio ante fallos replicados 905, 906 y posiblemente a otro DCN 903 en el sistema. Datos de sensor procedentes del sensor 902 se ponen a disposición en la RTCN 901 a través del DCN 903 y el conmutador de RTCN replicada 904. Las líneas continua y discontinua de la RTCN ilustran la redundancia individual de la RTCN 901.
45

Tolerancia a fallos doble

En subsistemas de turbina eólica en los que los requisitos de fiabilidad o seguridad no pueden sostenerse mediante la arquitectura con tolerancia a fallos individual, puede utilizarse tolerancia a fallos doble.

- 50 La figura 10 muestra una vista de red de fiabilidad genérica sobre DCN con silencio ante fallos, con tolerancia a fallos doble 1001-1009 adaptados para controlar objetos 1019-1021. Valores de sensores procedentes de los sensores 1010-1018 están disponibles para los DCN 1001-1009 como datos sobre la RTCN y opcionalmente también como datos de sensor locales. Los datos de sensor pueden utilizarlos los controladores en esquemas de redundancia 2oo2 o 2oo3 dependiendo de la criticidad de la función.

Si los DCN 1001-1009 funcionan sobre datos disponibles de la RTCN y no sobre datos internos y si se toman medidas para garantizar que los DCN funcionan sobre los mismos datos, puede soportarse determinismo de réplica.

5 El dibujo superior de la figura 10 muestra un subsistema de turbina eólica funcionando apropiadamente en el que se aplican señales de sensor procedentes de sensores 1010-1012, a través de los DCN 1001-1003, para controlar el objeto 1019.

En caso de fallo en un DCN 1004, se garantiza el funcionamiento continuado por los nodos replicados 1005, 1006, véase el dibujo central en la figura 10. En caso de fallo en dos DCN 1007, 1008, el funcionamiento continuado puede garantizarse por el nodo restante 1009, véase el dibujo inferior en la figura 10.

10 La implementación de las funciones de tolerancia a fallos doble en la plataforma de controlador, es decir los DCN, para controlar un objeto de turbina eólica 1109 se pone como ejemplo en la figura 11. Los sensores 1108, 1110 están conectados a los DCN con tolerancia a fallos doble, con silencio ante fallos 1105, 1107 y posiblemente a otro DCN 1103 en el sistema. Datos de sensor procedentes del sensor 1102 se ponen a disposición en la RTCN replicada 1101 a través del DCN 1103 y el conmutador de RTCN replicada 1104. Los DCN funcionan sobre los datos disponibles de la RTCN, no sobre datos internos. Si se toman medidas para garantizar que los DCN funcionan sobre los mismos datos, puede soportarse determinismo de réplica. Las líneas continua y discontinua de la RTCN 1101 ilustran la redundancia individual de la RTCN 1101.

Tolerancia a fallos utilizando redundancia n+m

20 Algunos sistemas de control pueden beneficiarse de una arquitectura con tolerancia a fallos que utiliza redundancia n+m, véase la figura 12. La figura 12 muestra una RTCN con tolerancia a fallos individual 1200 (indicada por línea continua y discontinua) en la que un conmutador de RTCN 1201 está en comunicación con seis DCN con silencio ante fallos 1202-1207. Los seis DCN con silencio ante fallos 1202-1207 están configurados para controlar un objeto 1220 dado de una turbina eólica en respuesta a entradas de sensor procedentes de sensores 1208-1219. La redundancia n+m se establece mediante n+m DCN determinísticos de réplica 1202-1207 que ejecutan conjuntamente el control del objeto controlado 1220. Posibles áreas de aplicación para este tipo de redundancia podrían ser sistemas de guiñada y/o convertidor de potencia.

25 La figura 13 ilustra una arquitectura de control basado en TTEthernet de una turbina eólica 1300 que incluye una subestación de generador de turbina eólica (WTG) 1306, una torre de WTG 1307, una góndola de WTG 1308 y un buje de WTG 1309. Generalmente, la red TTEthernet de la figura 13 facilita la comunicación entre componentes de WTG 1306-1309 a través de los conmutadores de TTEthernet replicados 1301-1305.

30 La subestación de WTG 1306 incluye un controlador de subestación 1317 que está en comunicación, a través de los conmutadores de TTEthernet replicados (indicados como apilados) 1301, 1302, con nodos de control de torre replicados 1316 del módulo de torre 1315 y controladores principales de WTG replicados 1326 del módulo de torre 1325.

35 El controlador de subestación 1317 puede contener diversos controladores o servidores replicados 1318, tales como controladores de potencia, servidor de datos de central eléctrica (PP), controladores de subestaciones adicionales, SCADA etc.

El conmutador TTEthernet replicado 1302 de la torre de WTG 1307 facilita la conexión a otros WTG a través de la conexión 1327.

40 Además, se proporciona comunicación, a través de los conmutadores de TTEthernet replicados 1303, 1304, con los nodos de control de góndola replicados 1312 del módulo de góndola 1311, los controladores de potencia distribuida replicados 1310 del módulo de góndola 1329 y los controladores de seguridad maestros centralizados replicados 1314 del módulo de góndola 1313. Los controladores de potencia distribuida replicados 1310 pueden implicar diversos controladores para diversos esquemas de control.

45 Finalmente, se proporciona comunicación, a través del conmutador de TTEthernet replicado 1305, a los nodos de control de pala replicados (un nodo para cada pala) 1322, 1323, 1324 del módulo de buje 1321 y los nodos de control de sistemas hidráulicos replicados 1320 del módulo de buje 1319.

Tal como se mencionó anteriormente, RTCN adecuadas pueden incluir Ethernet/IP, Ethernet POWERLINK, EtherCAT, SERCOS III, PROFINet-IRT, TTEthernet (tal como se muestra en la figura 13) u otras redes de comunicación de datos con propiedades similares.

50 Tal como se representa en la figura 13, pueden conectarse diversos medios de comunicación 1328, tal como portátiles, teléfonos IP etc., a cada uno de los conmutadores TTEthernet.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control con tolerancia a fallos para una turbina eólica que comprende una pluralidad de componentes de turbina eólica controlables, comprendiendo el sistema de control
5 - medios de control (1102; 1202-1207; 1301-1305) para generar una réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes,

- una red de comunicación de datos (1101; 1200) para transmitir la réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes a la pluralidad de componentes de turbina eólica (1109; 1220), y

caracterizado por

10 - una pluralidad de medios de votación descentralizada (1109) que están dispuestos de modo que unos medios de votación descentralizada se asignan a cada componente de turbina eólica, estando adaptado cada medio de votación descentralizada para seleccionar un valor de punto de referencia de la réplica de valores de punto de referencia.
- 15 2. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 1, que comprende además medios de controlador principal centralizado (1326) adaptados para generar señales de referencia para los medios de control para generar la réplica de valores de punto de referencia esencialmente concurrentes.
3. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 1 ó 2, que comprende además un sistema de sensor con tolerancia a fallos (1208-1219) que comprende una pluralidad de sensores.
4. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 3, en el que la pluralidad de sensores están dispuestos de manera redundante.
- 20 5. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 3 ó 4, en el que la pluralidad de sensores están adaptados para medir al menos un parámetro eléctrico.
6. Sistema de control con tolerancia a fallos según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la red de comunicación de datos comprende una red de comunicación en tiempo real.
- 25 7. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 6, en el que la red de comunicación en tiempo real comprende Ethernet activada por tiempo.
8. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 7, en el que la red de comunicación Ethernet activada por tiempo se implementa como una red con tolerancia a fallos individual.
9. Sistema de control con tolerancia a fallos según la reivindicación 7, en el que la red de comunicación Ethernet activada por tiempo se implementa como una red con tolerancia a fallos doble.
- 30 10. Sistema de control con tolerancia a fallos según cualquiera de las reivindicaciones 6-9, en el que la red de comunicación en tiempo real soporta comunicación de datos relacionados con la seguridad.
11. Sistema de control con tolerancia a fallos según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medios para establecer una hora global (717).
- 35 12. Turbina eólica que comprende un sistema de control con tolerancia a fallos según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
13. Turbina eólica según la reivindicación 12, en la que la pluralidad de componentes de turbina eólica controlables se selecciona del grupo que consiste en: ángulo de paso, guiñada, árbol principal, engranaje, generador, freno de potencia, estación hidráulica, bomba de agua, refrigeración o UPS.
- 40 14. Método para controlar una turbina eólica que comprende una pluralidad de componentes de turbina eólica controlables, comprendiendo el método las etapas de

- generar una réplica de valores de punto de referencia de componente de turbina eólica esencialmente concurrentes,

- transmitir los valores de punto de referencia a los componentes de turbina eólica en la turbina eólica a través de una red de comunicación de datos,

45 caracterizado por

- realizar, en cada componente de turbina eólica, un proceso de votación descentralizada que comprende la etapa de seleccionar un valor de punto de referencia de la réplica de valores de punto de referencia, y

- aplicar el valor de punto de referencia seleccionado a un componente de turbina eólica.

15. Método según la reivindicación 14, en el que el valor de punto de referencia seleccionado se aplica a varios componentes de turbina eólica en la turbina eólica.

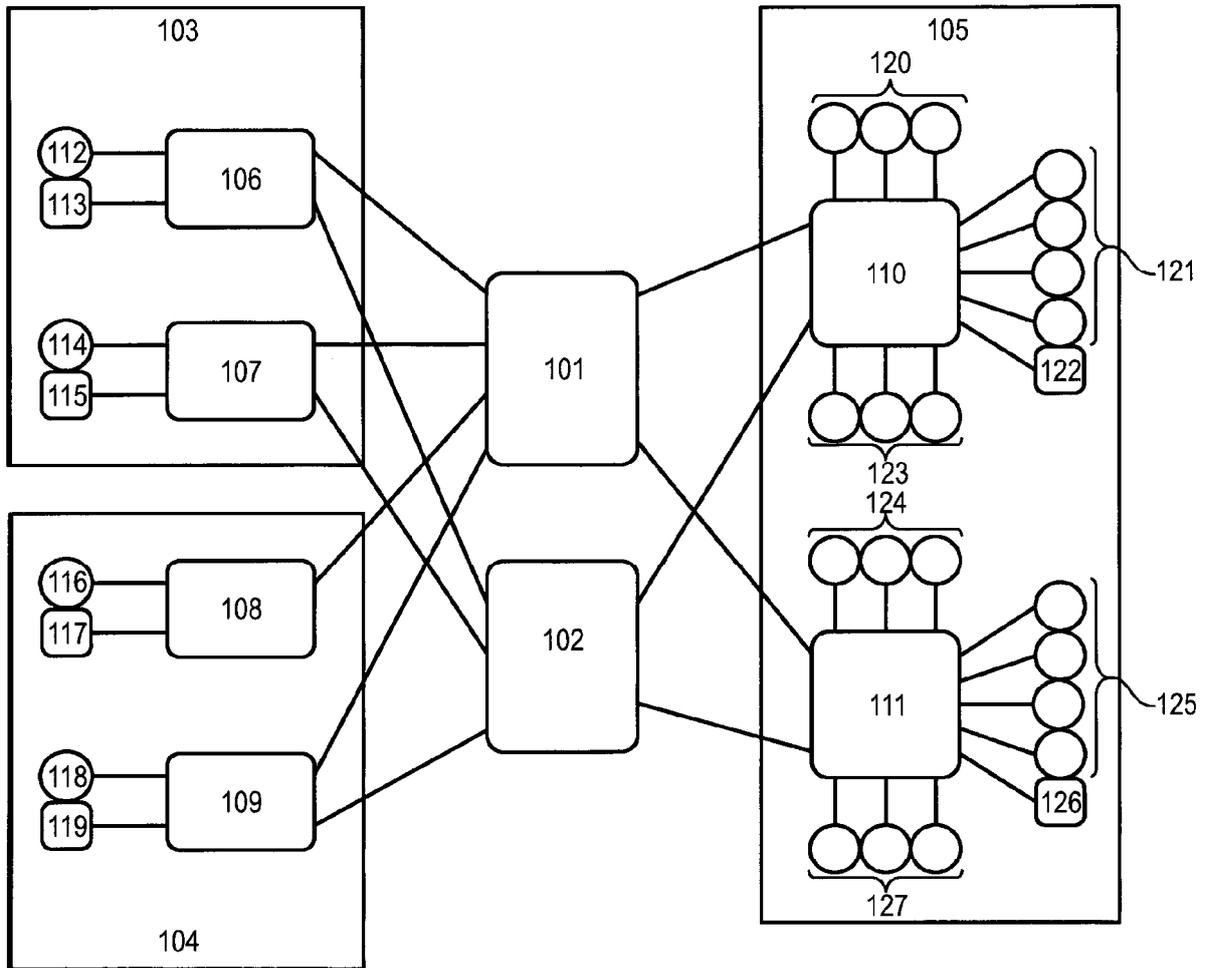


Fig. 1

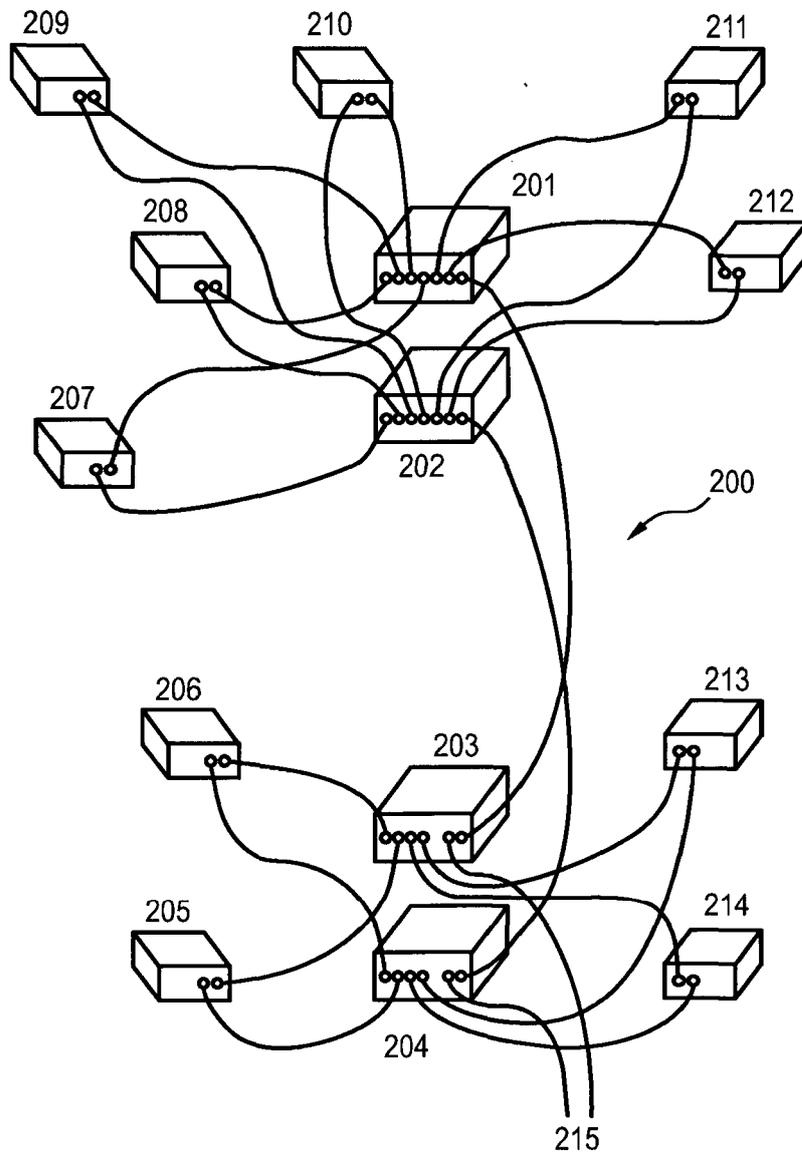


Fig. 2

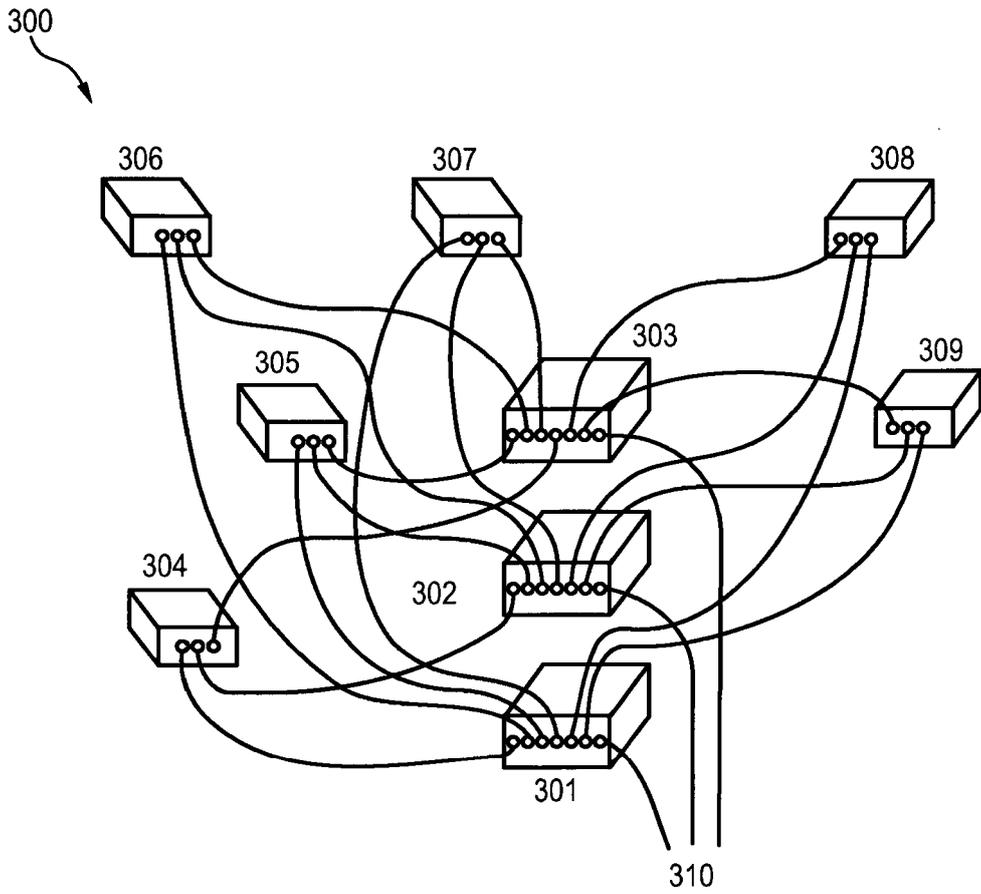


Fig. 3

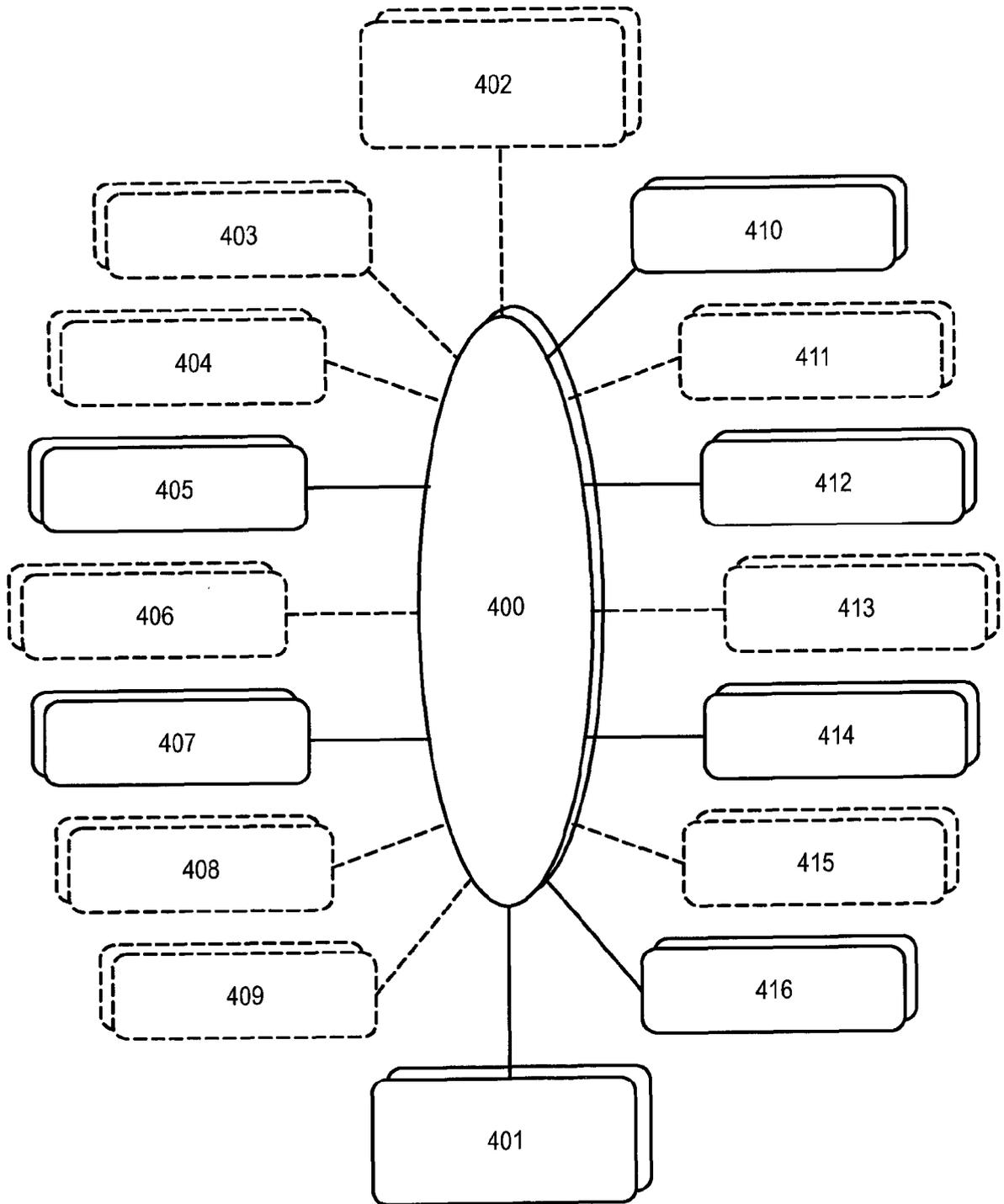


Fig. 4

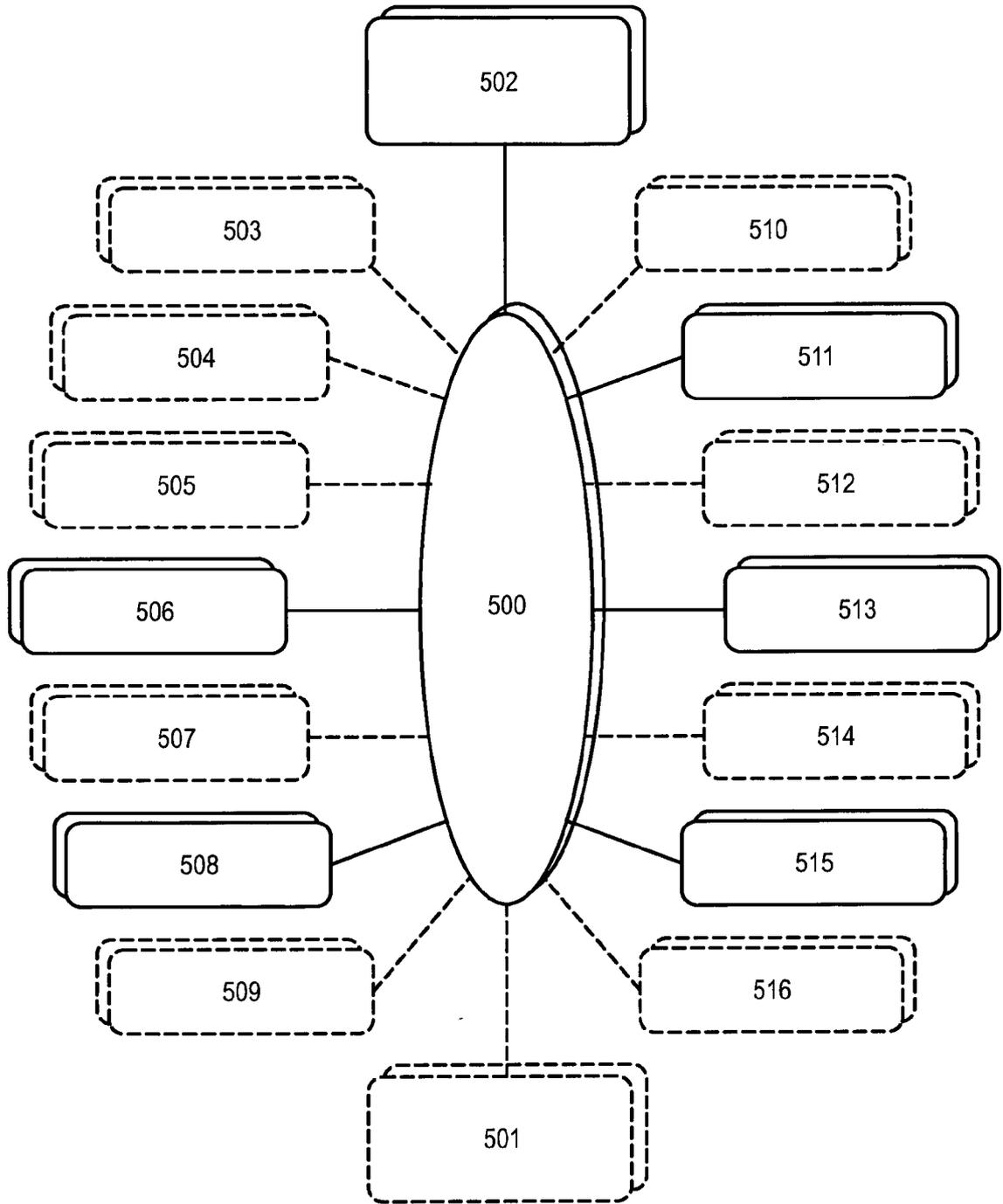


Fig. 5

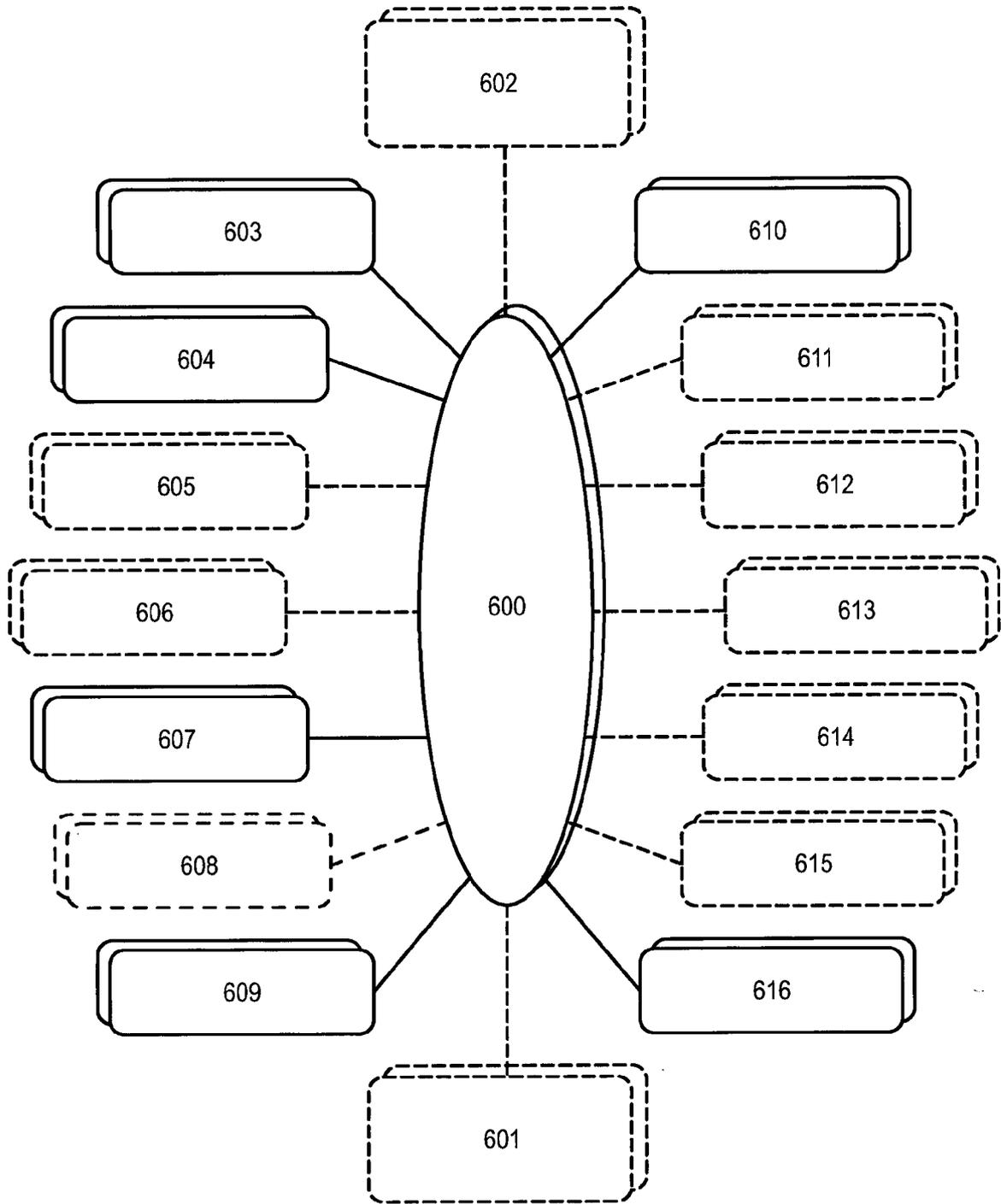


Fig. 6

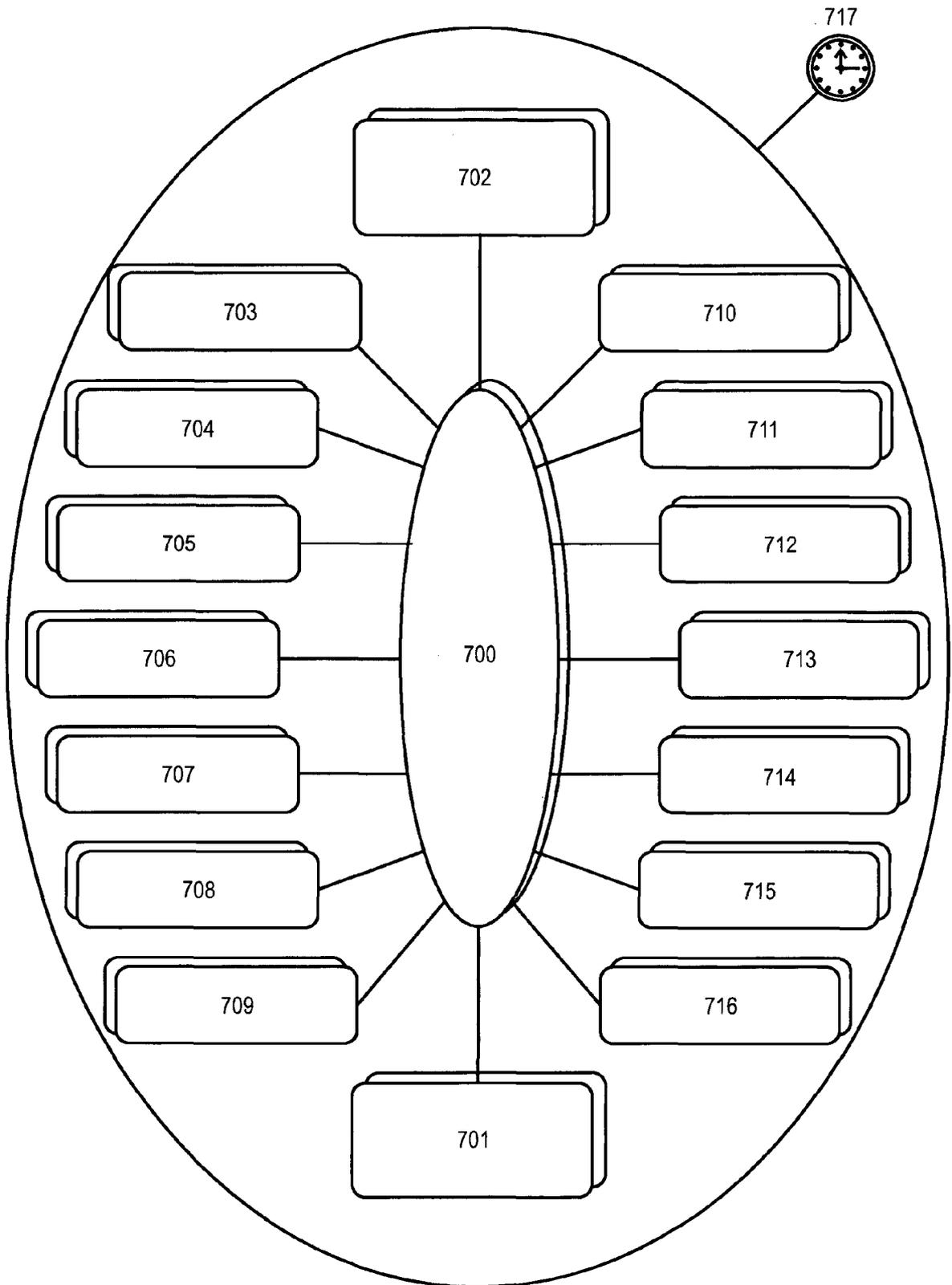


Fig. 7

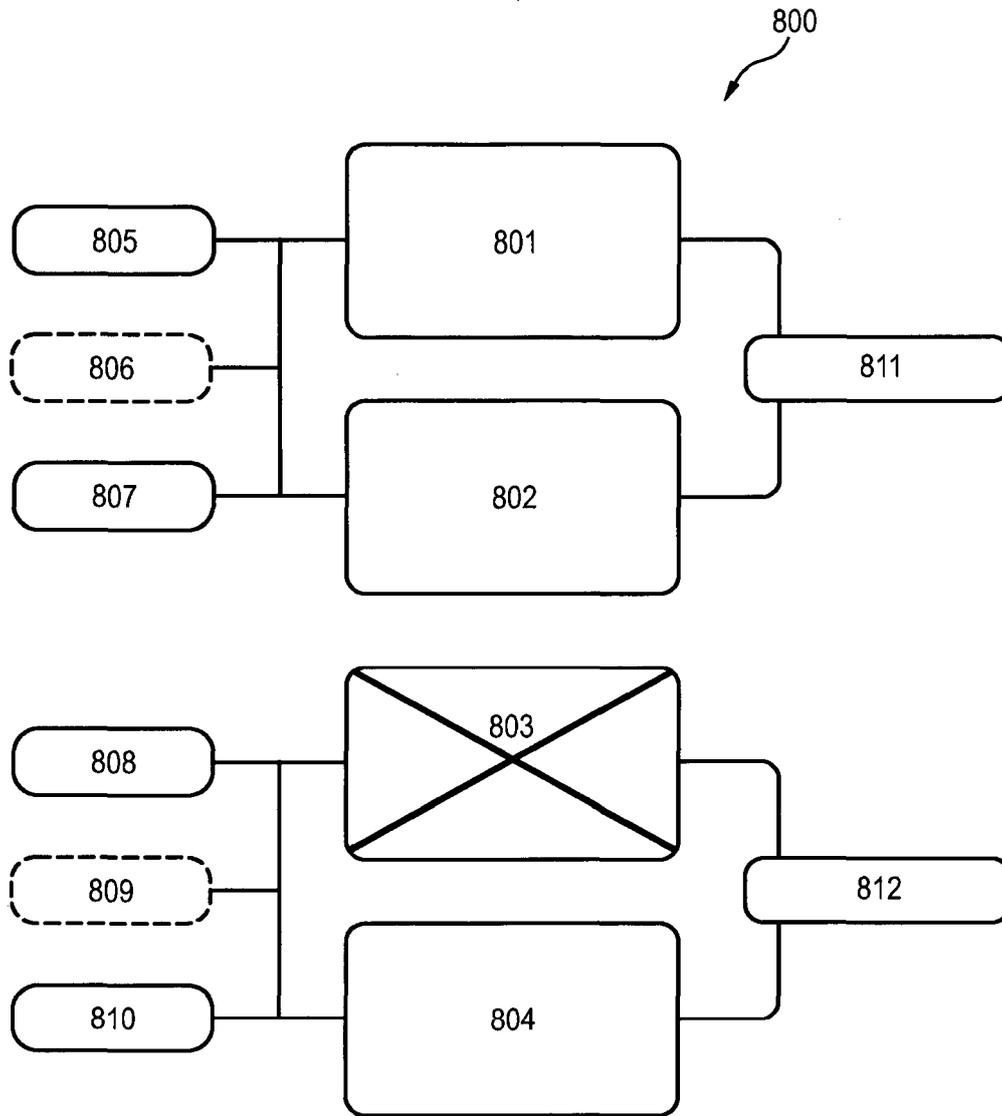


Fig. 8

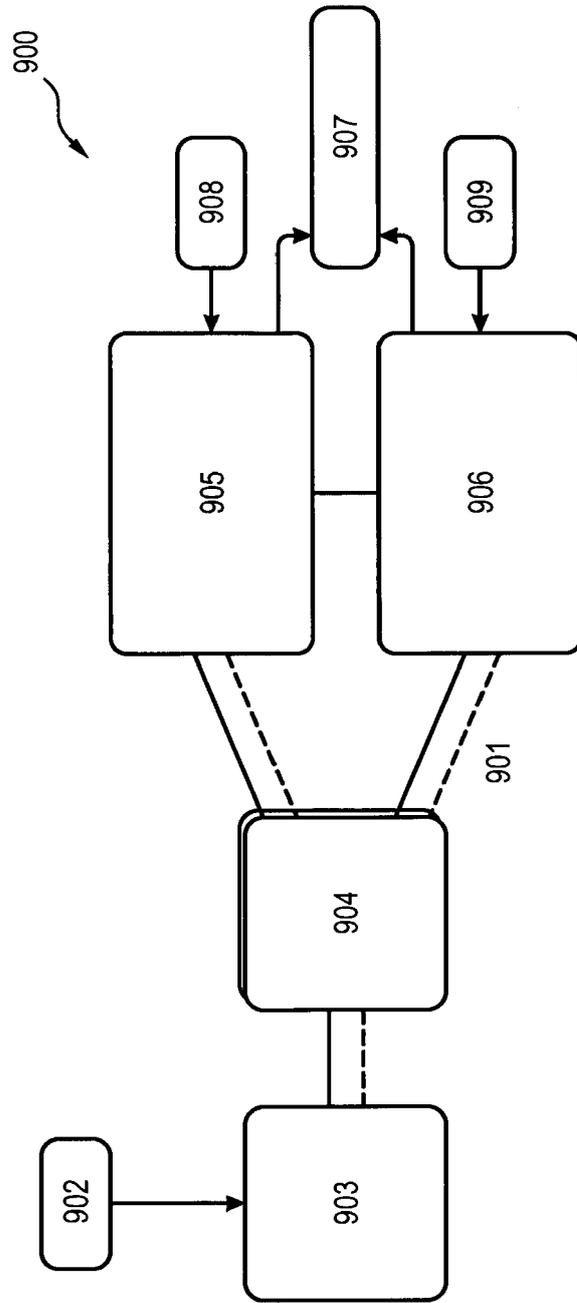


Fig. 9

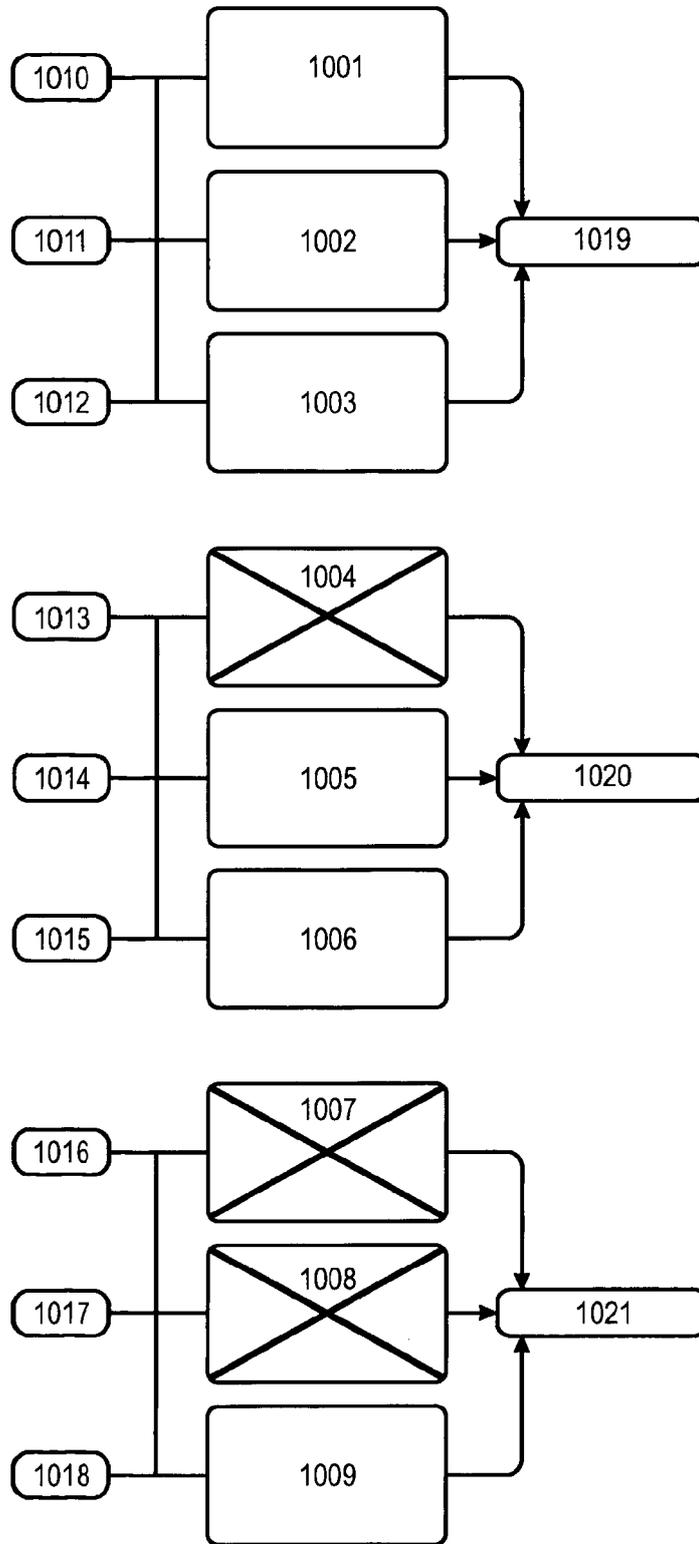


Fig. 10

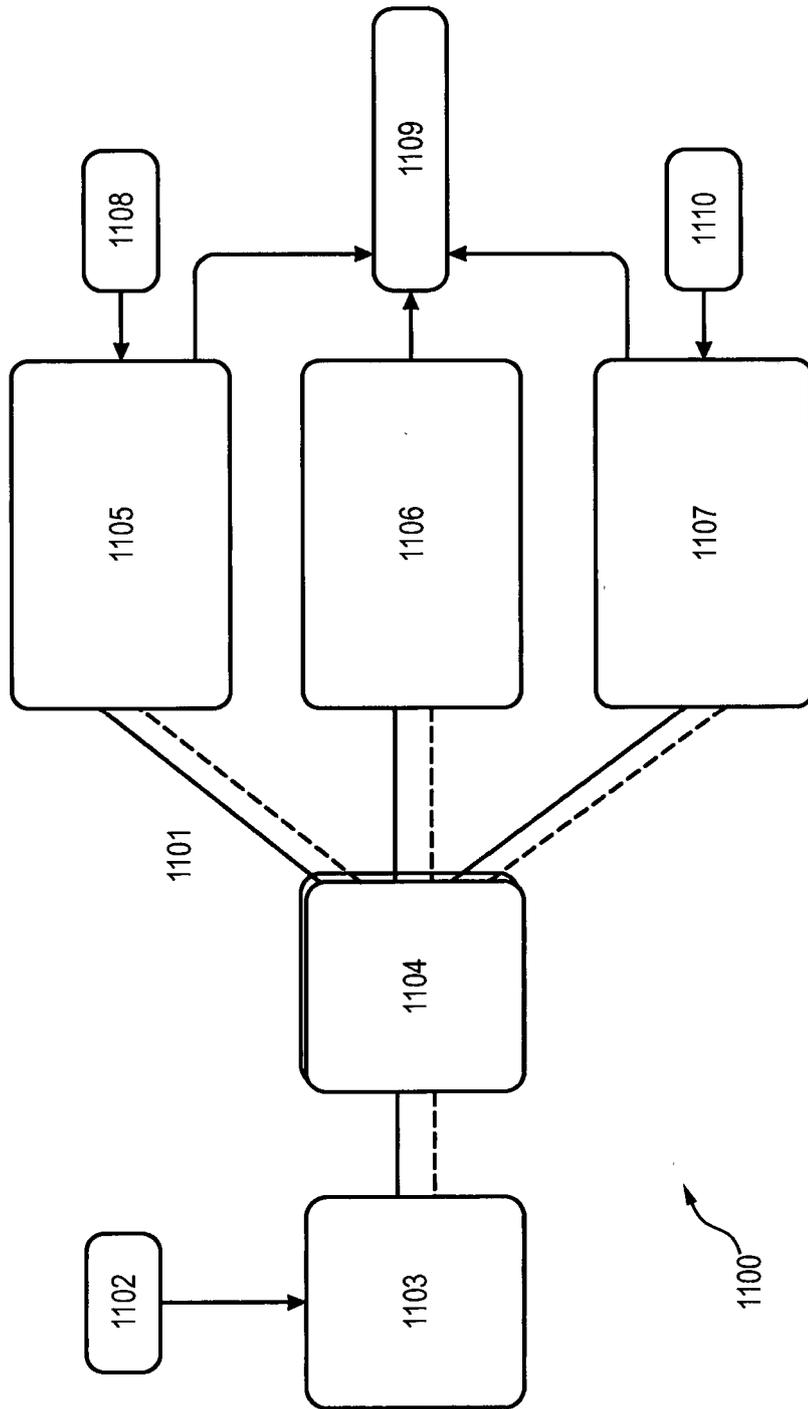


Fig. 11

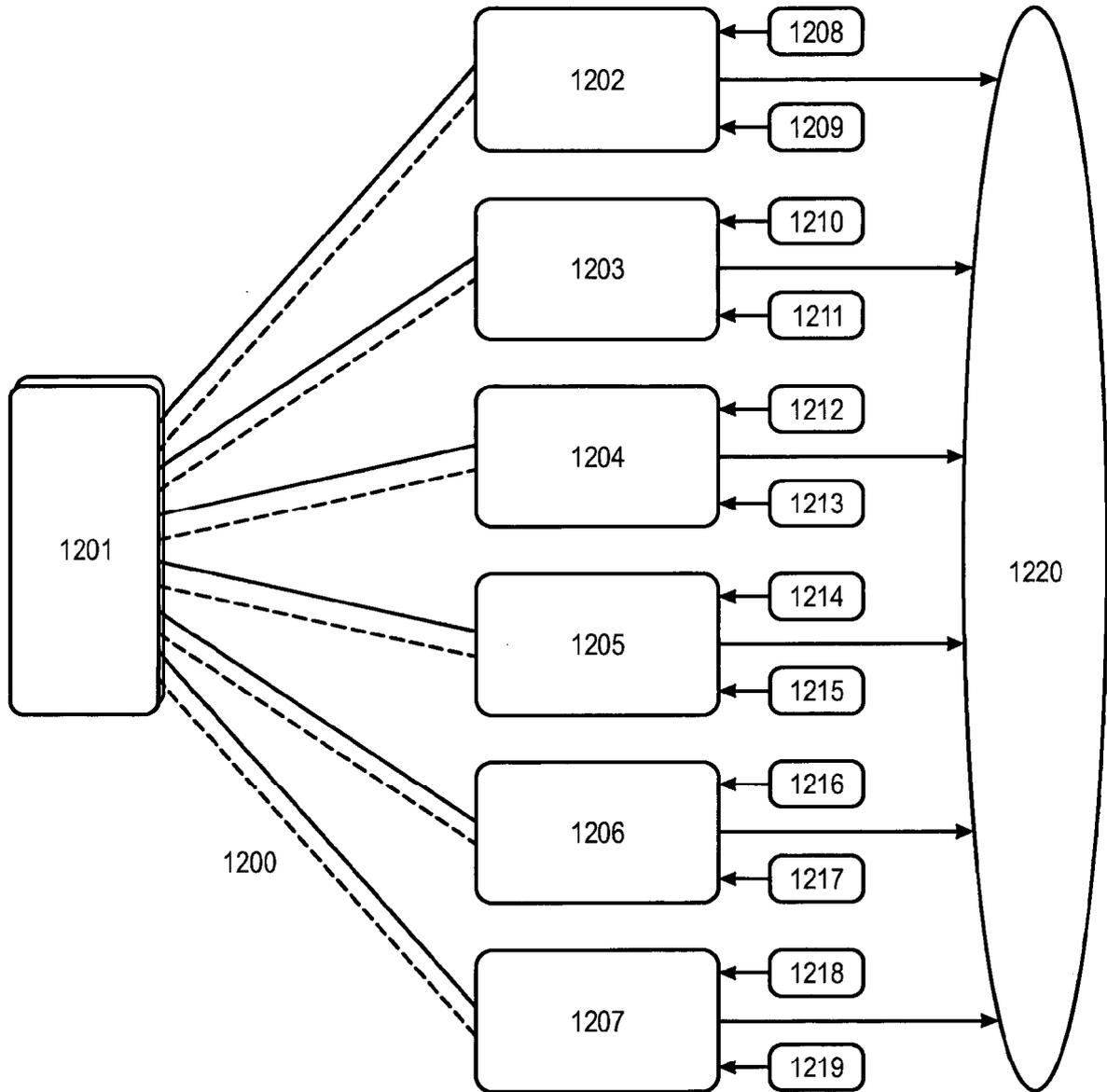


Fig. 12

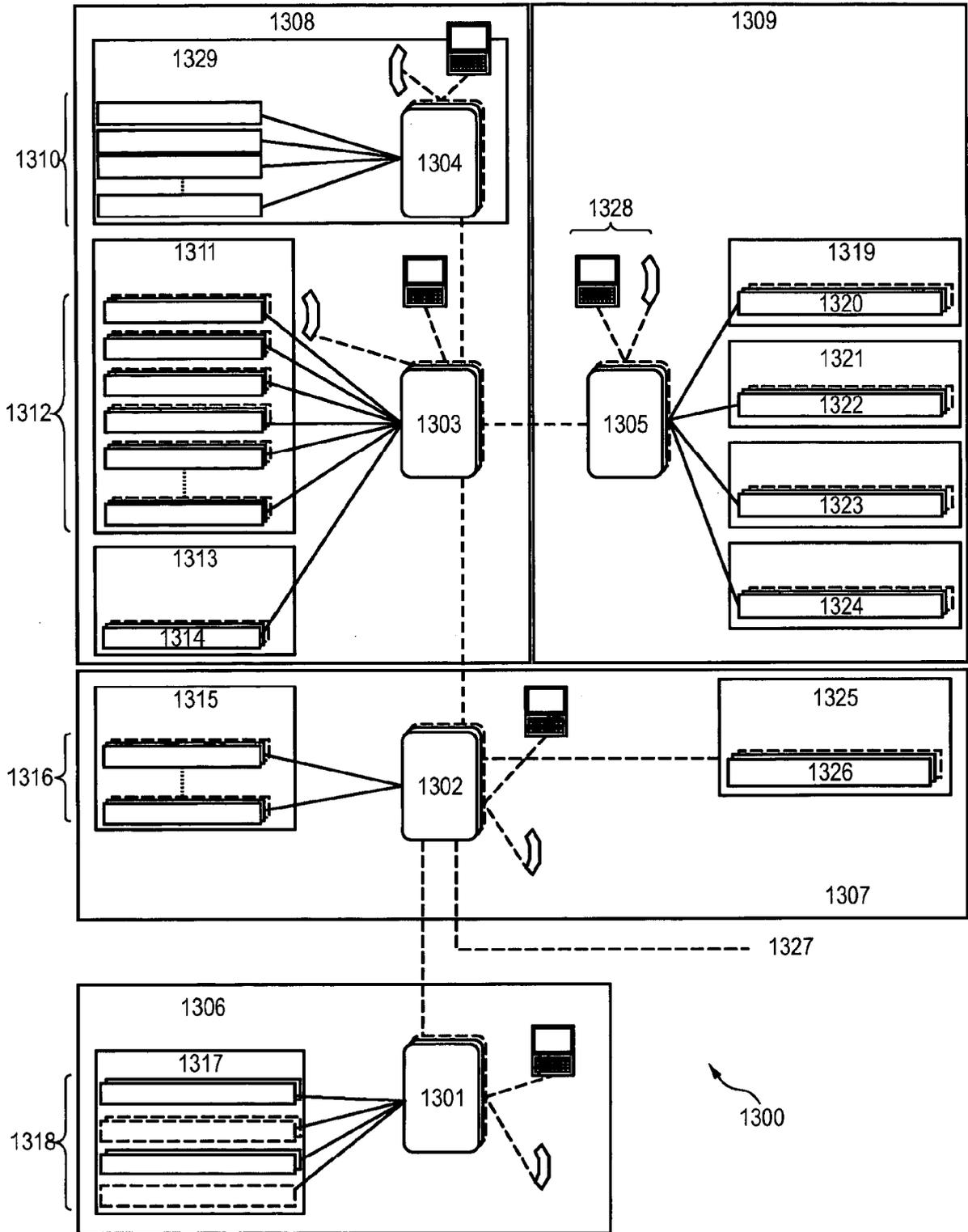


Fig. 13