

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 876 998**

21 Número de solicitud: 202130429

51 Int. Cl.:

**H02H 7/08** (2006.01)

**H02H 7/085** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**11.05.2021**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**15.11.2021**

Fecha de concesión:

**21.02.2023**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**28.02.2023**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
(100.0%)**

**Avda. Ramiro de Maeztu, nº 7  
28040 Madrid (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**PLATERO GAONA, Carlos Antonio;  
PASCUAL JIMÉNEZ, Rubén;  
LÓPEZ PANIAGUA, Ignacio;  
MUÑOZ ANTÓN, Javier y  
TALAVERA MIGUEL, David**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

54 Título: **MÉTODO Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO TÉRMICO EN TIEMPO REAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS**

57 Resumen:

La presente invención se refiere a un método y sistema de diagnóstico térmico en tiempo real para máquinas eléctricas síncronas como protección ante posibles fallos en el sistema de refrigeración de la máquina, comparando continuamente los valores de temperatura medidos en el interior de la máquina con la temperatura teórica calculada para ese punto de funcionamiento (en base a modelos térmicos desarrollados) a partir de las pérdidas de la máquina y de la temperatura del refrigerante final.

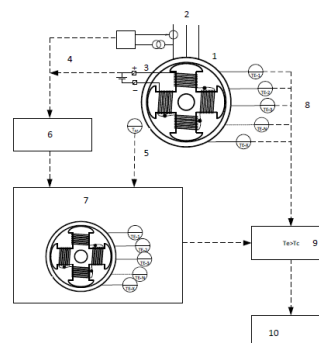


FIG. 1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.  
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 876 998 B2

## DESCRIPCIÓN

### MÉTODO Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO TÉRMICO EN TIEMPO REAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

5

#### OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere al campo técnico de los métodos y sistemas de protección para la detección de defectos térmicos en máquinas síncronas.

- 10 Una de las aplicaciones son los sistemas de generación de energía eléctrica, en los que se utilizan generadores síncronos. Con el sistema objeto de la presente invención se realiza un diagnóstico térmico instantáneo de la máquina, que indica un defecto térmico en la misma.

#### 15 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

- Las máquinas eléctricas tienen una serie de protecciones para garantizar su seguridad, así como la seguridad de los trabajadores. Además, estas protecciones deben contribuir a la fiabilidad del funcionamiento de las máquinas, así como del sistema eléctrico en general, especialmente en el caso de grandes generadores
- 20 síncronos.

- Uno de los parámetros que los sistemas de protecciones tienen en cuenta es la temperatura de operación en distintos puntos de los generadores. Para lo que se instalan de sondas de temperatura en devanados, paquete magnético, entrada y salida
- 25 de refrigerante primario (Aire o H<sub>2</sub>), según indican las normas de fabricación de máquinas eléctricas. Los intercambiadores de calor también llevan sondas a la entrada y la salida, donde se suele medir la temperatura del refrigerante secundario que normalmente es agua. Existen también máquinas en el que el refrigerante secundario es aire. Dependiendo de la configuración puede haber más refrigerantes, por ejemplo,
- 30 que el refrigerante secundario sea agua dulce en circuito cerrado y sea refrigerada a su vez por un tercer refrigerante bien sea agua de mar o aire a temperatura ambiente.

Independientemente del tipo de refrigeración existe un refrigerante final que es el foco frío que absorbe el calor cedido por la máquina. La temperatura de este refrigerante

final no es constante, sin embargo, para el diseño de la máquina se toman unos valores de referencia, típicamente 40°C en caso del aire y 25°C en caso de agua. Esta temperatura influye en las temperaturas de operación de la máquina.

- 5 El otro parámetro que influye en las temperaturas de operación de la máquina son las pérdidas. Estas pérdidas dependen del punto de operación de la máquina, es decir de las potencias activa y reactiva además de la tensión de operación. Para el diseño de las máquinas se consideran las pérdidas a potencia asignada, ya que para las condiciones de máxima potencia el sistema de refrigeración debe ser capaz de
- 10 mantener las temperaturas de funcionamiento de todas las partes de la máquina por debajo de valores peligrosos.

- En la mayoría de los casos a pesar de que estas sondas que miden las temperaturas de la máquina estén conectadas a potentes sistemas de control y supervisión
- 15 (SCADA), se utilizan simplemente para generar alarma o disparo en caso de sobrepasar ciertos valores previamente ajustados y basados en la clase de aislamiento de la máquina y las recomendaciones del fabricante, calculadas para las peores condiciones de funcionamiento, es decir potencia asignada y temperatura máxima permitida del refrigerante final.

- 20 Durante los últimos años se han hecho grandes avances en la simulación térmica de las máquinas eléctricas, así como en su refrigeración, mediante técnicas como elementos finitos FEM o fluidodinámica computacional CFD. Esto permite realizar un diseño mucho más preciso.

- 25 Las protecciones de las máquinas también han evolucionado mucho. Normalmente supervisan la corriente y calculan la temperatura de la máquina teniendo en cuenta datos básicos de las máquinas, como corriente asignada y constante de tiempo de calentamiento. Especialmente ha sido un tema de investigación las protecciones de las
- 30 máquinas síncronas de imanes permanentes. Los relés digitales basados en microprocesador tienen la posibilidad de realizar protecciones térmicas cada vez más complejas, algunas de estas protecciones permiten la conexión de sondas de temperatura.

- 35 Algunos documentos del estado del arte divulgan aspectos relacionados con la protección de máquinas síncronas, como por ejemplo la patente estadounidense

US7710693B2 "*Apparatus and method for providing protection for a synchronous electrical generator in a power system*", donde partiendo de datos del generador y de la red eléctrica donde está conectado, se realiza un modelo eléctrico de la máquina y se calcula la curva de capacidad del generador en función de las medidas eléctricas, calculando el ángulo de carga. Otro ejemplo es la patente estadounidense US8180622B2 "*Systems and methods for a real-time synchronized electrical power system simulator for "what-if" analysis and prediction over electrical power networks*", donde se utiliza un modelo en tiempo real para detección de defectos en sistemas eléctricos de potencia.

10

Sin embargo, los ajustes de alarma y disparo de las protecciones son generalmente valores fijos que no dependen de las condiciones de operación. Por tanto, se echa en falta en el estado del arte una protección para máquinas síncronas que pueda anticipar problemas sin necesidad de llegar a los valores de disparo.

15

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Con el fin de alcanzar los objetivos y evitar los inconvenientes mencionados anteriormente, la presente invención se refiere a un método y sistema de diagnóstico adaptativo térmico que detecta posibles fallos térmicos en las máquinas síncronas en tiempo real. Por tanto, un objetivo de la presente invención es desarrollar una protección basada en un modelo térmico de la máquina, que funciona en tiempo real y es capaz de calcular la temperatura teórica de funcionamiento de la máquina para unas condiciones de operación y una temperatura del refrigerante final. Comparando las temperaturas calculadas con las temperaturas medidas se pueden detectar problemas en el sistema de refrigeración incluso a baja carga con bajas temperaturas, sin necesidad que la máquina alcance altas temperaturas cercanas a los valores de disparo.

Pare ello se presenta, en un primer aspecto de la invención, un sistema de diagnóstico térmico en tiempo real para detectar defectos térmicos en una máquina síncrona, donde el sistema comprende los siguientes subsistemas:

- un subsistema de medida de unas variables eléctricas de la máquina síncrona, configurado para determinar un punto de funcionamiento de la máquina síncrona;

- un subsistema de cálculo de pérdidas de la máquina síncrona, configurado para aplicar el punto de funcionamiento determinado sobre un modelo de pérdidas de la máquina síncrona previamente conocido;
- un subsistema de medida de la temperatura del refrigerante final de la máquina síncrona;
- un subsistema de cálculo de las temperaturas teóricas configurado para calcular unas temperaturas teóricas en ciertos puntos de la máquina síncrona a partir de las pérdidas de la máquina y de la temperatura del refrigerante final;
- un subsistema de medida de temperatura en diferentes puntos de la máquina síncrona; y
- un subsistema de comparación de las temperaturas teóricas calculadas con las temperaturas medidas, configurado para determinar la existencia de un posible fallo de refrigeración en la máquina síncrona en caso de que cualquiera de las temperaturas medidas sea mayor que las temperaturas teóricas; y
- un módulo de alarma configurado para emitir una señal en caso de que el subsistema de comparación determine la existencia de un fallo.

En una de las realizaciones de la invención, el subsistema de medida de las variables eléctricas está configurado para medir al menos uno de los siguientes grupos de variables eléctricas:

- potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U);
- intensidad (I), tensión (U), intensidad de excitación (If); y
- potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U), intensidad (I), intensidad de excitación (If).

De acuerdo a una de las realizaciones de la presente invención, el subsistema de medida de las variables eléctricas comprende uno o varios sistemas de medida de tensiones y corrientes de inducido a seleccionar entre: trifásicos, monofásicos o combinación de dos fases.

Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a un método de diagnóstico térmico en tiempo real para detectar defectos térmicos en una máquina síncrona, donde el método comprende las siguientes etapas:

- medir, por un subsistema de medida, unas variables eléctricas de la máquina síncrona;

- determinar un punto de funcionamiento de la máquina síncrona basado en las medidas de variables eléctricas;
- obtener las pérdidas de la máquina síncrona, basado en aplicar el punto de funcionamiento sobre un modelo de pérdidas de la máquina síncrona previamente conocido;
- medir la temperatura del refrigerante final de la máquina síncrona;
- calcular unas temperaturas teóricas en ciertos puntos de la máquina síncrona para el punto de funcionamiento determinado, a partir de las pérdidas y la temperatura del refrigerante final; y
- medir, con unas sondas integradas en la máquina síncrona, la temperatura en diferentes puntos de la máquina síncrona;
- comparar las temperaturas teóricas calculadas con las temperaturas medidas
- determinar la existencia de un posible fallo de refrigeración en la máquina síncrona en caso de que cualquiera de las temperaturas medidas sea mayor que las temperaturas teóricas calculadas; y
- generar, en un módulo de alarma, una señal de disparo o de alarma.

De acuerdo a una de las realizaciones de la invención, medir unas variables eléctricas de la máquina síncrona comprende medir al menos uno de los siguientes grupos de variables eléctricas:

- potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U);
- intensidad (I), tensión (U), intensidad de excitación ( $I_f$ ); y
- potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U), intensidad (I), intensidad de excitación ( $I_f$ ).

Por tanto, ventajosamente, la presente invención permite detectar defectos térmicos sin necesidad de llegar a valores límites en el funcionamiento (por ejemplo, puede ocurrir que la máquina tenga un problema funcionando a poca potencia, lo que con otros sistemas no llegaría a disparar una alarma), lo cual reporta un gran beneficio frente a las soluciones conocidas del estado del arte en términos de eficiencia y mantenimiento de las máquinas.

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación, se describen de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

La **figura 1** representa el esquema general del sistema de diagnóstico adaptativo térmico que detecta posibles faltas térmicas en la máquina síncrona en tiempo real.

- 5
1. Los elementos de las figuras han sido referenciados de acuerdo a la siguiente lista: Máquina síncrona.
  2. Inducido de la máquina síncrona.
  3. Devanado de excitación de la máquina síncrona.
  4. Equipo de medida de las variables eléctricas que definen el punto de funcionamiento de la máquina síncrona.
  - 10 5. Equipo de medida de la temperatura del refrigerante final del sistema de refrigeración de la máquina síncrona.
  6. Calculador de pérdidas de la máquina síncrona.
  7. Calculador de las temperaturas teóricas de la máquina síncrona en base a las pérdidas de la máquina y la temperatura del refrigerante final.
  - 15 8. Equipo de medida de las temperaturas de la máquina síncrona, el cual dependerá del número de sensores instalados por el fabricante.
  9. Equipo comparador de temperaturas medidas y calculadas.
  10. Señal de alarma y/o disparo de la protección ante faltas térmicas en el interior de la máquina síncrona.

20

## DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un sistema y método de diagnóstico térmico para máquinas síncronas que se basa principalmente en la obtención en tiempo real del punto de operación de la máquina. De esta manera se establece un modelo de supervisión térmica que permite detectar variaciones significativas en tiempo real respecto a las medidas obtenidas por las sondas instaladas en la máquina.

25

En la **figura 1** se representa esquemáticamente el sistema completo y el flujo de funcionamiento. La máquina síncrona **1**, el inducido **2** de la máquina síncrona y el devanado de excitación **3** de la máquina síncrona están conectados eléctricamente con un equipo de medida **4** de las variables eléctricas que definen el punto de funcionamiento instantáneo de la máquina síncrona. Posteriormente, en un subsistema

30

de cálculo de pérdidas **6**, se obtienen las pérdidas de la máquina síncrona aplicando el punto de funcionamiento instantáneo determinado sobre el modelo de pérdidas de la máquina (el cuál viene dado por su propia fabricación y geometría entre otras características). A continuación, en un subsistema de cálculo de las temperaturas teóricas **7** se calculan cuáles serían las temperaturas teóricas de la máquina síncrona en función de las pérdidas de la máquina síncrona obtenidas en el subsistema de cálculo de pérdidas **6** y de la temperatura del refrigerante final de la máquina, proporcionada por un subsistema de medida de la temperatura del refrigerante final **5** de la máquina síncrona. Finalmente se comparan, en un módulo comparador **9**, las temperaturas teóricas con las temperaturas medidas por las sondas **8** dispuestas en la propia máquina síncrona (normalmente ya instaladas de fábrica) para controlar que se mantengan en valores cercanos. Un desajuste entre estos valores revela un problema en la máquina, reflejado en un módulo de alarma **10**.

En función de las variables eléctricas utilizadas para identificar el punto de funcionamiento de la máquina, pueden diferenciarse realizaciones alternativas de la presente invención. A modo de ejemplo se describen a continuación tres realizaciones preferentes.

1) Medida de tres variables en el inducido.

A partir de la medida de tres variables eléctricas en el inducido de la máquina síncrona se puede caracterizar el punto de funcionamiento. Por ejemplo, la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la tensión (U).

La corriente de excitación ( $I_f$ ) puede ser calculada a partir de las otras medidas.

Esta realización preferente puede aplicarse a máquinas con excitación indirecta, donde no existe posibilidad de medir la corriente de excitación.

2) Medida de dos variables en el inducido y la corriente de excitación.

En esta realización preferente se debe medir la corriente de excitación y dos magnitudes en el inducido, como puede ser la intensidad (I), y la tensión (U). A partir de estas medidas y con la intensidad de excitación ( $I_f$ ) se puede obtener el punto de funcionamiento de la máquina.

3) Medidas redundantes en inducido y campo

En esta realización se miden tres variables en el inducido y además la corriente

de excitación. Por ejemplo, medida de potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U), intensidad (I) e intensidad de excitación (If).

Con estos datos se puede calcular el punto de funcionamiento de la máquina.

5 Para el funcionamiento de la presente invención, se asume que se dispone de información adicional de la máquina, como son las pérdidas a plena carga, información que normalmente se obtiene de los ensayos que se realizan tras la fabricación de la máquina. Es con esta información previa y a partir de las condiciones de funcionamiento de la máquina (corriente de excitación, potencia activa, potencia  
10 reactiva y tensión) que se puede calcular las pérdidas en los diferentes elementos de la máquina, tales como pérdidas en los arrollamientos del estator, pérdidas en el núcleo magnético, pérdidas en los arrollamientos del rotor o pérdidas mecánicas entre otras.

15 A partir de la geometría de la máquina y con las características del sistema de refrigeración, se desarrolla un modelo térmico particular para cada máquina. Este modelo térmico tiene como entradas las pérdidas en la máquina, previamente calculadas, y la temperatura del refrigerante final. Y como salida proporciona las diferentes temperaturas en la máquina. Preferiblemente se calculará la temperatura en  
20 los puntos de la máquina donde se hayan dispuesto sondas de temperatura.

Por último, se comparan las temperaturas calculadas con las temperaturas medidas por las sondas instaladas en la máquina y tras la comparación, en caso de diferencia significativa, el sistema de diagnóstico térmico indica algún fallo en el sistema de  
25 refrigeración o en el propio generador.

Como ejemplo de las ventajas de la presente invención, se presenta un escenario en el que la máquina opera a media carga y las temperaturas, en cambio, son similares a las temperaturas de operación a plena carga. La presente invención es capaz de  
30 reconocer esta situación e indicar que existe algún tipo de fallo en el sistema de refrigeración. Otra posible situación anómala sería que una máquina en un día muy frío, con temperaturas de los refrigerantes por debajo del punto de diseño, tenga temperaturas similares a las temperaturas de plena carga y temperatura de diseño de los refrigerantes, se suele considerar aire a 40°C o agua a 25°C para el diseño. Esto  
35 sería equivalente a que los umbrales de las alarmas y los disparos dependan de las condiciones de operación y de la temperatura del refrigerante final. Por tanto, el

sistema es capaz de detectar defectos incluso a bajas cargas sin que la máquina alcance temperaturas peligrosas próximas a las de disparo.

La presente invención no debe verse limitada a la forma de realización aquí descrita.

- 5 Otras configuraciones pueden ser realizadas por los expertos en la materia a la vista de la presente descripción. En consecuencia, el ámbito de la invención queda definido por las siguientes reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

1. Sistema de diagnóstico térmico en tiempo real para detectar defectos térmicos en una máquina síncrona caracterizado por que comprende los siguientes subsistemas:

- 5                   - un subsistema de medida de unas variables eléctricas (4) de la máquina síncrona (1), configurado para determinar un punto de funcionamiento de la máquina síncrona;
- un subsistema de cálculo de pérdidas (6) de la máquina síncrona, configurado para aplicar el punto de funcionamiento determinado sobre un modelo de pérdidas de la máquina síncrona previamente conocido;
- 10               - un subsistema de medida de la temperatura del refrigerante final (5) de la máquina síncrona;
- un subsistema de cálculo de las temperaturas teóricas (7) configurado para calcular unas temperaturas teóricas en ciertos puntos de la máquina síncrona a partir de las pérdidas de la máquina y de la temperatura del refrigerante final;
- 15               - un subsistema de medida de temperatura (8) en diferentes puntos de la máquina síncrona; y
- un subsistema de comparación (9) de las temperaturas teóricas calculadas con las temperaturas medidas, configurado para determinar la existencia de un posible fallo de refrigeración en la máquina síncrona en caso de que cualquiera
- 20               de las temperaturas medidas sea mayor que las temperaturas teóricas; y
- un módulo de alarma (10) configurado para emitir una señal en caso de que el subsistema de comparación determine la existencia de un fallo.

2. Sistema según la reivindicación 1, donde el subsistema de medida de las variables eléctricas está configurado para medir al menos uno de los siguientes grupos de variables eléctricas:

- potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U);
- intensidad (I), tensión (U), intensidad de excitación (If); y
- 30               - potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U), intensidad (I), intensidad de excitación (If).

3. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde el subsistema de medida de las variables eléctricas comprende uno o varios sistemas de medida de tensiones y corrientes de inducido a seleccionar entre: trifásicos, monofásicos o

35               combinación de dos fases.

4. Método de diagnóstico térmico en tiempo real para detectar defectos térmicos en una máquina síncrona caracterizado por que comprende las siguientes etapas:

- 5                   - medir, por un subsistema de medida, unas variables eléctricas (4) de la máquina síncrona;
- determinar el punto de funcionamiento de la máquina síncrona (1) basado en las medidas de variables eléctricas;
- 10               - obtener las pérdidas (6) de la máquina síncrona, basado en aplicar el punto de funcionamiento sobre un modelo de pérdidas de la máquina síncrona previamente conocido;
- medir la temperatura del refrigerante final (5) de la máquina síncrona;
- calcular unas temperaturas teóricas (7) en ciertos puntos de la máquina síncrona para el punto de funcionamiento determinado , a partir de las pérdidas y la temperatura del refrigerante final; y
- 15               - medir, con unas sondas integradas en la máquina síncrona, la temperatura (8) en diferentes puntos de la máquina síncrona;
- comparar (9) las temperaturas teóricas calculadas con las temperaturas medidas
- determinar la existencia de un posible fallo de refrigeración en la máquina
- 20               síncrona en caso de que cualquiera de las temperaturas medidas sea mayor que las temperaturas teóricas calculadas; y
- generar, en un módulo de alarma, una señal de disparo o de alarma (10).

5. Método según la reivindicación 4, donde medir unas variables eléctricas de la máquina síncrona comprende medir al menos uno de los siguientes grupos de variables eléctricas:

- 25                   - potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U);
- intensidad (I), tensión (U), intensidad de excitación (If); y
- 30               - potencia activa (P), potencia reactiva (Q), tensión (U), intensidad (I), intensidad de excitación (If).

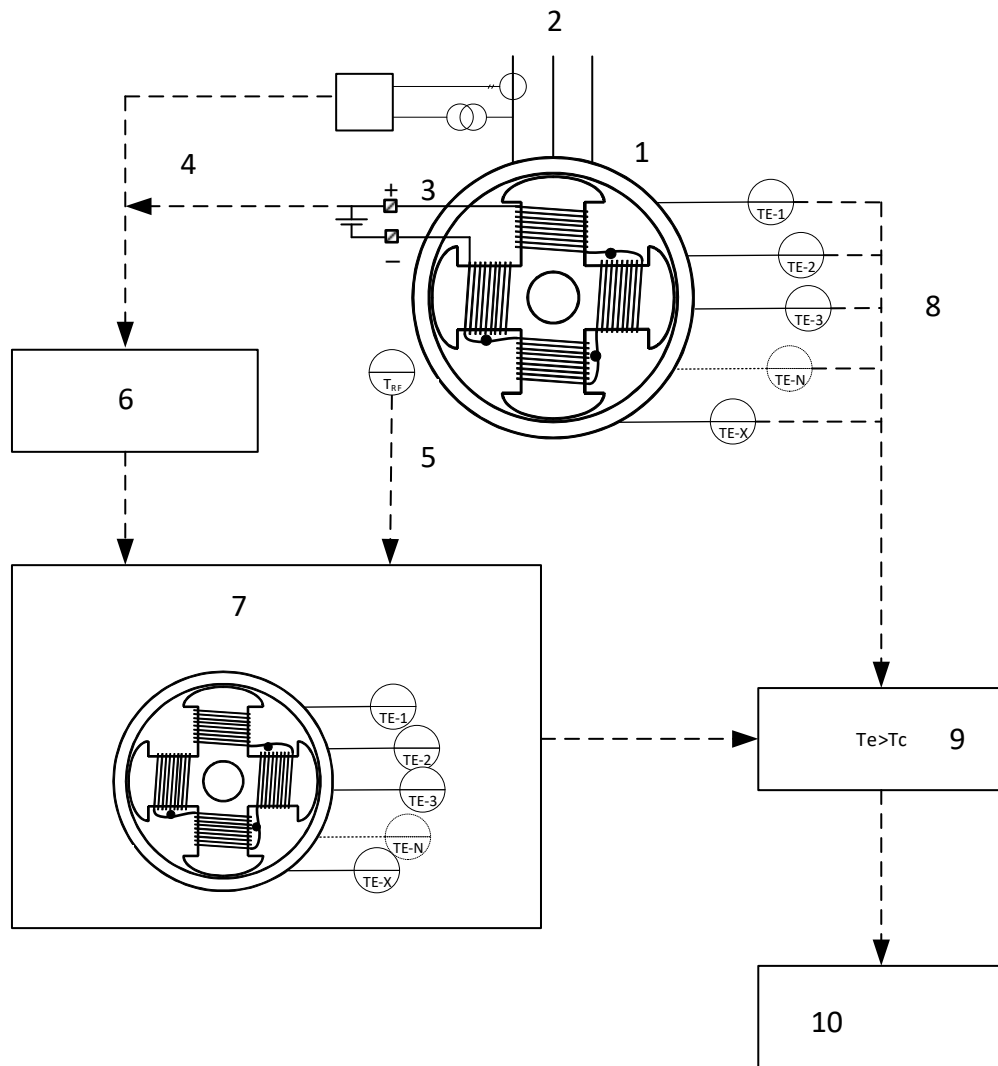


FIG. 1