

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI



TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO Y DISEÑO DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE UN MOTOR DE MEDIA TENSIÓN

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ESPECIALIDAD ELECTRICIDAD

Autor: José María García de Quevedo Ortiz

Director: Julio Rafael Portillo García

Julio 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Estudio y Diseño de las Protecciones Eléctricas de un Motor de Media Tensión en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: José María García de Quevedo Ortiz

Fecha: 12/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Portillo García, Julio Rafael

Fecha: 12/07/2024

Índice de contenidos

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 8 |
| Abstract | 10 |
| 1. Introducción..... | 12 |
| 2. Motores de media tensión | 15 |
| 2.1. Partes de un motor de media tensión | 16 |
| 2.2. Tipos de motores de media tensión y principio de funcionamiento | 18 |
| 2.3. Funcionamiento de los motores de media tensión..... | 22 |
| 3. Protecciones eléctricas en motores de media tensión | 25 |
| 3.1. Causas de averías, efectos y posibles daños en motores | 26 |
| 3.1.1. Sobrecarga térmica | 26 |
| 3.1.2. Problemas de enfriamiento | 27 |
| 3.1.3. Causas eléctricas..... | 27 |
| 3.1.4. Causas mecánicas | 28 |
| 3.2. Necesidad de protección | 28 |
| 3.2.1. Necesidades de protección de motores | 28 |
| 3.2.1.1. Operación y carga | 29 |
| 3.2.1.2. Límites de temperatura y aislamientos del bobinado | 30 |
| 3.2.1.3. Límites de respuesta de relés de sobrecarga térmicos | 32 |
| 3.2.1.4. Fallo de una fase | 33 |
| 3.2.1.5. Cortocircuitos | 35 |
| 3.2.1.6. Defectos a tierra..... | 36 |
| 3.2.1.7. Asimetría en la red..... | 36 |
| 3.2.2. Necesidades de protección del sistema..... | 36 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.2.2.1. | Rotor bloqueado | 36 |
| 3.2.2.2. | Subcarga | 37 |
| 3.2.2.3. | Rotación incorrecta..... | 37 |
| 3.2.2.4. | Lugares con riesgo de explosión | 37 |
| 3.3. | Medidas de protección en motores de media tensión..... | 37 |
| 3.3.1. | Protecciones eléctricas internas | 39 |
| 3.3.1.1. | Protecciones dependientes de la temperatura | 39 |
| 3.3.1.1.1. | Detector de temperatura de resistencia Pt100 (38) | 40 |
| 3.3.2. | Protecciones eléctricas externas | 41 |
| 3.3.2.1. | Protección de sobrecarga térmica (49) | 41 |
| 3.3.2.2. | Protección de sobreintensidad o sobrecorriente (50/51)..... | 45 |
| 3.3.2.3. | Protección de arranque prolongado del motor y rotor bloqueado (48/51LR) | 50 |
| 3.3.2.4. | Bloqueo de re arranque (66) - Limitación del número de arranques... | 52 |
| 3.3.2.5. | Protección de subtensión (27) | 55 |
| 3.3.2.6. | Protección de carga desequilibrada (46)..... | 57 |
| 3.3.2.7. | Protección para detección de defectos a tierra (50N/51N)..... | 60 |
| 3.3.2.8. | Protección de sobretensión (59) | 62 |
| 3.3.2.9. | Protección direccional (67/67N)..... | 65 |
| 3.3.2.10. | Disparo rápido por cierre sobre una falta (SOTF)..... | 66 |
| 3.3.2.11. | Protección contra desvíos de frecuencia (81U/81O)..... | 67 |
| 3.3.2.12. | Protección diferencial de motor (87M) | 69 |
| 3.4. | Variadores de velocidad..... | 72 |
| 4. | Estudio del relé de protección SIPROTEC 7SK82 de SIEMENS..... | 74 |
| 4.1. | Características generales..... | 75 |
| 4.2. | Descripción técnica del relé..... | 77 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3. Funciones de protección del relé para motores de media tensión | 79 |
| 4.4. Ejemplo de aplicación..... | 83 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones | 85 |
| 6. Bibliografía | 91 |
| Anexos..... | 95 |
| A. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)..... | 95 |
| B. Catálogo SIPROTEC 7SK82 | 97 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Reducción de la vida media útil del bobinado de un motor debido a temperaturas excesivamente altas..... | 32 |
| Figura 2. Fallo de una fase de un motor en conexión estrella. | 34 |
| Figura 3. Fallo de una fase de un motor en conexión triángulo. | 35 |
| Figura 4. Curva característica de la resistencia de un sensor de temperatura Pt100. | 40 |
| Figura 5. Curva de disparo de la protección contra sobrecarga..... | 43 |
| Figura 6. Comparación del calentamiento sin (A) y con (B) imagen térmica..... | 45 |
| Figura 7. Función de sobrecorriente instantánea. | 46 |
| Figura 8. Curvas de tiempo inverso según IEC 60255..... | 48 |
| Figura 9. Curvas de tiempo inverso según el IEEE..... | 49 |
| Figura 10. Curva de la protección de arranque prolongado (Evolución 1). | 51 |
| Figura 11. Curva de la protección de arranque prolongado (Evolución 2). | 52 |
| Figura 12. Relación entre la protección de número de re arranques y la de imagen térmica. | 54 |
| Figura 13. Característica ANSI 27-1. | 56 |
| Figura 14. Característica ANSI 27-2. | 56 |
| Figura 15. Desequilibrio positivo máximo en la segunda fase..... | 58 |
| Figura 16. Ejemplo de disparo de la protección de carga desequilibrada en régimen de arranque. | 59 |
| Figura 17. Ejemplo de disparo de la protección de carga desequilibrada en régimen permanente..... | 59 |
| Figura 18. Ejemplo de no disparo de la protección de carga desequilibrada. | 60 |
| Figura 19. Umbral de la protección de defecto a tierra I_g y t_g | 61 |
| Figura 20. Característica ANSI 59-1. | 63 |
| Figura 21. Característica ANSI 59-2. | 64 |
| Figura 22. Funcionamiento de la protección de infrafrecuencia (ANSI 81U). | 68 |
| Figura 23. Funcionamiento de la protección de sobrefrecuencia (ANSI 81O). | 69 |
| Figura 24. Protección diferencial de motor (87M) convencional..... | 71 |
| Figura 25. Protección de un motor de media potencia. | 83 |

Índice de Imágenes

| | |
|---|----|
| Imagen 1. Motor de media tensión W50 1000kW 4P 450J/H 3F 6600V 60Hz | 16 |
| Imagen 2. Esquema básico de las partes de un motor de media tensión. | 17 |
| Imagen 3. Representación esquemática del motor jaula de ardilla..... | 20 |
| Imagen 4. Representación del rotor bobinado | 21 |
| Imagen 5. Protección de motor SIPROTEC 7SK82..... | 75 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Valores de ajuste de la corriente I_r en función de la corriente nominal I_n de la protección contra sobrecarga. | 44 |
| Tabla 2. Valor de ajuste de clase del disparo de la protección contra sobrecarga. | 44 |
| Tabla 3. Cálculo de la corriente de defecto a tierra según la configuración del interruptor automático. | 61 |

Resumen

Este trabajo de fin de grado se centra en el estudio y diseño de las protecciones eléctricas necesarias en un motor de media tensión, vital en numerosos entornos industriales. A través de un análisis exhaustivo, se describen las distintas protecciones internas y externas, sus mecanismos de funcionamiento y su relevancia para la integridad y eficiencia del motor.

Inicialmente, se proporciona una visión general de los motores de media tensión, destacando su funcionamiento y la importancia de una protección adecuada.

Posteriormente, se introduce el concepto de relés de protección, explicando su papel fundamental en la detección de fallos y en la activación de medidas preventivas para evitar daños mayores en el motor.

Más adelante, se dividirán las protecciones eléctricas de los motores de media tensión en internas y externas, según su instalación y operación respecto de la máquina. En la sección de protecciones internas, se abordan las relacionadas con la temperatura de la máquina, analizando diferentes tecnologías y métodos para monitorear y controlar la temperatura, garantizando que el motor opere dentro de los límites seguros. En cuanto a las protecciones externas, se estudian las protecciones que se instalan fuera de la máquina. Estas son las encargas de supervisar parámetros como la corriente, tensión, etc., con el fin de proteger al motor frente a sobrecargas, subtensiones, sobrecorrientes, defectos a tierra, variaciones de frecuencia, etc. Estas protecciones son sumamente importantes para prevenir daños que puedan derivarse de condiciones operativas anormales y peligrosas.

También, se exploran los variadores de velocidad, dispositivos esenciales para el control preciso del funcionamiento del motor y para la implementación de estrategias de protección avanzadas.

Finalmente, se selecciona un relé de un fabricante específico, describiendo en detalle sus parámetros, información comercial y manuales de uso, proporcionando una guía práctica y técnica para su aplicación en sistemas de media tensión.

El trabajo concluye con una serie de recomendaciones originales para el futuro de las protecciones eléctricas, basadas en los hallazgos y análisis realizados, con el objetivo de mejorar la seguridad y eficiencia de los motores de media tensión en aplicaciones industriales.

Abstract

This project focuses on the study and design of the necessary electrical protections for a medium-voltage motor, which is vital in numerous industrial environments. Through an exhaustive analysis, the various internal and external protections of the motor are described, as well as their mechanisms of operation, and their relevance to the integrity and efficiency of the machine.

Initially, an overview of medium-voltage motors is provided, highlighting their operation and the importance of adequate protection.

Subsequently, the concept of protection relays is introduced, explaining their fundamental role in fault detection and the activation of preventive measures to avoid major damage to the motor.

Later, the electrical protections of medium-voltage motors are divided into internal and external protections, according to their installation and operation relative to the machine. In the section on internal protections, those related to the temperature of the machine are addressed, analyzing different technologies and methods to monitor and control the temperature, ensuring that the motor operates within safe limits. The external protections are those installed outside the machine. These are responsible for monitoring parameters such as the current, voltage, frequency, etc., to protect the motor against overloads, undervoltages, overcurrents, ground faults, frequency variations, etc. These protections are extremely important to prevent damage that may result from abnormal and dangerous operating conditions.

Additionally, variable speed drives are explored, which are essential devices for the precise control of the motor's operation and for the implementation of advanced protection strategies.

Finally, a relay from a specific manufacturer is selected, detailing its parameters, commercial information, and user manuals, providing a practical and technical guide for its application in medium-voltage systems.

The work concludes with a series of original recommendations for the future of electrical protections, based on the findings and analyses carried out, with the aim of improving the safety and efficiency of medium-voltage motors in industrial applications.

1. Introducción

El motor de media tensión es un tipo de máquina eléctrica capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y es esencial en gran número aplicaciones y accionamientos eléctricos. Este tipo de motor, expresamente diseñado para operar en un rango de tensión intermedio, es ideal para ofrecer gran potencia y versatilidad en el conjunto de operaciones que puede llevar a cabo. Los motores de media tensión son utilizados en una gran variedad de sectores industriales gracias a su gran capacidad de mover cargas pesadas y operar en procesos continuos.

Como su propio nombre indica, un motor de media tensión es un tipo de motor eléctrico cuya operación se lleva a cabo en el intervalo de media tensión, según el reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) y otras normativas en España, la media tensión abarca el rango de tensiones desde 1000 a 36000 voltios en corriente alterna (típicamente la operación de este tipo de motores se realiza entre los 3000 y 6000 voltios), lo que los distingue de los motores de baja tensión.

Los motores de media tensión han ido evolucionando considerablemente desde sus inicios. Desde su creación como simples máquinas de inducción, estos motores eléctricos han pasado a ser sofisticadas máquinas con dispositivos avanzados integrados para su protección, monitorización y control.

Los primeros motores de media tensión estaban basados en un diseño simplificado y robusto, y eran utilizados en operaciones industriales simples. Destacaban por su peso considerable y su gran tamaño y contaban con una eficiencia limitada.

La introducción de nuevos y mejores materiales y la utilización de mejores técnicas de fabricación de estas máquinas permitieron reducir tanto el tamaño como el peso de estos motores, a la vez que se mejoró su eficiencia y rendimiento. También, las mejoras en los sistemas de refrigeración ayudaron a una mejor gestión del calor y por lo tanto un rendimiento con mayor consistencia.

Además, con la aparición de la electrónica de potencia y los sistemas digitales de control en tiempo real, se han podido integrar en estos motores eléctricos dispositivos de control de velocidad. Estos aparatos permiten un control con mucha más precisión de la velocidad del motor y el torque, aumentando el rendimiento y la eficiencia y sometiendo a la máquina a menor esfuerzo mecánico.

En la actualidad, los motores de media tensión cuentan con sistemas de monitorización y diagnóstico para llevar a cabo su actividad de manera más eficiente y segura. Esto permite llevar un mantenimiento seguro y predictivo del motor, además de una eficiente gestión energética. También, los dispositivos inteligentes como sensores modernos y sistemas de comunicación avanzados han conseguido mejorar significativamente la fiabilidad y eficiencia de estas máquinas eléctricas.

Debido al papel fundamental que desempeñan los motores de media tensión en todo tipo de industrias, es de vital importancia que se asegure su protección contra condiciones de operación anómalas y contra posibles fallos. Las protecciones eléctricas en los motores de media tensión son esenciales y necesarias para prevenir accidentes y daños en los equipos, además de proteger a los operarios e infraestructura. Las protecciones también son necesarias para garantizar un funcionamiento correcto e ininterrumpido de los motores, cualquier fallo en estas máquinas puede suponer una gran pérdida de productividad en la actividad que se esté llevando a cabo. Además, un motor bien protegido asegura un funcionamiento dentro de los límites nominales y por tanto evita un desgaste innecesario o posibles condiciones de operación peligrosas. La operación eficiente de los motores es crucial para reducir el consumo energético y los costes de la operación. Por último, un motor bien protegido tiene una vida útil mucho mayor, lo que permite reducir costes de mantenimiento e inversión en las industrias, y minimiza las averías.

Las protecciones eléctricas de un motor de media tensión se dividen en dos categorías principales: protecciones eléctricas internas y protecciones eléctricas externas.

Las protecciones eléctricas internas incluyen la monitorización y control de la temperatura del motor. El control de la temperatura del motor ayuda a prevenir el

sobrecalentamiento de la máquina con el uso de sensores y ayuda a asegurar que el motor funciona en las condiciones adecuadas.

Las protecciones eléctricas externas están instaladas fuera de esta y se enfocan en proteger al motor frente a las condiciones eléctricas anómalas externas que le puedan afectar negativamente. Destacan las protecciones durante el arranque de la máquina, frente a rotor bloqueado y frente a sobrecorrientes, desequilibrios, tensiones y defectos a tierra.

Este proyecto está centrado en el estudio y diseño detallado de las protecciones eléctricas necesarias en los motores de media tensión, con el fin de asegurar una operación segura, eficiente y fiable de estas máquinas en todo tipo de aplicaciones industriales.

Para ello se explicará y describirá el funcionamiento de un motor de media tensión, con el objetivo de saber cómo se tiene que proteger y posteriormente describir y estudiar en detalle dichas protecciones. Finalmente, se realizará un estudio práctico de un relé de protección real de un fabricante determinado.

2. Motores de media tensión

Los motores de media tensión son máquinas eléctricas que sirven para transformar la energía eléctrica en energía mecánica y que operan en el rango de media tensión, típicamente entre los 3 y 6 kilovoltios.

Principalmente, estos motores son utilizados en aplicaciones industriales que requieren grandes cantidades de energía para operar maquinaria pesada y en procesos continuos. Por ello, son máquinas de gran tamaño y potencia y, además, existen distintos tipos según la aplicación industrial para la que se utilicen. A continuación, se detallan los sectores más destacados en el uso de estos motores [1].

En la industria manufacturera, los motores de media tensión se utilizan para impulsar maquinaria pesada, como por ejemplo prensas, trituradoras o para el transporte de materiales en la producción continua. Destaca en el uso de estas máquinas la industria cementera y azucarera, necesitando dichos motores para el movimiento de la maquinaria pesada como molinos, hornos rotativos, bombas, ventiladores...

Los motores de media tensión también se utilizan en la generación de energía. Son esenciales en centrales eléctricas de generación para mover el refrigerante de los sistemas de refrigeración, para la ventilación forzada y en otros equipos auxiliares para así asegurar la operación correcta de la planta.

En minería y plantas de petróleo o gas, los motores de media tensión se utilizan para impulsar las máquinas de extracción y procesamiento (bombas, compresores, trituradoras, bandas transportadoras, molinos...) y para ventilación.

Por último, estos motores son ampliamente utilizados en sistemas de bombeo. Se pueden encargar de impulsar bombas de gran tamaño y para la distribución de agua en redes de distribución de agua potable y en sistemas de riego agrícola. También se utilizan para el bombeo y procesamiento de aguas residuales en plantas de tratamiento y para sistemas de bombeo de largas distancias.

En este apartado se explica brevemente cómo es físicamente un motor de media tensión, describiendo sus principios básicos de funcionamiento, qué tipos de motores se pueden encontrar y las características principales de estos. De esta manera se sabrá como se debe proteger el motor interna y externamente para asegurar su operación continua, fiable y segura.



Imagen 1. Motor de media tensión W50 1000kW 4P 450J/H 3F 6600V 60Hz

Fuente: WEG

2.1. Partes de un motor de media tensión

En la siguiente figura se muestran las partes fundamentales de un motor de media tensión [2], para después comprender el principio de funcionamiento básico de estas máquinas.

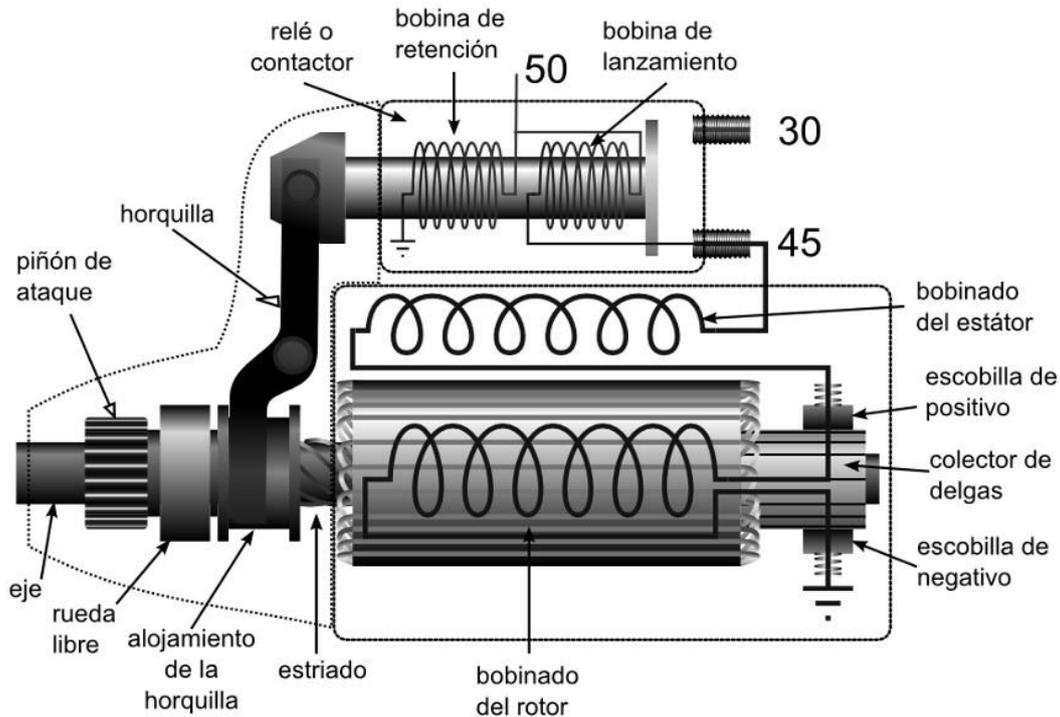


Imagen 2. Esquema básico de las partes de un motor de media tensión.

Fuente: Cursos Online Web.

Las escobillas son los elementos que se encargan de conectar la parte fija del motor eléctrico con la parte rotatoria. Tienen la capacidad de transmitir de forma correcta la corriente eléctrica.

En el interior del anillo se encuentra el cilindro. Este último tiene la libertad de girar y se encuentra unido al eje del motor. Cuenta con ranuras destinadas a contener el bobinado para la inducción.

El estátor tiene función de base del motor eléctrico. Se encuentra fijo, contiene al rotor en su interior y permite que el motor realice el movimiento rotatorio. Cuenta con devanados trifásicos conectados a la alimentación para producir el campo magnético que induce corriente en los bobinados del rotor.

El rotor es la parte donde se produce la inducción electromagnética. Como su propio nombre indica tiene la capacidad de rotar gracias a las fuerzas electromagnéticas inducidas por el estátor y es el que permite el giro del eje del motor. Es el elemento que realiza el cambio de energía eléctrica a mecánica.

Los cojinetes son componentes esenciales que aseguran el funcionamiento eficiente de las partes rotativas de un motor. Su propósito principal es reducir la fricción, así como fijar y soportar los ejes mecánicos, lo que contribuye a un menor consumo de energía.

Los demás elementos mecánicos como tapas, conexiones y soportes sirven para sostener las distintas partes del motor y permitir la conexión física de todos los elementos, asegurando el funcionamiento correcto y protegiendo los elementos mecánicos del motor.

Según como se induzca el campo magnético en el rotor o como sea la estructura de este elemento de la máquina, se pueden distinguir distintos tipos de motores. Existen dos tipos de motores en función de cómo se induce el campo magnético en el rotor: los motores de inducción y los motores síncronos.

2.2. Tipos de motores de media tensión y principio de funcionamiento

Los motores de media tensión pueden ser de inducción o síncronos. Están basados en la ley de Faraday, es decir, se basan en las propiedades electromagnéticas de la corriente eléctrica para generar un movimiento de rotación sobre un eje y así producir un esfuerzo mecánico. Ambos tipos de motores comparten varias características, pero tienen su propio principio de funcionamiento, distintas aplicaciones y ventajas específicas en la industria [3][4].

La máquina de inducción típica se compone de un estator (parte fija) y un rotor (parte móvil rotativa) en el interior del estator. El principio de funcionamiento básico es que cuando se aplica un voltaje en corriente alterna en los devanados trifásicos del estator (conectados a la alimentación), se genera un campo magnético rotatorio que induce en el rotor una corriente con su propio campo magnético asociado. Cuando se produce la interacción entre el campo magnético generado en el estator y el inducido en el rotor se produce una fuerza electromagnética que produce el movimiento de giro del rotor, lo que a través de un eje se convierte en energía mecánica aprovechable. La velocidad a la que gira el rotor se conoce como velocidad síncrona y viene determinada por la frecuencia de la corriente a la que se alimenta el motor (50 Hz en España) y el número de polos de este.

A pesar de que estas máquinas se pueden utilizar también como generadores, el uso como generador tiene muchas desventajas, lo que hace que se utilicen de esta manera en situaciones muy concretas y especiales. Es por ello por lo que generalmente se refiere a las máquinas de inducción como motores de inducción.

El principio de funcionamiento de los motores síncronos es muy similar al de las máquinas de inducción, con la diferencia de que el rotor puede tener un campo magnético constante gracias a tener acoplado imanes permanentes o ser excitado a través de corriente continua para crear el campo magnético necesario. En estos motores el campo magnético rotativo y el rotor poseen la misma velocidad de giro, lo que se conoce como sincronismo.

En el ámbito industrial conocido, los motores de media tensión más comúnmente utilizados y con más aplicaciones son los motores de inducción, dado que tienen un menor coste de inversión y mantenimiento a la vez que son más simples y robustos.

El motor de inducción tiene el mismo estator que un motor síncrono, pero con una diferente construcción del rotor. Existen dos tipos de motores de inducción según la construcción del rotor: motores de rotor de jaula de ardilla y motores de rotor bobinado [5].

Los motores de jaula de ardilla se usan principalmente en aplicaciones industriales que requieren de alto torque para el arranque y no necesitan un control muy preciso de la velocidad, como por ejemplo para mover bombas y compresores en industria pesada como azucareras o cementeras. Se llaman así debido a que el rotor en estas máquinas se compone de unas barras de aluminio o cobre dispuestas formando una estructura de jaula de ardilla. En la siguiente figura se muestra una imagen básica de un motor de jaula de ardilla [6].



Imagen 3. Representación esquemática del motor jaula de ardilla

Fuente: Wikimedia Commons.

Por otro lado, el motor de rotor bobinado está compuesto por devanados trifásicos que se conectan a anillos deslizantes, permitiendo la conexión de resistencias externas para controlar la intensidad de arranque y el torque de la máquina. Son ideales para aplicaciones que requieren un control de velocidad más preciso, ya que ajustando el valor de la resistencia se puede controlar la velocidad del rotor. Se utilizan para aplicaciones que requieren precisión en el movimiento como en el uso de elevadores o grúas [7]. A continuación, una imagen de un rotor bobinado.



Imagen 4. Representación del rotor bobinado

Fuente: Electricity – Magnetism.

A la hora de elegir qué tipo de motor se quiere instalar para realizar un trabajo en la industria, hay que tener en cuenta los siguientes puntos clave para la selección del motor [8]:

- 1- Qué se va a accionar: molinos, bombas, torres de refrigeración, ventiladores, compresores... Influye significativamente en su construcción el tipo de carga que va a mover el motor, por lo que es crucial definir qué tipo de acción va a realizar antes de construirlo.
- 2- Método de arranque del motor: El arranque de un motor es una situación delicada y potencialmente peligrosa por lo que es importante saber el tipo de arranque del motor: si es arranque directo, arranque suave, incorpora un variador de frecuencia, etc. Así se podrá diseñar y proteger de manera óptima el motor.
- 3- Cómo será la operación o régimen del motor: si trabaja en operación continua (solo se produce la parada en mantenimientos programados o situaciones de emergencia), si trabaja un tiempo limitado, u la operación es intermitente (por ejemplo, trabaja dos horas a valores nominales y después se para

momentáneamente o baja la velocidad durante un tiempo). También es importante saber si trabaja con cargas constantes o con cargas variables y la velocidad en el eje del motor requerida. De esta manera se conocen las características operativas requeridas por el motor antes de instalarlo.

- 4- En qué lugar geográfico y sitio físico va a estar operando el motor. Conocer la temperatura ambiente y demás factores a considerar en la operación del motor que dependen del lugar en el que se encuentra, para por ejemplo tener claro la ventilación disponible, el tipo de ambiente, la calidad del aire, la temperatura externa al motor, área de seguridad, exigencias de espacio, frecuencia de la red... Estos factores son fundamentales para construir el motor de la manera óptima y que tenga las características necesarias para su operación.

Además de estos puntos, hay que tener en cuenta las especificaciones técnicas generales y particulares, las tensiones de operación, la inercia de la carga, el método de acoplamiento y demás características para elegir correctamente el motor según el uso que se le quiere dar.

2.3. Funcionamiento de los motores de media tensión

De cara a entender cómo funcionan y que protecciones eléctricas son necesarias en los motores de media tensión, es necesario conocer el funcionamiento, las capacidades y los límites de estos motores.

La operación del motor se puede dividir en tres partes diferenciadas, cada una con sus posibles fallos y peligros: arranque, operación normal y parada.

1. Arranque del motor

Durante el arranque la corriente aumenta significativamente y puede llegar a valer unas 5 a incluso 7 veces el valor de la corriente nominal. Esto puede causar un notable estrés en el sistema eléctrico del motor y provocar gran cantidad de fallos.

2. Operación estable o normal del motor

Una vez alcanzada la velocidad deseada de operación del motor, el motor de inducción operará con un deslizamiento constante entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético.

En un motor síncrono, una vez alcanzado el sincronismo, la velocidad del campo magnético del estator es la misma que la del rotor, permitiendo un control mucho más preciso de la velocidad.

Durante la operación del motor es vital mantener la estabilidad para evitar daños y asegurar la máxima eficiencia del motor.

3. Parada del motor

Es fundamental controlar la parada del motor para evitar posibles daños por brusquedad en la desaceleración.

Además, según el fabricante de motores eléctricos ABB en su *Manual para motores y generadores de inducción* recomienda y especifica una serie de conductas y procedimientos que hay que llevar a cabo a la hora de operar con los motores eléctricos [9]. Es importante seguir estas pautas para asegurar el funcionamiento correcto y seguro de los motores eléctricos y también es útil para entender las protecciones eléctricas que se deben instalar en los motores de media tensión.

Primero, es imprescindible consultar y comprobar los datos técnicos de la placa de características del motor. Se debe prestar especial atención a la tensión, la conexión del devanado (estrella o triángulo), categoría y los límites de temperatura de la máquina. Conociendo esta información se podrá partir de una buena base para proteger con seguridad el motor y asegurar la operación óptima de este.

El número máximo de arranques consecutivos está especificado en la documentación técnica de la máquina. Una nueva secuencia de arranque puede iniciarse una vez que la máquina se haya enfriado hasta la temperatura ambiente (arranques en frío) o hasta la temperatura de funcionamiento (arranques en caliente).

Antes de arrancar, es crucial verificar que todos los cables de ecualización de potenciales y de toma de tierra estén correctamente conectados. No se deben retirar los cables de ecualización de potenciales o de toma de tierra instalados por el fabricante.

No se deben realizar ajustes en las cajas de bornes ni retirar componentes si esto reduce las separaciones entre las piezas o los conductores. Antes de instalar cualquier equipamiento nuevo en las cajas de bornes, se debe consultar al fabricante. Es esencial medir el entrehierro entre el rotor y el estátor después de cualquier tarea de mantenimiento del rotor o de los rodamientos, asegurándose de que este espacio sea uniforme en todos los puntos entre el estátor y el rotor.

Todas las conexiones en las cajas de bornes principales deben realizarse con conectores autorizados proporcionados por el fabricante junto con la máquina. Las conexiones en las cajas de bornes auxiliares, identificadas como circuitos intrínsecamente seguros, deben conectarse a barreras de seguridad adecuadas.

Si se enciende una resistencia de calentamiento anticondensación no autorregulada justo después de apagar el motor, es necesario tomar medidas adecuadas para controlar la temperatura dentro de la carcasa del motor. Las resistencias de calentamiento anticondensación deben funcionar solo en un entorno con control de temperatura.

Antes del arranque, es fundamental comprobar si es necesario purgar la envolvente de la máquina para asegurarse de que no contiene gases inflamables. Según el análisis de riesgos, el cliente y/o las autoridades locales decidirán si es necesario utilizar una ventilación previa al arranque.

Por todo lo anterior, en todos los motores de media tensión, existen muchos problemas y condiciones que pueden desencadenar diferentes fallos durante la operación de la máquina. Es de vital importancia identificar a tiempo los problemas que surjan y mitigarlos de forma inmediata o lo más rápido posible para conservar la seguridad y la eficiencia del motor.

Es por ello por lo que los motores de media tensión necesitan un amplio conjunto de protecciones eléctricas que aseguren su operación correcta, segura y eficiente.

3. Protecciones eléctricas en motores de media tensión

Es razonable pensar que los motores de media tensión que han sido diseñados y dimensionados con cuidado y detalle, que se operan correctamente y en los que se lleva un mantenimiento adecuado no deberían como tal experimentar ningún tipo de fallo. No obstante, en la práctica, dichas condiciones perfectas son ideales y distan mucho de la realidad. Los motores de media tensión están continuamente expuestos a muchos tipos de peligros durante su operación y por ello, es esencial llevar un control adecuado y una monitorización continua de su funcionamiento para poder solucionar a tiempo los problemas que puedan surgir y anticiparse a los daños.

Con el fin de asegurar la profundidad del análisis, se utilizará el documento *Fundamentos de Protección de Motores* de Rockwell Automation [10] como fuente principal a lo largo de las siguientes páginas. Esta elección se basa en la relevancia y pertinencia del trabajo de Rockwell Automation en el campo de protecciones eléctricas en motores, proporcionando un marco teórico adecuado. Además, se cita esta fuente desde el principio, para evitar así la repetición redundante de la misma en cada sección o apartado

La frecuencia con la que se producen fallos en los motores de media tensión varía notablemente según las condiciones específicas de operación de la máquina. Se estima que estos motores se encuentren anualmente en situación de paro entre un 0,5 y 5% del tiempo, siendo la gran mayoría de los fallos en los motores a causa de sobrecargas. También, los fallos en los aislamientos de los cables, los defectos a tierra o los cortocircuitos en el bobinado o entre las espiras se deben a tensiones mayores a la nominal, a factores ambientales o a la contaminación del lugar en el que se encuentra el motor, como por ejemplo la humedad del lugar, la temperatura ambiente, el polvo en el aire, productos químicos, aceites, grasa...

Aproximadamente, se estima que la proporción de cada una de las anteriores causas que producen fallos en los motores de media tensión es del 30% para las sobrecargas, 20% para los daños en el aislamiento de los conductores, 14% son fallos de fase, 13% daños

en la sujeción de los ejes del motor, 10% por el tiempo funcionando y el propio desgaste del motor, el 5% por daños en el rotor y el 8% restante se deben a otras causas.

Por ello, para asegurar la operación sin fallos ni averías de los motores de media tensión hay que seguir los siguientes puntos en el diseño y uso de estas máquinas eléctricas.

El diseño debe ser inherentemente seguro y adecuado. Hay que elegir el motor de media tensión adecuado para la aplicación industrial en el que va a ser utilizado y el diseño tiene que ser lo más correcto y seguro posible para dicha tarea y espacio disponible.

La operación debe ser llevada a cabo por profesionales. La instalación del motor por parte de profesionales y la operación y mantenimiento adecuado de la máquina es trivial para prevenir y evitar fallos y averías.

Es fundamental instalar las protecciones eléctricas adecuadas del motor, cubriendo todas las áreas de la máquina en las que hay posibilidad de fallo o de problemas. Para garantizar una operación eficiente y segura se debe evitar el disparo de la máquina si no hay ninguna situación de riesgo. Si dicha situación se da, la protección del motor deberá activarse previamente a la aparición de cualquier tipo de daño en el motor, para evitar problemas graves o irreversibles.

En situaciones de fallo imprevisible, la protección del motor se deberá activar con la mayor velocidad posible para reducir los daños al mínimo.

3.1. Causas de averías, efectos y posibles daños en motores

En este apartado se presentan brevemente las causas más comunes de fallos y averías en los motores de media tensión, la extensión de dichos fallos y los posibles daños que pueden causar.

3.1.1. Sobrecarga térmica

La sobrecarga térmica se produce cuando el motor es sometido a condiciones en las que se genera más calor del que es capaz de disipar. Las causas más comunes de sobrecarga térmica son:

- Condiciones de arranque extremas (la corriente por el motor supera significativamente la intensidad nominal durante arranques extremos)
- Rotor bloqueado
- Baja tensión en los bobinados
- Alta sobrecarga
- Operación de forma intermitente

Entre los efectos más importantes de la sobrecarga térmica destaca la sobreintensidad por los bobinados y por ello, el calentamiento inadmisibles de estos.

Los posibles daños en el motor incluyen desde daños en los empalmes soldados de la jaula del rotor hasta posiblemente bobinados del estator quemados.

3.1.2. Problemas de enfriamiento

Los problemas de enfriamiento surgen por una refrigeración inadecuada del motor, lo que puede suponer un sobrecalentamiento excesivo, derivando en fallos en el motor. Las causas más frecuentes de problemas de enfriamiento del motor son:

- Enfriamiento del motor restringido (el sistema de refrigeración del motor no puede disipar adecuadamente el calor ya sea por fallo, obstrucciones o diseño inadecuado del sistema)
- Temperatura ambiente demasiado elevada

El efecto más significativo de la refrigeración inadecuada del motor es, evidentemente, el calentamiento inadmisibles de la máquina y, al igual que antes, entre los posibles daños aparecen quemaduras en los bobinados, tanto del rotor como del estator.

3.1.3. Causas eléctricas

Entre las causas eléctricas que llevan a fallos en los motores de media tensión destacan principalmente:

- Tensiones desequilibradas
- Defectos a tierra
- Condiciones de una sola fase (fallo en uno de los conductores del sistema trifásico)
- Cortocircuito en las espiras

- Cortocircuito en los bobinados

Los efectos más comunes de los fallos relacionados con averías del sistema eléctrico son desequilibrios, sobreintensidades y sobrecalentamiento en función del tamaño del motor.

Los posibles daños en el motor por causa eléctricas son quemaduras en los bobinados, cojinetes, y demás elementos que puedan ser potencialmente afectados por el funcionamiento eléctrico indebido del motor.

3.1.4. Causas mecánicas

Las causas mecánicas que producen averías en los motores de media tensión incluyen:

- Cabeceo de la máquina
- Desalineamiento del motor
- Instalación inadecuada del motor (cargas y tensiones demasiado elevadas en elementos de sujeción de la máquina como cojinetes)

El principal efecto de estos problemas es el desgaste prematuro de los cojinetes del motor, llevándolo a funcionar inadecuadamente.

3.2. Necesidad de protección

En este apartado se describen los requerimientos en la operación tanto del motor como del sistema para garantizar su funcionamiento adecuado y, además, conocer los límites admisibles de la máquina para poder diseñar las protecciones adecuadas.

3.2.1. Necesidades de protección de motores

Según la normativa vigente y aplicable, los fabricantes de motores de media tensión deben asegurar que los elementos críticos de las máquinas no se salen del rango de temperaturas admisibles durante el funcionamiento del motor en las condiciones de trabajo especificadas. También se debe garantizar que no se producen daños en el motor debido a sobrecargas de corta duración durante la operación.

Los dispositivos de protección del motor no deben interferir con la operación plena y eficaz del mismo a la vez que deben ser capaces de reaccionar con suficiente rapidez en caso de que se produzca una sobrecarga.

3.2.1.1. Operación y carga

Los motores de media tensión son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Como en todo proceso se producen pérdidas de energía, manifestándose en forma calor disipado.

Las pérdidas de energía se diferencian en las pérdidas independientes de la corriente y las dependientes de esta. Las primeras suelen ser constantes y se dan también a pesar de no haber carga en el motor, como por ejemplo las pérdidas mecánicas por rozamiento y a causa de la fricción con el aire o las pérdidas debidas a las corrientes de histéresis. Las pérdidas dependientes de la corriente son aquellas que aumentan a la vez que se aumenta la carga del motor, es decir, a la vez que aumenta la corriente por este. Estas son las pérdidas de potencia en el estator y en el rotor.

Estas pérdidas de potencia aumentan proporcionalmente al cuadrado de la corriente

$$P = I^2R$$

donde P es la potencia, I la corriente y R la resistencia,

y el cuadrado de la corriente es a su vez proporcional al deslizamiento del motor.

Para un rotor bloqueado o estático, la corriente máxima admisible durante el arranque es de 4 a 8 veces la corriente nominal. Toda esta potencia de entrada se transforma directamente en calor disipado. Si el rotor permanece estático o bloqueado el suficiente tiempo la temperatura de los bobinados del estator y del rotor aumentará significativamente. Si no se consigue desconectar a tiempo el motor en esta situación, es muy probable que los bobinados del rotor y estator acaben quemándose.

Las pérdidas por calor disipado se van reduciendo a medida que aumenta la velocidad. Tras el arranque la temperatura del motor se va incrementando hasta alcanzar el nivel final de operación. Cuanta más elevada sea la carga del motor, más alta será la temperatura final correspondiente.

Los motores eléctricos de media tensión presentan una estructura térmica heterogénea. Los bobinados y los hierros del rotor y el estator poseen capacidades y conductividades térmicas diferentes. Durante el funcionamiento del motor y las fluctuaciones de la carga, la temperatura se va distribuyendo por los distintos elementos del motor. El calor se transfiere de los elementos más calientes a los más fríos (de los bobinados calientes al hierro más frío) hasta alcanzar un equilibrio térmico.

3.2.1.2. Límites de temperatura y aislamientos del bobinado

La temperatura máxima admisible del bobinado, que viene determinada por la carga admisible del motor, determina el aislamiento necesario del bobinado.

El material aislante utilizado para recubrir los bobinados se clasifica principalmente de acuerdo con el límite térmico del material. Cuanta más carga de trabajo del motor, mayor será la temperatura de operación y más alto será el rango de degradación térmica del aislante, por lo que la vida útil será menor y se necesitará un material que soporte mejor las elevadas temperaturas [11].

Los materiales aislantes para los bobinados en motores se clasifican en diferentes grupos, nombrados por las letras Y, A, E, B, F, H y C. A continuación, se muestran las temperaturas máximas admisibles en los aislamientos de los bobinados que pueden aguantar sin deteriorarse:

- Clase Y: Temperatura máxima admisible = 90°C
- Clase A: Temperatura máxima admisible = 105°C
- Clase E: Temperatura máxima admisible = 120°C
- Clase B: Temperatura máxima admisible = 130°C
- Clase F: Temperatura máxima admisible = 155°C
- Clase H: Temperatura máxima admisible = 180°C
- Clase C: Temperatura máxima admisible > 180°C

Los materiales pertenecientes a la clase Y no se utilizan generalmente para aislamiento de bobinados en motores eléctricos dado que fácilmente pueden absorber humedad y su condición se degrada a mucha velocidad. Los materiales pertenecientes a la clase C generalmente son quebradizos por lo que tampoco es recomendable su uso en motores eléctricos. Los de las clases A, E y B se han utilizado durante un gran periodo de tiempo

para el aislamiento de bobinados en motores eléctricos, sin embargo, actualmente los aislamientos de las clases F y H se están utilizando más debido a ser materiales más modernos que permiten temperaturas máximas admisibles más elevadas.

En motores eléctricos la temperatura máxima admisible generalmente es de 40°C. A mayor altitud, esta temperatura se ve limitada por lo que es un factor para tener en cuenta a la hora de diseñar el motor.

Si la temperatura del motor supera estos 40°C se debe reducir la potencia del motor conforme al aumento de la temperatura. Si, por ejemplo, el motor estuviese trabajando a 45°C, deberíamos reducir la potencia en un 8%, si estuviese a 50°C, habría que reducir la potencia un 17% y así sucesivamente según los datos aportados por el fabricante.

Durante el arranque de motores de media tensión pueden aparecer distintos problemas dado que el intervalo de arranque se puede ver limitado por el valor de las pérdidas. Este intervalo y el intervalo de bloque del rotor admisible están directamente limitados por las capacidades térmicas del rotor. A este tipo de motores se les conoce como motores de rotor crítico y si se someten a un elevado aumento de temperatura durante la operación pueden provocar tensiones mecánicas y desuelde de los elementos que conforman el rotor.

Si la temperatura del bobinado se mantiene dentro de los límites del aislamiento, se estima una vida útil para todos los tipos de aislamiento de aproximadamente 100.000 horas, lo que se traduce en alrededor de 12 años de operación continua a la potencia nominal.

El envejecimiento del aislamiento de los bobinados es debido a un proceso químico dependiente de la temperatura a la que es sometido. El calentamiento provoca que una parte del material aislante se evapore, aumentando la porosidad y, por tanto, se reduce la resistencia mecánica a la tensión. Las temperaturas excesivamente elevadas durante períodos de corta duración no suponen un impacto significativo en el límite de vida útil de los motores. No obstante, la temperatura de operación continua no debe superar el máximo admisible por el aislante para no perjudicar la vida útil de los bobinados.

En la siguiente figura se muestra el impacto de temperaturas excesivamente altas en la vida útil del bobinado de un motor, donde t es el período de vida media previsto para los motores en % y ϑ el incremento de temperatura en grados Kelvin.

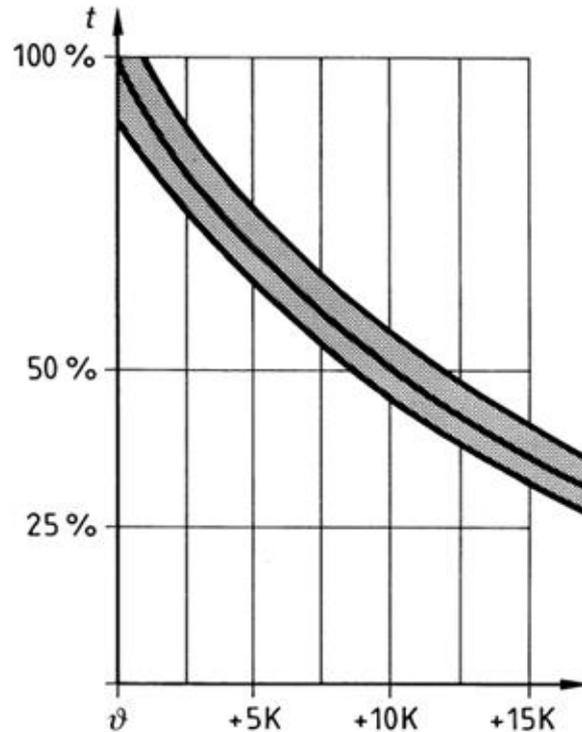


Figura 1. Reducción de la vida media útil del bobinado de un motor debido a temperaturas excesivamente altas.

Fuente: Rockwell Automation.

Actualmente, se tienen en cuenta las situaciones de sobrecarga del motor para su diseño final. De esta manera, por motivos económicos, es posible hacer un diseño que se oriente al ciclo de vida útil del motor, para permitir la operación de este el tiempo que sea necesario.

3.2.1.3. Límites de respuesta de relés de sobrecarga térmicos

Para asegurar la protección de los motores, los relés de sobrecarga térmicos son utilizados para proteger al equipo contra sobrecargas de tiempo prolongado y sobrecalentamientos.

Según las normas establecidas en las IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) relacionadas con motores eléctricos y máquinas rotativas y otras prácticas industriales típicas, los límites de respuesta de los relés de sobrecarga térmicos para motores de media tensión son los siguientes:

- Deben ajustarse para no disparar y permitir corrientes de hasta 1,1 veces la corriente nominal en tiempo prolongados, es decir, períodos de tiempo mayores a 2 horas.
- Para corrientes 1,5 veces la corriente nominal, el tiempo de respuesta del relé debe ser menor que 2 minutos.
- Para corrientes 7,2 veces la nominal el tiempo de respuesta del relé de protección debe estar entre los 2 y 10 segundos.

3.2.1.4. Fallo de una fase

La interrupción de uno de los conductores del motor es el fallo de una fase. En esta situación, el motor continúa con su funcionamiento, pero solo con dos fases, lo que puede ocasionarle daños. Una de las causas más comunes de este tipo de fallo es, por ejemplo, un fusible fundido. Los motores de media tensión de tamaño mediano tienden a ser más críticos en el estator. Según la configuración del motor se encuentran diferencias clave.

Los motores con conexión en estrella no están en ningún riesgo importante debido al fallo de una de las fases. Cuando el conductor es interrumpido, las corrientes por el resto de los bobinados se equilibran, aumentando dichas corrientes en los dos bobinados activos restantes. El incremento de la corriente produce una mayor pérdida de potencia por los bobinados activos. El motor como conjunto permanece relativamente frío debido a la compensación térmica del tercer bobinado inactivo. La protección que se encarga de detectar la corriente disparará en el momento adecuado en caso de detectar una sobreintensidad. Los motores medianos que se encuentran en configuración estrella no suelen correr ningún riesgo significativo en el caso de que se interrumpa una de las fases.

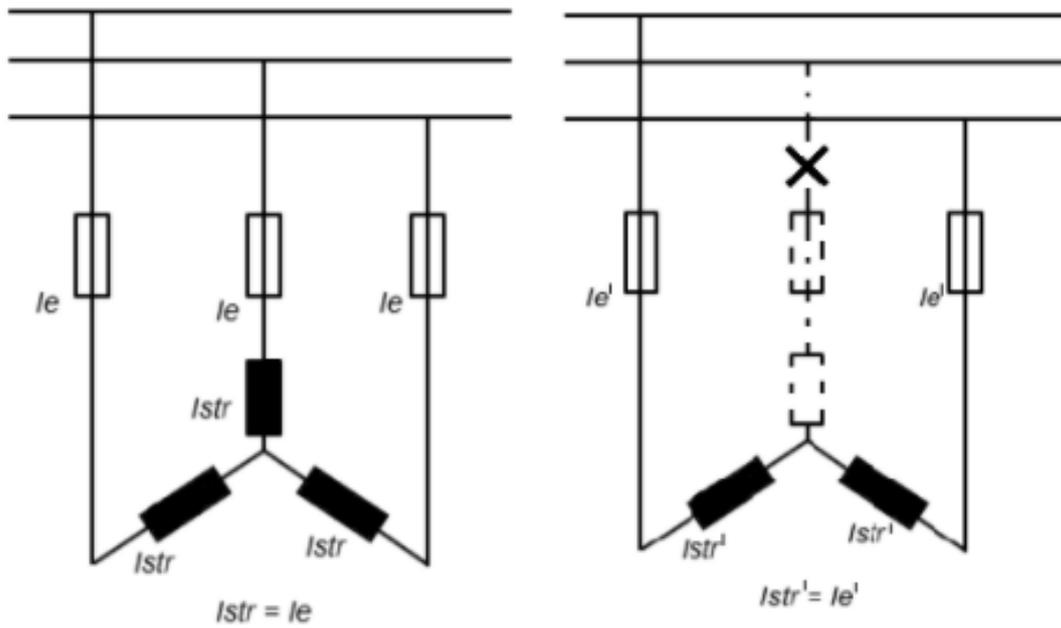


Figura 2. Fallo de una fase de un motor en conexión estrella.

En los motores con configuración en triángulo las corrientes por las fases en condiciones normales son menores en un factor de $1/\sqrt{3}$ en comparación con las corrientes en los bobinados, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_{STR} = 1/\sqrt{3} \cdot I_n.$$

Donde I_{STR} es la corriente por las fases e I_n es la corriente nominal por el bobinado.

Si ocurre un fallo en una de las fases, la corriente por el resto de las fases activas aumenta un 50 % aproximadamente, mientras que se reduce alrededor de un 67 % por los bobinados en serie. Este ajuste es debido a que el motor mantiene la potencia transmitida al eje prácticamente constante. El valor del incremento de la corriente en los bobinados y en las fases activas depende de la carga a la que el motor está sometido.

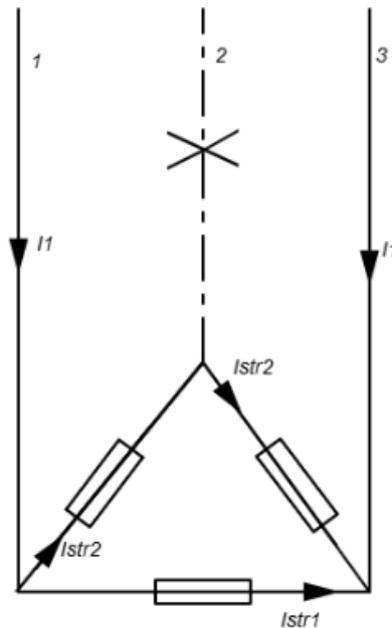


Figura 3. Fallo de una fase de un motor en conexión triángulo.

Dado que tras el fallo de una de las fases las corrientes por los bobinados pasan a ser diferentes, el calentamiento de estos es distinto también, ya no se calientan lo mismo. Para motores con potencias mayores de 10 kW (siendo el caso de los motores de media tensión) es recomendable la utilización de una protección electrónica cuya respuesta sea rápida y que tenga protección frente a fallo de una de las fases. La respuesta rápida en el corte, además de la protección eléctrica que supone como tal, ayuda a reducir las tensiones mecánicas a las que están sometidos los cojinetes del motor.

Si el estator se encuentra alimentado por una sola fase, en comparación con una alimentación simétrica, las pérdidas en el rotor son significativamente más elevadas, lo que supone especialmente un peligro adicional en motores de rotor crítico.

3.2.1.5. Cortocircuitos

Se diferencian los cortocircuitos entre fases aisladas de tierra y los cortocircuitos que involucran dos o tres fases sin tener contacto a tierra. Las causas principales de los cortocircuitos son debidas a daños en los aislamientos y a daños mecánicos. Las corrientes generadas pueden alcanzar valores muy altos ya que dependen de la impedancia del circuito. A medida que el cortocircuito se prolonga en el tiempo, más incrementan de

forma equivalente los daños materiales en el motor. Por tanto, es de vital importancia detectar y desconectar los cortocircuitos en el motor lo más rápido posible.

3.2.1.6. Defectos a tierra

Los defectos en los aislamientos se suelen deber a picos de alta tensión y normalmente provocan cortocircuitos contra las partes del motor conectadas a tierra. Estos picos de alta tensión se deben a fuentes como relámpagos, operaciones de conmutación de la red, descargas de condensadores y a la operación de sistemas eléctricos.

3.2.1.7. Asimetría en la red

La tensión entre fases no es exactamente la misma. Lo mismo pasa con la tensión entre fases en la red de inducción. Las causas de estas diferencias de tensión son debidas a factores como líneas de distribución de la red de grandes longitudes y a contactores y contactos defectuosos en interruptores automáticos.

Según la NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) y a la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) la asimetría de tensión en la red se define como:

$$\Delta U [\%] = \frac{\text{Máxima desviación del valor medio de las tensiones entre fases}}{\text{valor medio de las tensiones entre fases}} \cdot 100$$

La asimetría en las corrientes que circulan por los bobinados (resultantes de la asimetría de tensión) alcanza valores muy superiores a la asimetría de tensión, produciendo un calentamiento adicional, y, por tanto, reduciendo correspondientemente el período de vida útil del motor.

3.2.2. Necesidades de protección del sistema

3.2.2.1. Rotor bloqueado

El imponer un par de carga demasiado elevado o determinados daños en los elementos mecánicos del motor pueden suponer el bloqueo del rotor. Es muy importante realizar la desconexión de la red del dispositivo que ha sido afectado de la manera más rápida posible. Si la desconexión se realiza correctamente en un tiempo adecuado se conseguirá evitar tensiones mecánicas e incrementos térmicos innecesarios en los elementos del

motor y de transmisión a la red, además de reducir drásticamente la cantidad de posibles accidentes.

3.2.2.2. Subcarga

Una subcarga se produce cuando la carga del motor es inferior a la capacidad de plena carga de este. Como tal las condiciones de subcarga no suelen suponer ningún tipo de riesgo para el motor, sin embargo, si no se prevé la condición de subcarga y esta es debida a algún fallo mecánico la subcarga puede suponer tiempos de parada prolongados de la planta de la que forma parte el motor y puede provocar daños en el sistema. Detectar el fallo a tiempo asegura no mantener parada la planta más de lo requerido y ayuda a evitar posibles accidentes.

3.2.2.3. Rotación incorrecta

Si se produce la conmutación de un motor con una rotación incorrecta se pueden producir daños graves en el sistema y aumenta considerablemente las probabilidades de que se produzca algún tipo de accidente. Es sumamente importante evitar conmutar dichos motores si la rotación no es la correcta, con el fin de evitar daños y accidentes.

3.2.2.4. Lugares con riesgo de explosión

En determinadas condiciones, ciertas combinaciones de gases y vapores inflamables con el aire pueden combustionar por chispas o altas temperaturas. La temperatura de ignición varía según la composición química y la proporción de la mezcla. Para evitar la combustión de una mezcla explosiva en los motores, es crucial garantizar que la temperatura máxima del punto más caliente esté por debajo de la temperatura crítica de ignición en esa zona. Además, la temperatura límite del aislamiento del bobinado no debe superarse en ningún caso.

3.3. Medidas de protección en motores de media tensión

Los relés de protección son dispositivos utilizados en sistemas eléctricos para monitorear, detectar y responder a condiciones anormales, como sobrecargas, cortocircuitos, fallos de fase, y otros eventos que puedan dañar el equipo eléctrico, especialmente motores. Su función principal es proteger el sistema eléctrico y sus componentes, asegurando una

operación segura y confiable. El relé de protección funciona mediante la detección, evaluación y acción. En la fase de detección, el relé monitorea continuamente los parámetros eléctricos, como la corriente, la tensión, la frecuencia y la temperatura, utilizando sensores y dispositivos de medición para obtener estos datos. En la evaluación, compara las mediciones obtenidas con los valores preestablecidos de operación segura, y si detecta una desviación significativa de estos valores, indica una condición anormal o peligrosa. En la fase de acción, cuando se detecta una condición anormal, el relé de protección actúa de acuerdo con la programación, enviando señales para activar alarmas y, si es necesario, desconectar el circuito eléctrico afectado para prevenir daños mayores. Los requisitos necesarios antes de poner en tensión los relés es tomar los datos de la placa de características del motor de media tensión y utilizar estos valores para parametrizar los valores de operación segura pertinentes del relé según la medida que este realice.

En este apartado se describen las medidas que se adoptan para diseñar las protecciones eléctricas de los motores de media tensión. Se explicará el tipo de protecciones que se utilizan para proteger a los motores y qué relé de protección concreto se debe instalar en cada caso. Se dividirán las protecciones en dos tipos: protecciones eléctricas internas y protecciones eléctricas externas.

La diferencia entre las protecciones eléctricas internas y externas en el contexto de los motores de media tensión radica en su ubicación, funciones específicas y el tipo de condiciones anormales que detectan y manejan.

Las protecciones eléctricas internas se encuentran integradas dentro del motor o en componentes directamente asociados al motor. Entre sus funciones específicas, se incluyen el monitoreo de temperatura, la detección de vibraciones, etc. Dispositivos como termistores y sensores de temperatura están instalados en los devanados y otras partes críticas del motor para monitorear el sobrecalentamiento. Los sensores de vibración que están colocados en puntos críticos del motor detectan vibraciones anormales que pueden indicar problemas mecánicos internos. Además, los relés térmicos internos protegen al motor frente sobrecargas prolongadas, desconectando el motor si se detecta un aumento sostenido de corriente. También se utilizan sensores y relés específicos para monitorear

la corriente y la posición del rotor, detectando bloqueos y desconectando el motor antes de que ocurra un daño significativo

Por otro lado, las protecciones eléctricas externas se instalan fuera del motor, típicamente en el sistema de control o en paneles de distribución de energía. Sus funciones específicas incluyen el monitoreo de corriente, la detección de fallas a tierra, la protección contra pérdidas de fase, el monitoreo de la tensión, protección frente a subtensiones, protección frente a sobrecargas, protección contra sobrecorrientes y la protección contra sobretensiones transitorias. Los relés de sobrecorriente monitorean la corriente en las líneas de alimentación y desconectan el motor si la corriente supera los límites seguros. Los relés de falta a tierra detectan corrientes de fuga a tierra, minimizando riesgos eléctricos y daños al equipo. Los relés de pérdida de fase detectan desequilibrios o pérdida de fase en el suministro de energía y desconectan el motor para evitar daños. Los relés de subtensión y sobretensión monitorean el voltaje de suministro, protegiendo contra fluctuaciones que pueden dañar el motor. Los relés de sincronismo aseguran que el motor esté correctamente sincronizado con la red eléctrica, desconectándolo si se pierde la sincronización.

A continuación, se describen las protecciones más comunes instaladas en los motores de media tensión [12], diferenciando entre las protecciones internas y externas al motor.

3.3.1. Protecciones eléctricas internas

3.3.1.1. Protecciones dependientes de la temperatura

Los sensores de temperatura de los motores están instalados en el codo del bobinado del estator y por ende miden de forma directa la temperatura crítica de la máquina. Las condiciones de operación en las que estos sensores de temperatura son utilizados principalmente incluyen el trabajo en régimen de parada o de arranque, trabajo en carga variable, frenado por contracorriente, temperatura ambiente elevada, refrigeración incorrecta, contaminación del aire, y en motores con control de velocidad incorporado.

Siempre es positivo poder acceder a información directa de la temperatura interna del motor, puesto que es posible que el calentamiento real de este no esté causado solamente por la corriente que consume la máquina si existen problemas en el sistema de refrigeración.

Aun así, en muchas ocasiones los sensores de temperatura son insuficientes para la protección del motor, aunque este corra riesgo de sobrecalentamiento. En estos casos se utilizan aparatos de medida de corriente adicionales, que serán descritos más adelante.

3.3.1.1.1. Detector de temperatura de resistencia Pt100 (38)

En los motores de media tensión se utilizan frecuentemente las sondas de lectura de temperatura de platino Pt100 [10], dispositivos de detección de temperatura lineales, para la supervisión de temperatura. El valor de la resistencia de este dispositivo aumenta proporcionalmente a la temperatura que mide. La temperatura a la que responden estos sensores es capaz de ajustarse con independencia al dispositivo de disparo. También, existe la capacidad de ajustar y fijar el valor de temperatura en el que se produce el disparo de aviso de advertencia o de control de carga.

A continuación, se muestra la curva característica de la resistencia de un sensor de temperatura Pt100.

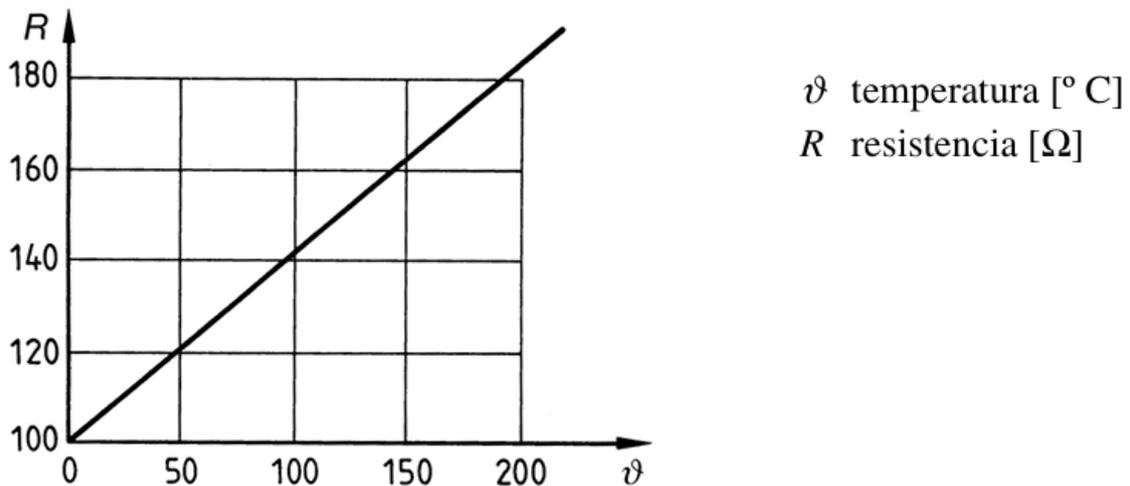


Figura 4. Curva característica de la resistencia de un sensor de temperatura Pt100.

Fuente: Rockwell Automation.

Si el Pt100 está instalado en un motor de media tensión y mide una resistencia superior a la normal, indica que el motor está experimentando un sobrecalentamiento. Este sobrecalentamiento puede ser causado por diversas razones, como sobrecargas, problemas de ventilación, o fallos internos en el motor. El sobrecalentamiento prolongado puede deteriorar el aislamiento del motor y otros componentes, lo que disminuye la vida útil del motor y aumenta el riesgo de fallos graves. Los sistemas de protección están diseñados para responder a las lecturas de temperatura, es decir, si el sensor de temperatura Pt100 registra una resistencia alta, el sistema de protección puede activar alarmas o incluso desconectar el motor para evitar daños mayores. Esto asegura que el motor no funcione en condiciones peligrosas, lo cual podría provocar un fallo prematuro.

3.3.2. Protecciones eléctricas externas

3.3.2.1. Protección de sobrecarga térmica (49)

Según el fabricante Schneider Electric, la protección de sobrecarga térmica (ANSI 49) [13] en motores se basa en el cálculo del calentamiento del motor mediante la medición de la intensidad consumida. Esta protección es sumamente importante para evitar que las sobrecargas dañen el aislamiento del motor, asegurando así un funcionamiento adecuado. Mediante esta protección, el motor puede absorber sobrecargas temporales sin sufrir daños, lo que garantiza su operación continua y eficiente.

Cuando se produce una sobrecarga, el aumento en la corriente consumida por el motor genera un incremento en la temperatura de sus componentes internos. La protección contra sobrecargas utiliza relés térmicos o electrónicos que monitorean constantemente la corriente. Estos dispositivos están calibrados para activar una alarma o desconectar el motor si la corriente supera los niveles seguros durante un período específico.

El relé de sobrecarga simula el calentamiento del motor, evaluando la intensidad de la corriente y el tiempo de exposición a dicha corriente. Si la corriente excede el valor nominal del motor durante un tiempo prolongado, el relé actúa para desconectar el motor y prevenir daños al aislamiento y otros componentes internos. Esta desconexión evita el

sobrecalentamiento, que puede causar el deterioro del aislamiento y, en última instancia, fallas catastróficas en el motor.

Además, este tipo de protección permite que el motor tolere sobrecargas temporales, lo cual es común en ciertas aplicaciones industriales. Por ejemplo, durante el arranque de cargas pesadas o en procesos que requieren breves incrementos en la carga. A estos arranques se les conoce como “penosos” y son muy comunes en sistemas de bombeo y compresores, donde se debe arrastrar masa, siendo más costoso y requiriendo de más carga en la operación. La protección ante sobrecargas está diseñada para diferenciar entre sobrecargas temporales seguras y sobrecargas prolongadas que pueden causar daños.

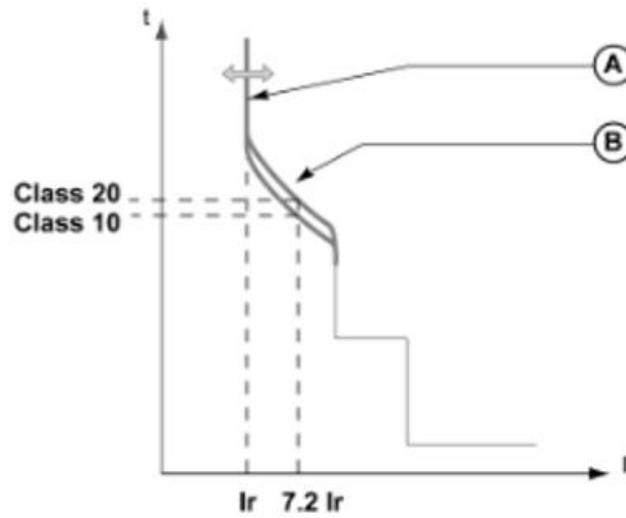
La protección contra sobrecarga se implementa a través de una configuración de largo retardo utilizando dos reguladores.

El ajuste de disparo para la protección de largo retardo de la unidad de control, denominado I_r , se expresa en amperios y se configura conforme a la corriente de funcionamiento específica de la aplicación del motor. El valor máximo de I_r coincide con la intensidad nominal (I_n) de la unidad de control. Este ajuste determina el umbral a partir del cual la protección actuará para desconectar el motor en caso de sobrecarga.

Los reguladores de largo retardo permiten adaptar la protección a las características de arranque del motor. Como se ha comentado antes, esto es especialmente importante en aplicaciones donde el motor experimenta corrientes elevadas al arrancar, pero que no necesariamente indican una condición de sobrecarga peligrosa.

La protección contra sobrecarga o térmica sigue una curva de disparo que refleja el comportamiento de la corriente respecto al tiempo. Esta curva se puede configurar mediante el umbral de disparo (I_r) y la clase de disparo (*Class*). La clase de disparo define el tiempo de reacción de la protección en función de la magnitud de la sobrecarga. Por ejemplo, una clase de disparo más baja reaccionará más rápidamente a una sobrecarga en comparación con una clase de disparo más alta. La curva de disparo se muestra a

continuación:



| Elemento | Parámetro | Descripción |
|----------|-----------|---|
| A | I_r | Disparo de protección contra sobrecarga o térmica |
| B | Clase | Clase de disparo de protección por sobrecarga o térmica (conforme al estándar IEC/EN 60947-4-1) |

Figura 5. Curva de disparo de la protección contra sobrecarga.

Fuente: Schneider-Electric.

El rango de disparo de la protección contra sobrecarga térmica está establecido entre 1,05 y 1,20 veces I_r , según la norma IEC/EN 60947-4-1. Esto asegura que la protección sea lo suficientemente sensible para responder a sobrecargas moderadas mientras se evita disparos innecesarios por corrientes ligeramente superiores a la nominal.

En la tabla siguiente, se muestran los valores del conmutador de ajuste I_r en amperios para diferentes valores nominales de corriente I_n :

| Intensidad nominal de la unidad de control I_n (A) | Disparo I_r (A) |
|--|---|
| 150 | 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 |
| 220 | 100, 120, 140, 155, 170, 185, 200, 210, 220 |
| 320 | 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320 |
| 500 | 250, 280, 320, 350, 380, 400, 440, 470, 500 |

Tabla 1. Valores de ajuste de la corriente I_r en función de la corriente nominal I_n de la protección contra sobrecarga.

Fuente: Schneider-Electric.

La clase de disparo se elige ajustando un conmutador. Esta clase se refiere al tiempo de disparo para una corriente de 7,2 veces I_r , según la norma IEC/EN 60947-4-1. La siguiente tabla presenta los tiempos de disparo en función de la corriente presente en la carga para cada clase de disparo, con una precisión de -20%, +0%:

| Corriente en la carga | Tiempo de disparo (segundos) | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------|-----------|
| | Clase 5 | Clase 10 | Clase 20 |
| $1,5 \times I_r$ | 96 – 120 | 192 - 240 | 320 – 400 |
| $6 \times I_r$ | 5,2 – 6,5 | 10,8 – 13,5 | 20,8 - 26 |
| $7,2 \times I_r$ | 4 - 5 | 8 - 10 | 16 - 20 |

Tabla 2. Valor de ajuste de clase del disparo de la protección contra sobrecarga.

Fuente: Schneider-Electric.

La función de imagen térmica del motor permite que la protección simule el aumento de temperatura en los componentes del motor debido a la corriente de sobrecarga teniendo en cuenta las pérdidas en el hierro y cobre. Esto asegura que la protección actúe no solo en función de la magnitud de la corriente, sino también considerando el efecto acumulativo del calor generado por dicha corriente. Este enfoque proporciona una protección más precisa y efectiva, minimizando el riesgo de daños al motor debido a sobrecargas prolongadas. La imagen térmica del motor es calculada teniendo en cuenta que el motor se auto ventila, es decir, que cuenta con un ventilador montado en el eje).

La memoria térmica consiste en que la unidad de control utiliza una función especial para proteger el motor contra sobrecalentamientos que pueden ocurrir debido a fallos repetitivos de baja amplitud. En casos donde no se implementa una función de memoria térmica, la protección electrónica no puede proteger eficazmente contra fallos repetitivos porque la duración de cada sobrecarga es demasiado breve para provocar un disparo de

protección. Aunque cada sobrecarga breve no es suficiente para activar la protección, contribuye al aumento gradual de la temperatura en el motor.

El efecto acumulativo de estas sobrecargas sucesivas puede llevar al sobrecalentamiento del sistema, lo que puede causar daños significativos. La función de memoria térmica resuelve este problema al recordar e integrar el calentamiento provocado por cada sobrecarga, incluso si estas no son suficientes para activar una protección inmediata. Esta función de memoria térmica almacena los valores de calentamiento durante un período de 20 minutos antes o después de un disparo.

A continuación, se presenta un ejemplo comparativo entre el cálculo del calentamiento sin imagen térmica (esquema A) y con imagen térmica (esquema B):

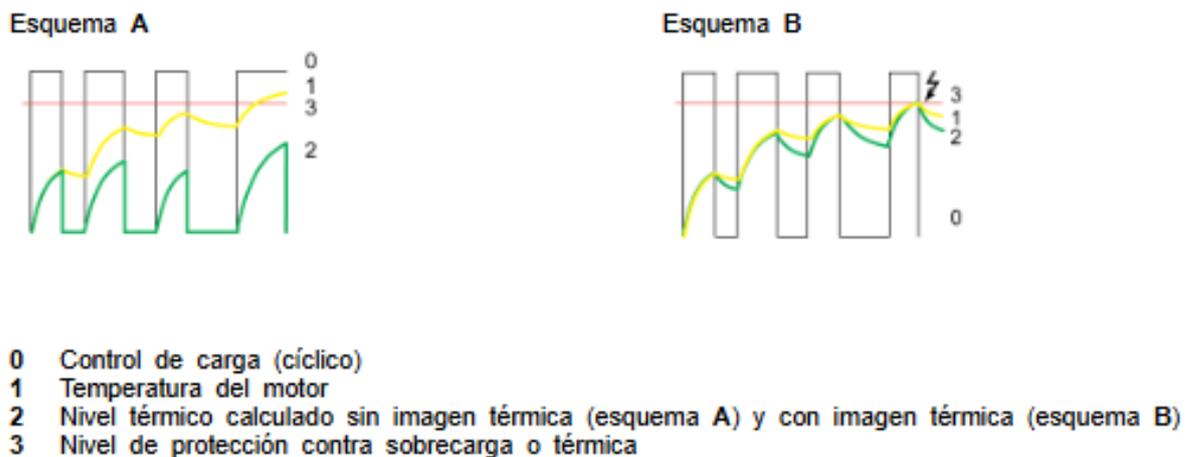


Figura 6. Comparación del calentamiento sin (A) y con (B) imagen térmica.

Fuente: Schneider-Electric.

3.3.2.2. Protección de sobreintensidad o sobrecorriente (50/51)

La protección de sobreintensidad o sobrecorriente (ANSI 50/51) [14] es fundamental para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente de los motores eléctricos, particularmente en aplicaciones industriales donde se emplean motores de media tensión. Las protecciones de sobreintensidad se clasifican generalmente en dos tipos, conocidas como 50 y 51 según la normativa IEC. Estas dos funciones de protección pueden actuar como protección principal mientras la otra cumple la función de respaldo y viceversa.

La protección de sobrecorriente instantánea (ANSI 50) se activa inmediatamente cuando la corriente excede un valor umbral predeterminado. Esta protección no tiene un retardo de tiempo, lo que significa que actúa casi instantáneamente para desconectar el motor o el circuito en caso de una sobrecorriente repentina. Sus características principales incluyen un tiempo de respuesta casi inmediato, sin retardo, y un umbral de disparo ajustado a un nivel de corriente específico, generalmente varias veces la corriente nominal del motor. La ejecución de esta protección implica el uso de sensores de corriente o transformadores de corriente (CTs) para monitorear la corriente, y si la corriente medida excede el umbral predefinido, el relé envía una señal para abrir el interruptor y desconectar el motor del suministro eléctrico, evitando daños mayores.

En la siguiente figura se muestra una curva de la función de sobrecorriente instantánea:

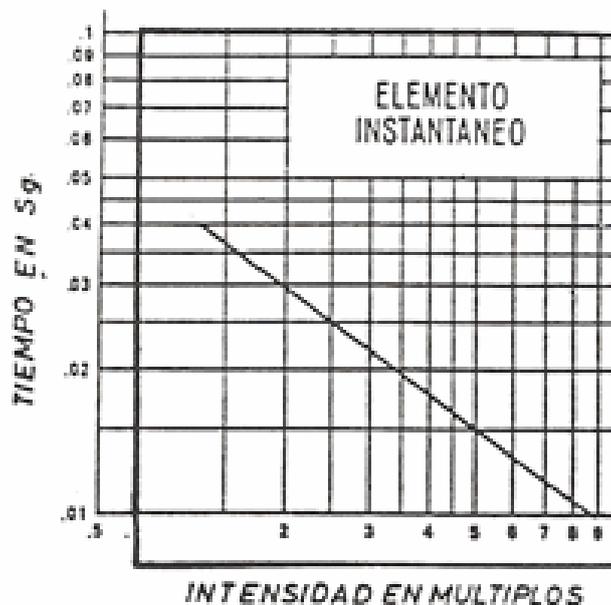


Figura 7. Función de sobrecorriente instantánea.

Fuente: Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos.

La protección de sobrecorriente temporizada o de tiempo inverso (51) tiene un retardo de tiempo inversamente proporcional a la magnitud de la corriente medida. Esto significa que cuanto mayor sea la corriente, más rápido actuará la protección. Esta característica permite proteger el motor contra sobrecargas que desarrollan calor en el motor

gradualmente, pero que aún pueden dañarlo si no se controlan. Las características de esta protección incluyen un tiempo de respuesta inversamente proporcional a la magnitud de la sobrecorriente, y una curva de disparo ajustable, lo que permite configurar el tiempo de disparo según la severidad de la sobrecorriente. La ejecución de esta protección es similar a la protección 50, utilizando sensores de corriente o transformadores de corriente para medir la corriente. El relé de tiempo inverso calcula el tiempo de disparo basado en la magnitud de la corriente medida, y si la corriente permanece por encima del umbral durante un tiempo determinado, el relé envía una señal para abrir el interruptor y desconectar el motor.

En la siguiente figura se muestran las curvas de tiempo inverso definidas por la norma IEC 60255 (relacionada con los relés de protección y sus requisitos de medida), en las que es posible ajustar la configuración del tiempo de disparo a través de un parámetro TMS (*Time Multiplier Setting*):

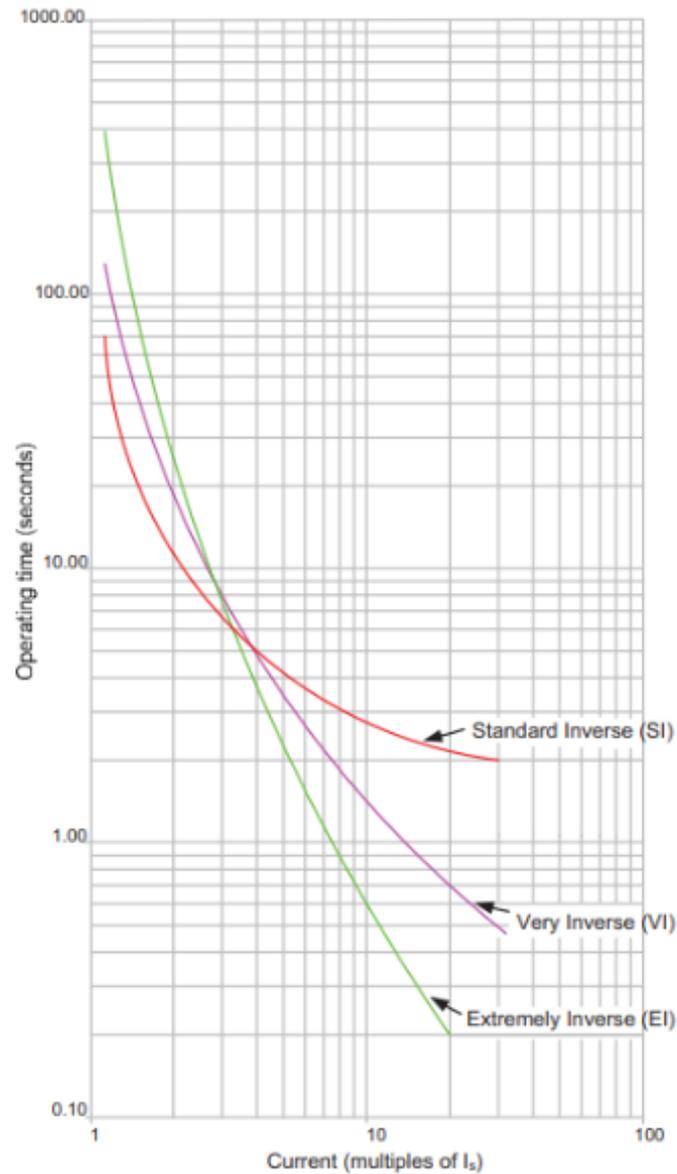


Figura 8. Curvas de tiempo inverso según IEC 60255.

Fuente: ALSTOM GRID.

Por otro lado, en la siguiente figura aparecen las curvas de tiempo inverso definidas por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), en las que se puede configurar el tiempo de disparo mediante el parámetro TD (*time dial setting*):

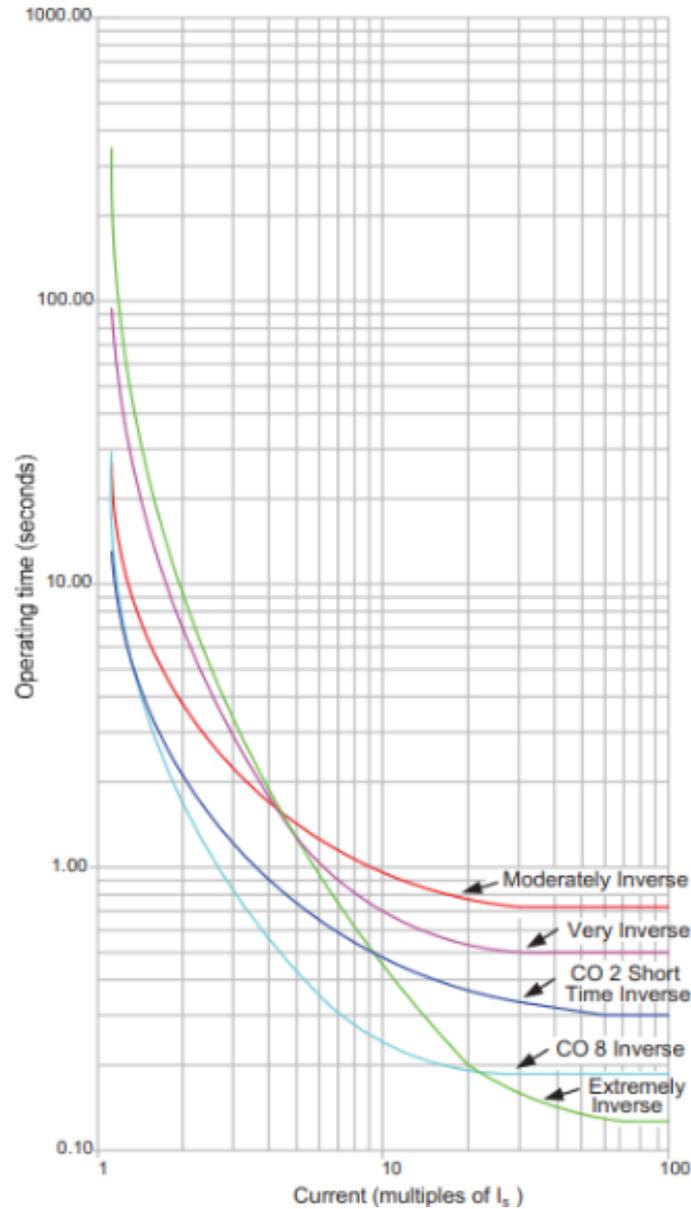


Figura 9. Curvas de tiempo inverso según el IEEE.

Fuente: ALSTOM GRID.

Ambas protecciones se utilizan comúnmente de manera complementaria para ofrecer una cobertura completa contra diversas condiciones de sobrecarga y cortocircuito. Mientras que la protección 50 proporciona una respuesta rápida a eventos de corriente extrema, la protección 51 ofrece una respuesta más adaptativa a sobrecargas prolongadas. Un ejemplo de configuración podría incluir la protección 50 con un umbral de 5-10 veces la corriente

nominal (I_n) del motor, aplicándose a cortocircuitos severos y fallos instantáneos. Por su parte, la protección 51 tendría un umbral de 1.2-1.5 veces la corriente nominal (I_n) del motor, con una curva de disparo ajustada para permitir sobrecargas temporales sin desconectar el motor inmediatamente, aplicándose a sobrecalentamiento gradual y sobrecargas continuas.

3.3.2.3. Protección de arranque prolongado del motor y rotor bloqueado (48/51LR)

La protección de arranque prolongado y bloqueo del rotor (o salto de carga en el motor) (48/51LR) [15] monitorea dos condiciones críticas: que el motor realice un arranque directo dentro de un tiempo concreto (arranque largo) y el posible bloqueo del rotor durante la operación del motor (con el rotor bloqueado la intensidad del motor alcanza valores similares a la intensidad durante el arranque).

La protección de arranque prolongado del motor ofrece protección para máquinas que presentan un riesgo de arranque difícil o “penoso”, tales como aquellas con fuerte inercia, un alto par resistente, o con carga fluctuante a partir de un régimen permanente. Ejemplos de estas máquinas incluyen bombas, ventiladores y compresores. Esta protección también es útil para evitar los arranques en vacío, situaciones en las que la carga no está incluida o cuando las máquinas están sobredimensionadas para la aplicación específica.

La protección de arranque prolongado del motor se activa cuando la corriente media del motor (I_{med}) supera el 10% del valor de ajuste de disparo (I_r). En este momento, la temporización t_{long} de protección se activa, y la protección de arranque prolongado compara el valor de la corriente media del motor (I_{med}) con el umbral de disparo (I_{long}).

Durante el arranque “penoso” o prolongado, la intensidad media del motor (I_{med}) supera el límite de disparo (I_{long}) de la protección de arranque largo del motor. La protección permanece activada mientras la corriente media por el motor (I_{med}) no caiga por debajo del umbral de disparo (I_{long}).

La curva de funcionamiento de la protección de arranque prolongado del motor puede evolucionar de dos maneras:

1. La corriente I_{med} se mantiene por encima del umbral I_{long} durante el tiempo t_{long} , lo que indica que el motor está experimentando un arranque prolongado con una carga demasiado grande. En este caso, se dispara la protección al final de la temporización.

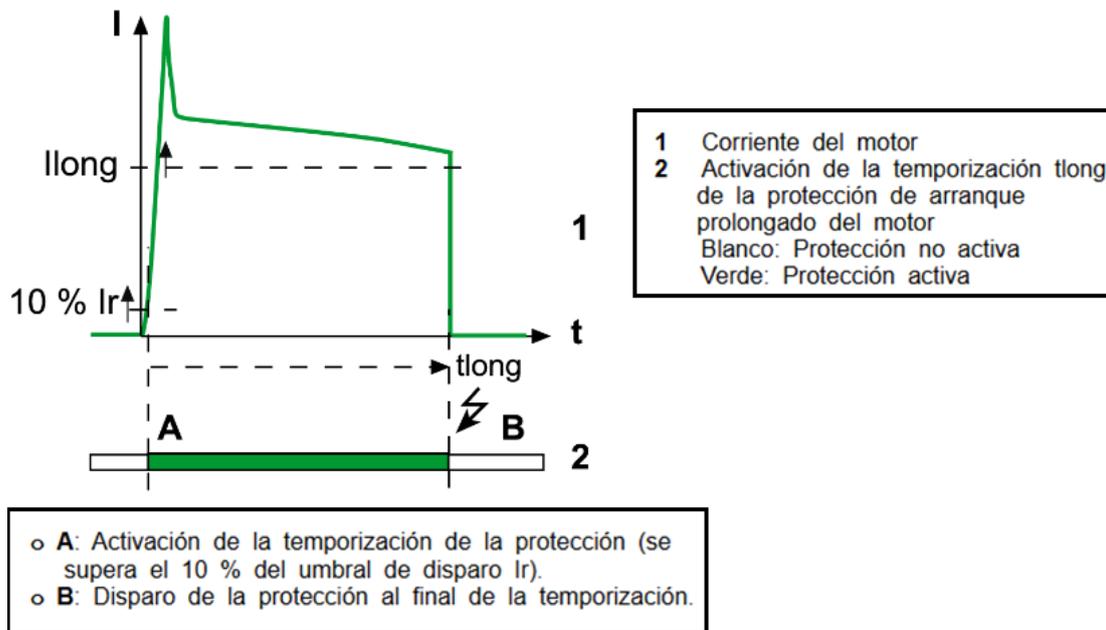


Figura 10. Curva de la protección de arranque prolongado (Evolución 1).

Fuente: Schneider-Electric.

2. La corriente I_{med} disminuye por debajo del umbral I_{long} antes de que termine el tiempo t_{long} , indicando que el motor ha completado el arranque. La protección de arranque prolongado no se dispara, permitiendo que el motor continúe su operación normal.

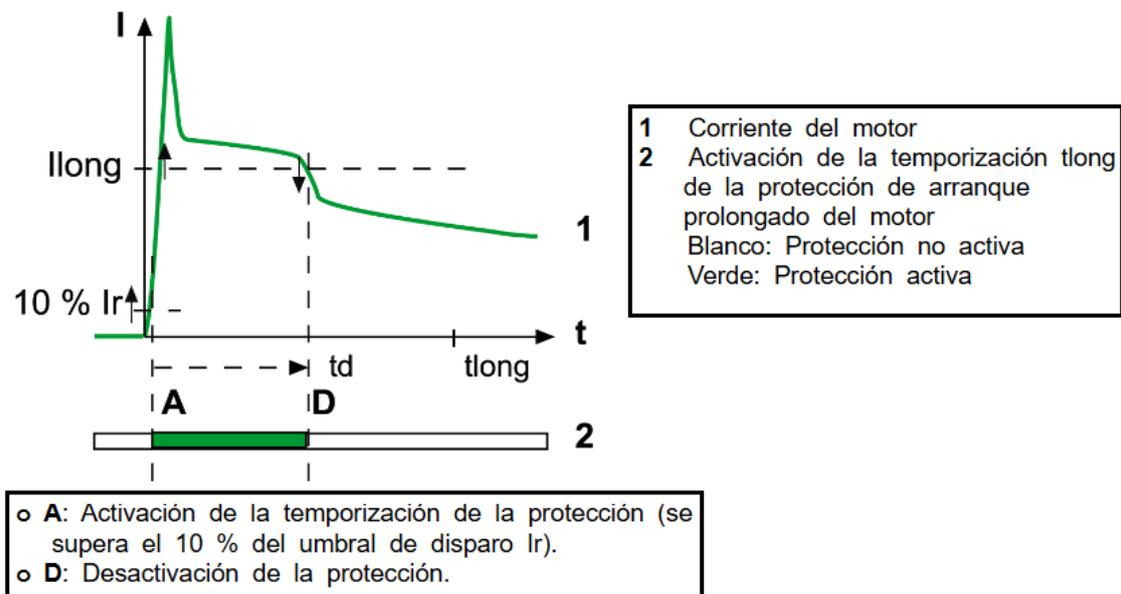


Figura 11. Curva de la protección de arranque prolongado (Evolución 2).

Fuente: Schneider-Electric.

Una vez que el motor ha arrancado y está en operación normal, la misma protección monitorea continuamente el estado del rotor. Si el rotor del motor se bloquea, la corriente consumida se asemeja a la corriente de arranque. En esta situación, de la misma forma que antes, la protección de bloqueo del rotor detecta el incremento de corriente y actúa rápidamente para desconectar el motor, evitando daños graves. El bloqueo del rotor puede ocurrir debido a obstrucciones mecánicas o fallos internos, y la respuesta rápida de la protección 48/51LR es esencial para minimizar los riesgos y evitar un sobrecalentamiento severo del motor.

3.3.2.4. Bloqueo de re arranque (66) - Limitación del número de arranques

La protección de bloqueo de re arranque (ANSI 66) [16] está diseñada para evitar que se realicen más arranques consecutivos de los permitidos por el fabricante del motor. Es importante comprender que cada arranque genera una intensidad muy alta, lo que resulta en un significativo calentamiento del rotor y el estator.

Durante cada arranque del motor, se produce un pico de intensidad elevado que, si se repite en un corto periodo, puede llevar al sobrecalentamiento de los componentes internos del motor. Este sobrecalentamiento puede dañar el aislamiento del motor, reducir la vida útil del equipo y aumentar el riesgo de fallos.

La función de la protección de bloqueo de re arranque (66) es monitorear el número de arranques en un periodo determinado y limitarlo según las especificaciones del fabricante. Al hacer esto, se asegura que el motor no se someta a tensiones térmicas excesivas debido a arranques repetitivos.

La frecuencia máxima de arranques es un dato proporcionado por el fabricante del motor y está relacionado con el diseño de las partes mecánicas y el tipo de aislante usado en la construcción del motor. Para configurar esta protección, se necesita conocer:

- El número total de arranques permitidos por hora: típicamente ronda los 5 o 6 arranques.
- El número de arranques consecutivos permitidos en frío: normalmente alrededor de 4 (en un período de 1 hora).
- El número de arranques permitidos en caliente: típicamente rondando los 2.
- El tiempo de espera entre arranques consecutivos: generalmente entre 60 y 300 segundos.

El relé detecta un arranque cuando la corriente en una de las tres fases supera el 5% de la intensidad nominal de la máquina, haciendo que la protección sea trifásica. El estado de motor caliente se considera cuando se supera el primer límite de la protección de imagen térmica, lo que demuestra una estrecha relación entre esta protección y la de imagen térmica.

Además, esta protección, al medir y contar directamente el número de arranques, no es dependiente de la inercia térmica de la máquina, a diferencia de la protección de imagen térmica. Por lo tanto, es altamente eficaz para evitar el sobrecalentamiento en situaciones desfavorables de arranques consecutivos causados por:

- El mal funcionamiento del automatismo de control.

- El accionamiento manual demasiado frecuente.
- Una serie de reconexiones con defecto.

Por ejemplo, la situación que se muestra en la siguiente figura, comenzando con el motor frío, demuestra que cada nuevo arranque tiene la misma pendiente que el anterior. Esto significa que, con cuatro arranques consecutivos, se puede superar el calentamiento equivalente a dos horas de funcionamiento nominal en régimen permanente.

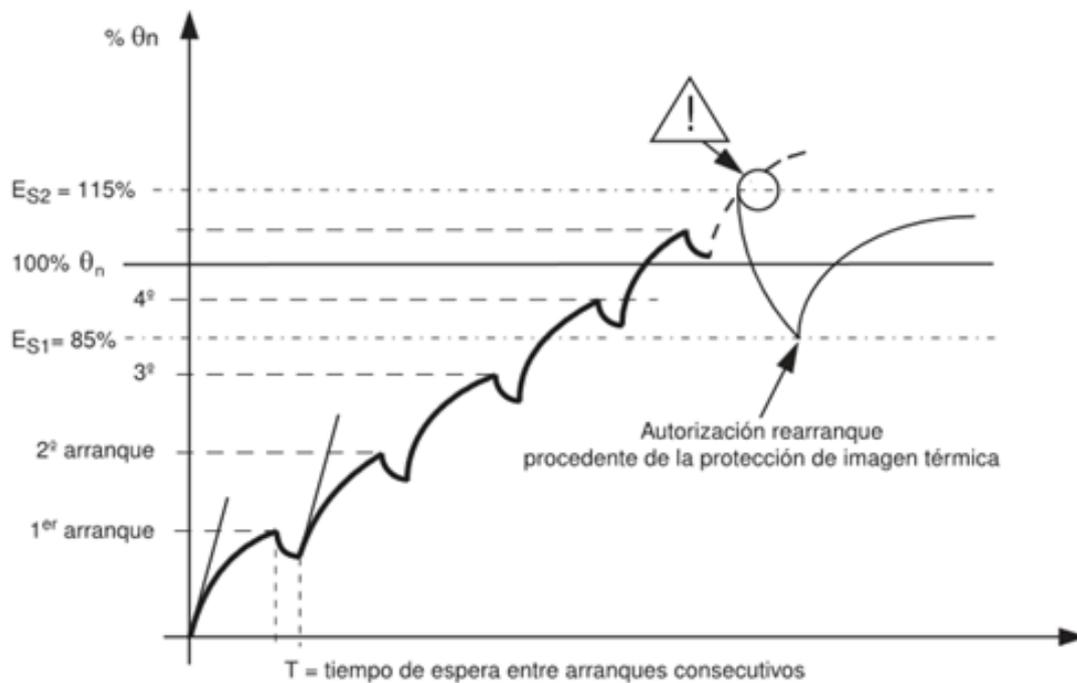


Figura 12. Relación entre la protección de número de reanques y la de imagen térmica.

Fuente: Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos

Entre los beneficios de esta protección se incluyen la prolongación de la vida útil del motor, ya que al prevenir el sobrecalentamiento excesivo se reduce el desgaste prematuro de los componentes del motor. También asegura el funcionamiento seguro al mantener el motor operando dentro de parámetros seguros y minimiza el riesgo de fallos al controlar el calentamiento provocado por arranques repetidos.

3.3.2.5. Protección de subtensión (27)

Para entender bien el funcionamiento de la protección de subtensión (ANSI 27) [17][18] es imprescindible entender antes el concepto de subtensión.

La subtensión es una condición de fallo en el sistema de energía que puede los dañar equipos, en este caso los motores de media tensión. Para proteger los motores de la operación bajo condiciones de subtensión, se emplea un sistema de protección específico.

Las principales causas de la subtensión en los motores de media tensión son variadas. Puede ocurrir debido a fallos eléctricos en el sistema, un aumento en la carga del motor, la pérdida de un transformador de entrada, fallos en la conexión a tierra de la máquina, o sobrecarga del motor. En condiciones normales de funcionamiento, la tensión del sistema se ajusta dentro de los límites nominales mediante los transformadores con tomas y equipos similares.

En la práctica, el valor de la subtensión se establece en el 85% de la tensión de funcionamiento normal. Si la tensión de operación cae por debajo de este nivel durante el tiempo configurado en el relé, el relé emite un comando de disparo para abrir el circuito. El ajuste de tiempo del relé se utiliza para evitar disparos debido a transitorios.

La condición de subtensión en el motor se detecta utilizando un transformador de medida o un transformador de tensión. Este transformador medirá la tensión entre fases del motor, y si esta tensión cae por debajo del valor nominal, generalmente un 90% para la etapa 1 y un 85% para la etapa 2, se activa el sistema de protección de subtensión. En tal caso, los relés de protección de subtensión emiten una señal de disparo.

El sistema de protección contra subtensión (ANSI 27) monitorea constantemente la tensión del sistema a proteger. Si la tensión cae por debajo de un límite aceptable, la información proporcionada por la protección de subtensión se usa para tomar las medidas adecuadas y restaurar el sistema a condiciones óptimas de operación. Los ajustes de la protección de subtensión generan una alarma y disparan el interruptor cuando es necesario. Esta protección requiere una fuente de alimentación externa de 24 V CC y también ser instalada en una unidad de control.

La protección de subtensión ANSI 27 supervisa las tres tensiones entre fases o de fase a neutro. Existen dos tipos de protección ANSI 27:

1. ANSI 27-1: En este sistema, cada tensión se monitorea de forma independiente. La protección se inicia cuando una de las tres tensiones supervisadas cae por debajo del umbral $V_{\min 1}$.

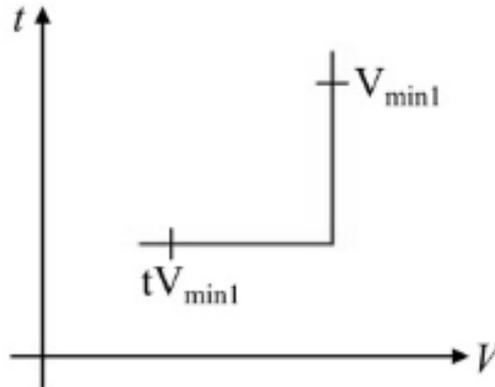


Figura 13. Característica ANSI 27-1.

Fuente: itztli.

2. ANSI 27-2: En este sistema se supervisan las tres tensiones juntas y la protección se inicia cuando las tres tensiones caen por debajo del umbral $V_{\min 2}$.

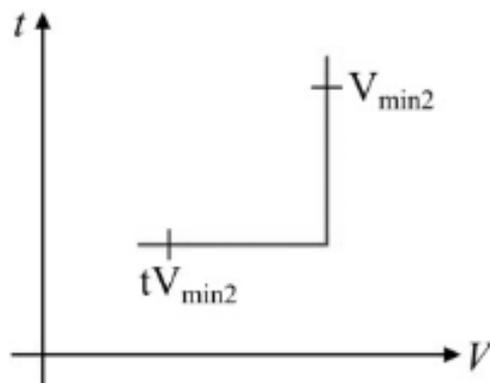


Figura 14. Característica ANSI 27-2.

Fuente: itztli.

Cada tipo de protección contra subtensión se puede desactivar, y ambas funcionan de acuerdo con un retardo de tiempo ajustable.

ANSI 27-1: el temporizador t_{Vmin1} comienza a contar tan pronto como se detecta que la tensión ha caído por debajo del umbral establecido.

ANSI 27-2: el temporizador t_{Vmin2} se activa inmediatamente al detectar que la tensión ha caído por debajo del umbral establecido.

La protección contra subtensión opera con una característica de tiempo definido. Si se supera el umbral definido la protección de subtensión se dispara o activa una alarma.

3.3.2.6. Protección de carga desequilibrada (46)

En situaciones de alimentaciones desequilibradas, fallos de una fase o cortocircuitos internos en los devanados de un motor, la protección de carga desequilibrada (ANSI 46) [19] es capaz de detectar el problema y actuar en consecuencia. Esto previene el sobrecalentamiento del rotor, ya que la componente inversa de la corriente provoca corrientes rotóricas no deseadas.

Los desequilibrios en las corrientes de las fases del motor generan sobrecalentamientos significativos y pares de frenado que pueden producir una degradación prematura de la máquina. En el arranque los efectos comentados son amplificados, por lo que durante ese momento la protección debe ser prácticamente inmediata.

A continuación, se muestra la descripción de la protección de carga desequilibrada:

Primero, se calculan los desequilibrios en la corriente para cada una de las fases, expresándolas porcentualmente respecto a la corriente media:

$$I_{med} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

$$I_{k \text{ desequilibrio}} [\%] = \frac{I_k - I_{med}}{I_{med}} \cdot 100, \text{ siendo } k = 1,2,3$$

Donde I_{med} es la intensidad media, I_1 , I_2 , I_3 son las intensidades por las tres fases e I_k *desequilibrio* es el desequilibrio en la corriente en porcentaje.

Después, como se muestra en la figura siguiente se compara el valor del desequilibrio en intensidad máxima con el umbral de la protección. En este caso, se trata de un desequilibrio positivo máximo en la segunda fase:

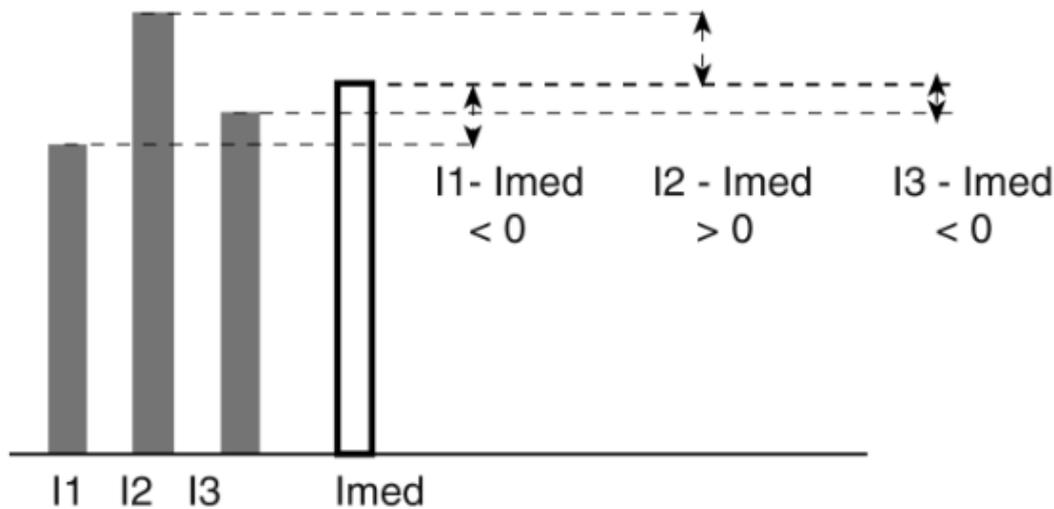


Figura 15. Desequilibrio positivo máximo en la segunda fase.

Fuente: Schneider-Electric.

Si el desequilibrio de corriente alcanza un valor superior al umbral de disparo establecido para la protección contra el desequilibrio de fases, se inicia la temporización de la protección. Esta protección no puede ser desactivada y se encuentra activa tanto durante el arranque como en el funcionamiento en régimen permanente del motor.

La protección de carga desequilibrada dispara si, durante una temporización de la intensidad umbral fija, el desequilibrio de la corriente sobrepasa el 30% del disparo umbral fija. La temporización varía según las condiciones funcionamiento del motor estipuladas por el fabricante.

A continuación, se muestran las curvas de ejemplo para el disparo de esta protección en régimen de arranque y en régimen de parada:

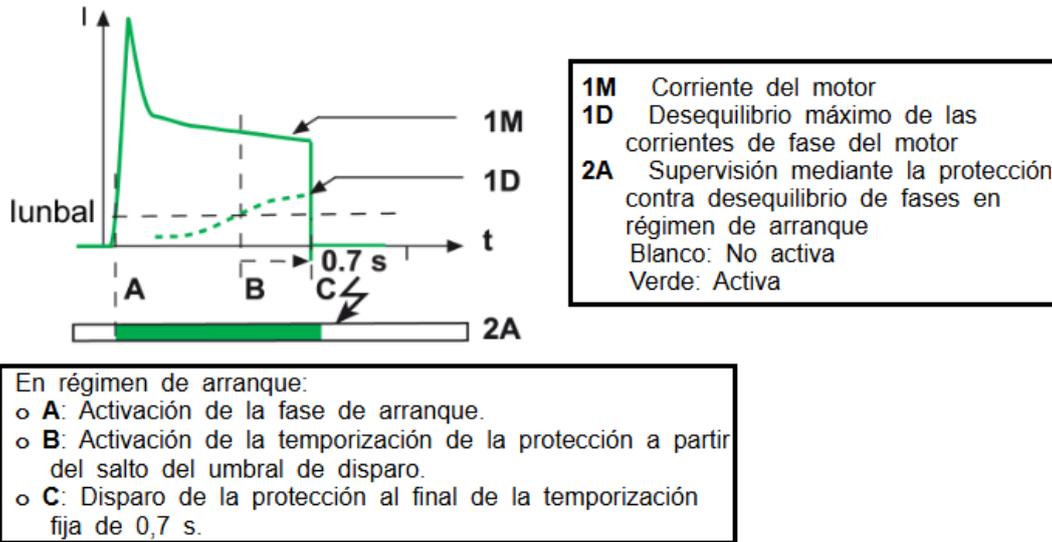


Figura 16. Ejemplo de disparo de la protección de carga desequilibrada en régimen de arranque.

Fuente: Schneider-Electric.

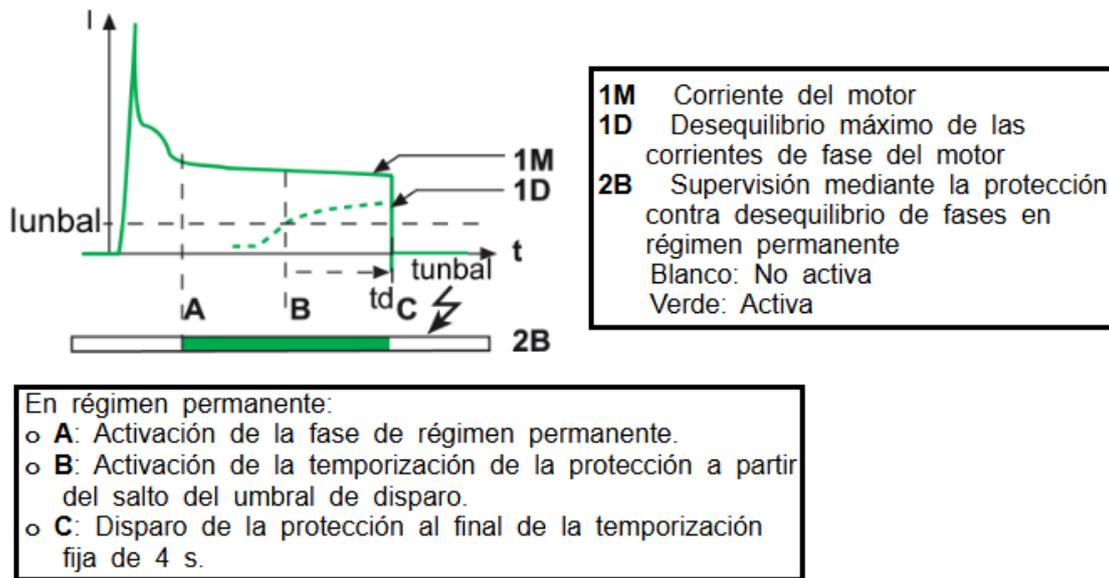


Figura 17. Ejemplo de disparo de la protección de carga desequilibrada en régimen permanente.

Fuente: Schneider-Electric.

La protección de carga desequilibrada no dispara si el desequilibrio de la intensidad se encuentra por debajo del umbral de disparo previamente al final de la temporización fija. Se muestra como ejemplo en la siguiente figura:

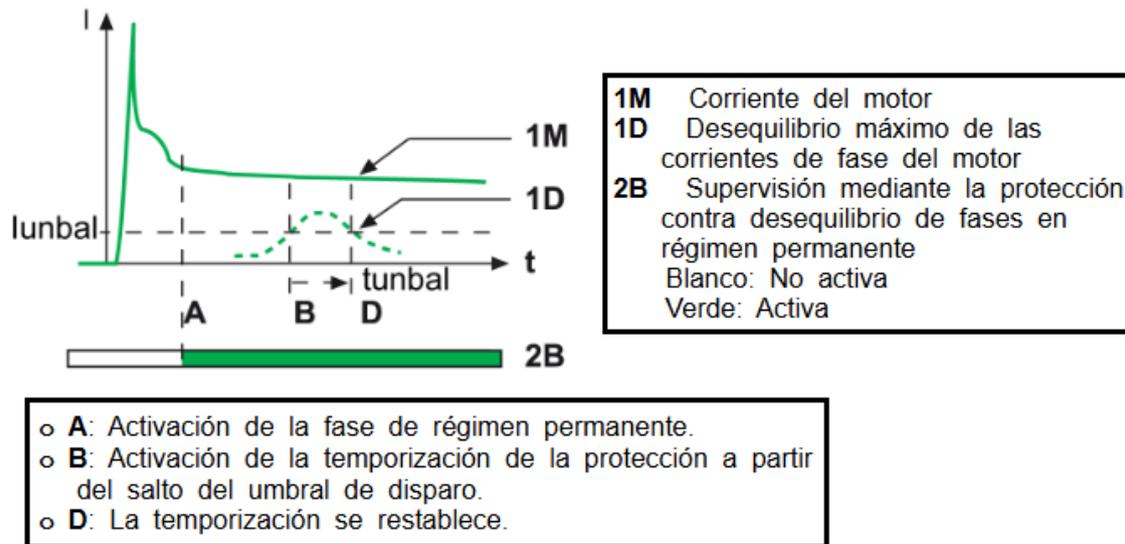


Figura 18. Ejemplo de no disparo de la protección de carga desequilibrada.

Fuente: Schneider-Electric.

3.3.2.7. Protección para detección de defectos a tierra (50N/51N)

La protección contra defecto a tierra [20][21] ofrece protección contra fallos de fase a tierra, siendo más sensible que la protección basada solamente en las corrientes de fase. Es común en sistemas TN-S, pero también se puede utilizar en otros sistemas. El sistema TN es típico en instalaciones industriales.

La protección funciona basándose en la suma de las corrientes en las fases y el neutro o en la señal enviada por un transformador de corriente externo al motor para la protección de tierra Source Ground Return (SGR). Esto implica evaluar la suma vectorial de las corrientes que fluyen por los conductores en tensión (las tres fases y el neutro).

| Configuración del interruptor automático | Corriente de defecto a tierra I_g |
|--|--------------------------------------|
| 3P | $I_g = I_1 + I_2 + I_3$ |
| 4P | $I_g = I_1 + I_2 + I_3 + I_N$ |
| 3P + ENCT | $I_g = I_1 + I_2 + I_3 + I_N$ (ENCT) |
| 3P o 4P + SGR | $I_g = I_{SGR}$ |

Tabla 3. Cálculo de la corriente de defecto a tierra según la configuración del interruptor automático.

Fuente: Schneider-Electric.

Donde ENCT es el transformador externo midiendo la corriente del neutro y SGR es un sensor instalado alrededor del neutro del transformador.

Si el funcionamiento del sistema es adecuado, es decir, si carece de fallos, la suma de estas corrientes será nula. Sin embargo, en presencia de un defecto a tierra, una parte de la corriente de defecto retorna a la fuente de alimentación a través del conductor de protección y/o tierra, alterando la suma vectorial.

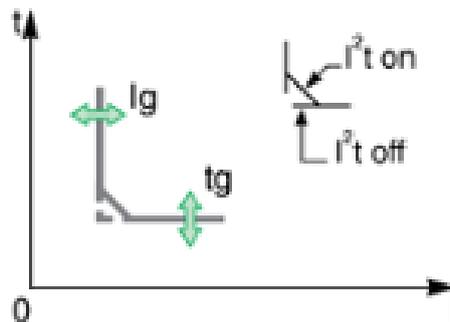


Figura 19. Umbral de la protección de defecto a tierra I_g y t_g .

Fuente: Schneider-Electric.

Si esta diferencia excede el valor de disparo ajustado I_g , el interruptor se dispara en el tiempo regulado t_g . La temporización de t_g puede ajustarse de dos formas:

- I^2t_{on} : Curva de disparo a tiempo inverso hasta $2xI_r$, donde la temporización disminuye a medida que la corriente crece. Encima del valor $2xI_r$, la curva de

disparo se convierte en una curva de tiempo definido con un tiempo de disparo constante.

- I^2t off: La curva de disparo es una curva de tiempo definido con un tiempo de disparo también constante.

3.3.2.8. Protección de sobretensión (59)

La protección de sobretensión (ANSI 59) [22] se encarga de vigilar constantemente los niveles de tensión de las fuentes de alimentación del sistema. Si se detecta que la tensión de una instalación supera los límites permitidos, esta protección suministra información para implementar las acciones correctivas que restablezcan las condiciones normales de funcionamiento del motor.

Dicha información es empleada para activar alarmas y el disparo del interruptor automático cuando sea necesario. Además, al monitorear continuamente las tensiones de fase a fase o de fase a neutro, permite tomar medidas adecuadas para proteger el motor en situaciones anómalas o críticas, como el deslastre de cargas, el cambio en la fuente de alimentación y el arranque del generador de emergencia.

La protección de sobretensión vigila constantemente las tensiones entre fases (V12, V23, V31) o las tensiones de fase a neutro (V1N, V2N, V3N).

Existen dos tipos de protección de sobretensión:

1. Código ANSI 59-1: Supervisa cada fase de manera independiente y activa la protección cuando alguna de las tres tensiones supervisadas alcanza el umbral V_{max1} .

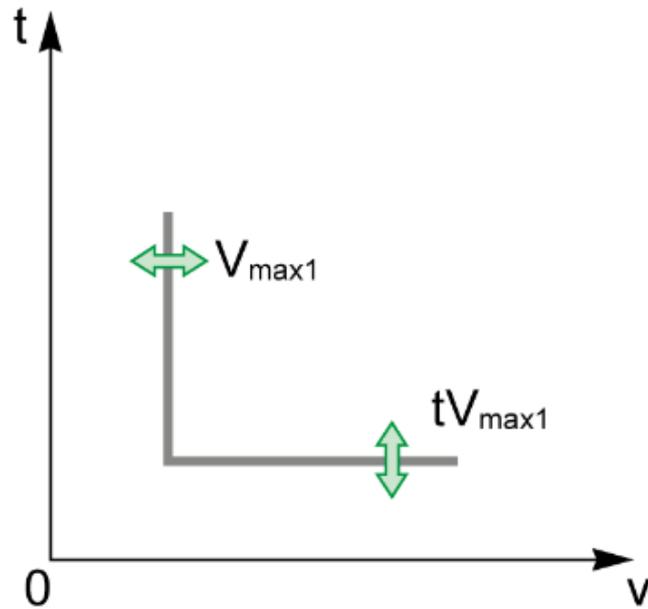


Figura 20. Característica ANSI 59-1.

Fuente: Schneider-Electric.

2. Código ANSI 59-2: Monitorea las tres fases simultáneamente y activa la protección cuando las tres tensiones supervisadas alcanzan el umbral $V_{\max 2}$.

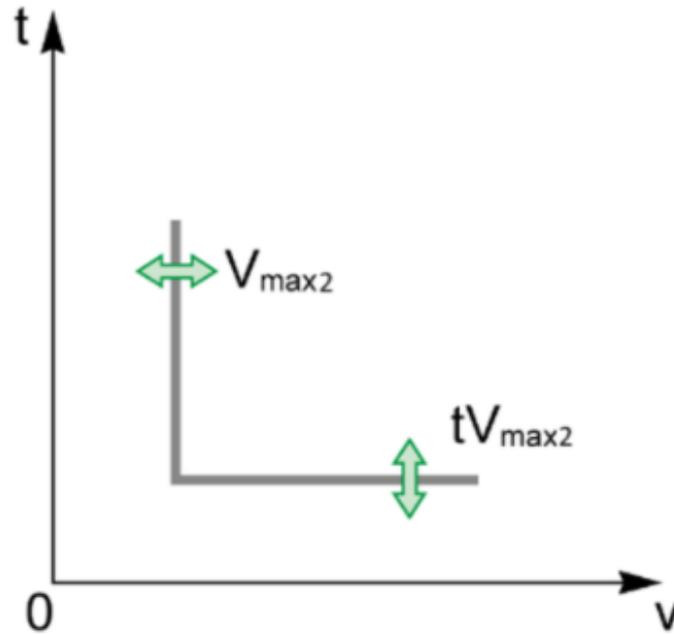


Figura 21. Característica ANSI 59-2.

Fuente: Schneider-Electric.

Ambos tipos de protección, ANSI 59-1 y ANSI 59-2, pueden ser desactivados si es necesario. Cada uno de estos tipos de protección opera con un retardo de tiempo ajustable:

ANSI 59-1: El retardo de tiempo tV_{max1} comienza cuando se alcanza el umbral de protección.

ANSI 59-2: El retardo de tiempo tV_{max2} se inicia al alcanzar el umbral de protección.

La protección de sobretensión opera utilizando una característica de tiempo definido, asegurando que las medidas se tomen de manera precisa y oportuna. Si se supera el umbral definido la protección de subtensión se dispara o activa una alarma.

3.3.2.9. Protección direccional (67/67N)

La protección contra sobrecorriente direccional [23] es crucial para detectar la dirección de las corrientes de cortocircuito, protegiendo una instalación de corrientes que pueden fluir en ambas direcciones a través del interruptor automático. Existen dos tipos de protección independiente: sobrecorriente direccional hacia adelante y sobrecorriente direccional hacia atrás. Esta protección asegura la integridad de la instalación ante cortocircuitos entre fases, entre fase y neutro, y entre fase y tierra, proporcionando una selectividad total.

El módulo digital ANSI 67 para protección direccional contra sobrecorriente se emplea tanto para generar alarmas como para disparar el interruptor automático. Su funcionamiento se basa en la medición de la corriente efectiva de las fases y del neutro, incluyendo hasta el armónico 40. Esta protección se aplica de manera independiente a cada fase y al neutro, siempre que este último esté presente.

La protección contra sobrecorriente direccional es una protección temporizada que depende de la dirección de la corriente de cortocircuito. Se dispara cuando se cumplen tres condiciones: la corriente supera el umbral establecido, ha transcurrido el tiempo de temporización asociado, y se detecta la dirección de la corriente de cortocircuito. Dicha dirección se detecta de dos formas distintas según el sentido de la conexión del interruptor automático. Si la corriente fluye desde la conexión superior a la inferior del interruptor automático, se activa la protección direccional hacia adelante. Si la corriente va desde la conexión inferior a la superior del interruptor automático, se activa la protección direccional hacia atrás.

En el caso de faltas direccionales a tierra, se toma como referencia la tensión homopolar que resulta del desplazamiento del vector del punto neutro debido a la falta a tierra.

3.3.2.10. Disparo rápido por cierre sobre una falta (SOTF)

La protección SOTF (Switch-On-To-Fault) [24] se utiliza para la eliminación rápida de defectos que se detectan inmediatamente después de cerrar manualmente un interruptor automático. Supongamos que hay un fallo en el sistema y se da una orden de cierre al interruptor; en este caso, la protección SOTF disparará el interruptor de inmediato para evitar daños.

Esta protección es especialmente útil durante el mantenimiento. Por ejemplo, si un interruptor de tierra está conectado a un disyuntor específico y se da una orden de cierre al disyuntor, la protección SOTF disparará inmediatamente. Esto se debe a que, durante el mantenimiento, puede ocurrir que una varilla de puesta a tierra permanezca conectada después de finalizar el mantenimiento. Al intentar cerrar el disyuntor con la varilla aún conectada, SOTF intervendrá y disparará el interruptor automáticamente.

La protección SOTF se activa siempre que los tres polos de un disyuntor estén abiertos durante más de un tiempo configurable, generalmente unos 110 segundos, aunque este tiempo puede ajustarse según el diseño del sistema.

SOTF se activa en dos situaciones:

- Sin orden de cierre presente: Si los tres polos del disyuntor están abiertos por más de un tiempo determinado, al recibir una orden de cierre, SOTF se habilita durante 500 ms y luego se reinicia.
- Con orden de cierre externa: Cuando el disyuntor se cierra manualmente o de forma remota, la lógica SOTF se activa de inmediato. Una vez que todos los polos están cerrados, SOTF se habilita durante 500 ms y luego se reinicia.

El relé SOTF detecta defectos utilizando dos elementos: un detector de nivel de tensión y un detector de nivel de corriente. El detector de tensión asegura la condición de polos muertos, mientras que el detector de corriente confirma la existencia de un defecto. Para que SOTF funcione, ambos detectores deben estar configurados correctamente: la tensión de fase debe estar por debajo del 75% de la tensión nominal (V_n) y la corriente de fase debe exceder el 5% de la corriente nominal (I_n). Si estas condiciones se cumplen junto

con las especificadas en los casos anteriores, SOTF detectará el fallo y emitirá una orden de disparo.

3.3.2.11. Protección contra desvíos de frecuencia (81U/81O)

Es esencial que la frecuencia en las instalaciones eléctricas se mantenga dentro de rangos operativos aceptables para evitar daños en los motores y demás equipos electrónicos sensibles, y para asegurar el correcto funcionamiento y rendimiento de todas las cargas. Por esto, es muy importante incorporar la protección contra infrafrecuencia/sobrefrecuencia (ANSI 81) [25] en motores de media tensión.

Existen dos tipos de protección independientes: la protección contra infrafrecuencia (ANSI 81U) y la protección contra sobrefrecuencia (ANSI 81O).

Estas protecciones son las encargadas de supervisar continuamente la frecuencia. Si esta se desvía de los límites aceptables, la información proporcionada por el sistema de protección puede ser utilizada para iniciar acciones correctivas que restauren las condiciones adecuadas de operación. Estas protecciones pueden generar alarmas o activar el disparo del sistema cuando sea necesario.

La protección de infrafrecuencia (ANSI 81U) se encarga de monitorear constantemente la frecuencia del sistema. Cuando la frecuencia desciende por debajo de un umbral mínimo (F_{min}), el sistema lo detecta y se activa un temporizador (t_{Fmin}). La medición de la frecuencia se realiza a partir de la tensión entre fases V_{12} . Las características principales de la protección de infrafrecuencia son las siguientes: se inhibe cuando la tensión V_{12} es inferior a 20 V CA, opera con una característica temporal definida y puede ser desactivada si es necesario. La protección se activa cuando la frecuencia desciende por debajo de F_{min} y el temporizador t_{Fmin} ha completado su cuenta regresiva. A continuación, se muestra la gráfica del funcionamiento explicado de la protección:

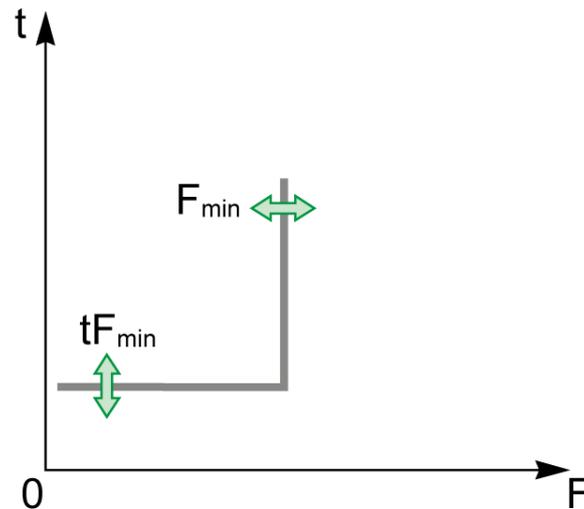


Figura 22. Funcionamiento de la protección de infrafrecuencia (ANSI 81U).

Fuente: Schneider-Electric.

La protección de sobrefrecuencia (ANSI 81O) también vigila la frecuencia del sistema. En caso de que la frecuencia supere un umbral máximo (F_{max}), el sistema detecta esta condición y se inicia un temporizador ($t_{F_{max}}$). Al igual que con la infrafrecuencia, la frecuencia se calcula a partir de la tensión entre fases V12. Las características de esta protección incluyen inhibición cuando V12 es menor de 20 V CA, funcionamiento con una característica temporal definida y la posibilidad de desactivación. La protección se activa cuando la frecuencia excede F_{max} y el temporizador $t_{F_{max}}$ ha transcurrido. A continuación, se muestra la gráfica del funcionamiento de la protección:

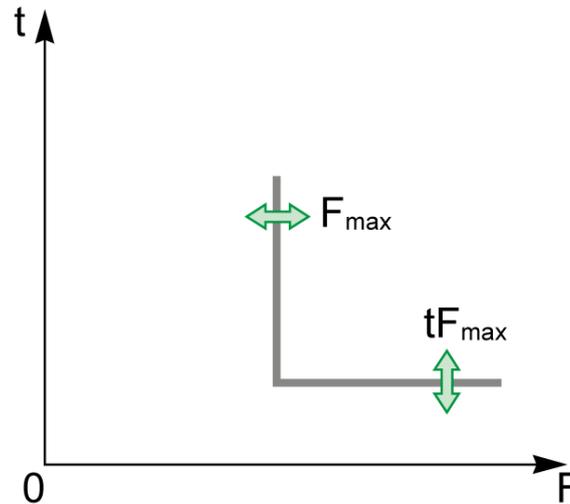


Figura 23. Funcionamiento de la protección de sobrefrecuencia (ANSI 810).

Fuente: Schneider-Electric.

3.3.2.12. Protección diferencial de motor (87M)

En motores con potencias activas superiores a 2000 kW, se recomienda utilizar la protección diferencial 87M. Esta protección responderá de manera muy rápida ante fallos internos del motor, evitando que estos duren demasiado tiempo. Como resultado, las reparaciones del motor supondrán un menor coste.

La protección diferencial de motores [26] se basa en medir el flujo de corriente en el lado del alimentador y compararlo con el flujo de corriente en el lado del neutro del motor. En condiciones normales de operación, no se detecta ninguna diferencia de corriente entre estos dos puntos. Sin embargo, cuando ocurre una falla interna, la corriente de entrada se desvía hacia el lado del neutro, y en este caso, el relé 87M se activará para desconectar el motor y prevenir daños.

Técnicamente, la protección diferencial de motor (ANSI 87M) puede ser implementada en cualquier motor de media tensión. Sin embargo, se recomienda especialmente para motores grandes o críticos, donde los daños en los devanados supondrían un alto coste o una difícil reparación.

Según el IEEE, las recomendaciones generales para aplicar la protección 87M son:

- Para motores con potencias superiores a 750 kW y sistemas de tierra aislada.
- Para motores con potencias superiores a 750 kW y sistemas con puesta a tierra, en los cuales la protección convencional de fallas a tierra no es suficiente para detectar fallas de fase a fase.
- Para motores pequeños que operan a tensiones superiores a 2400V.

El esquema de protección diferencial (87M) detecta fallos de baja magnitud dentro de los devanados del motor, algo que es difícil de identificar con otros sistemas de protección, y elimina el cortocircuito del motor rápidamente antes de que se produzcan daños internos en este.

Para este esquema, se utilizan Transformadores de Corriente (TCs) idénticos. Deben instalarse tres TCs en el lado del alimentador del motor y tres TCs en el lado del neutro. Es esencial que el relé 87M pueda comparar la corriente de entrada y la del neutro en cada fase para asegurar un disparo adecuado en caso de defecto. A continuación, se presenta el esquema de la protección diferencial de motores:

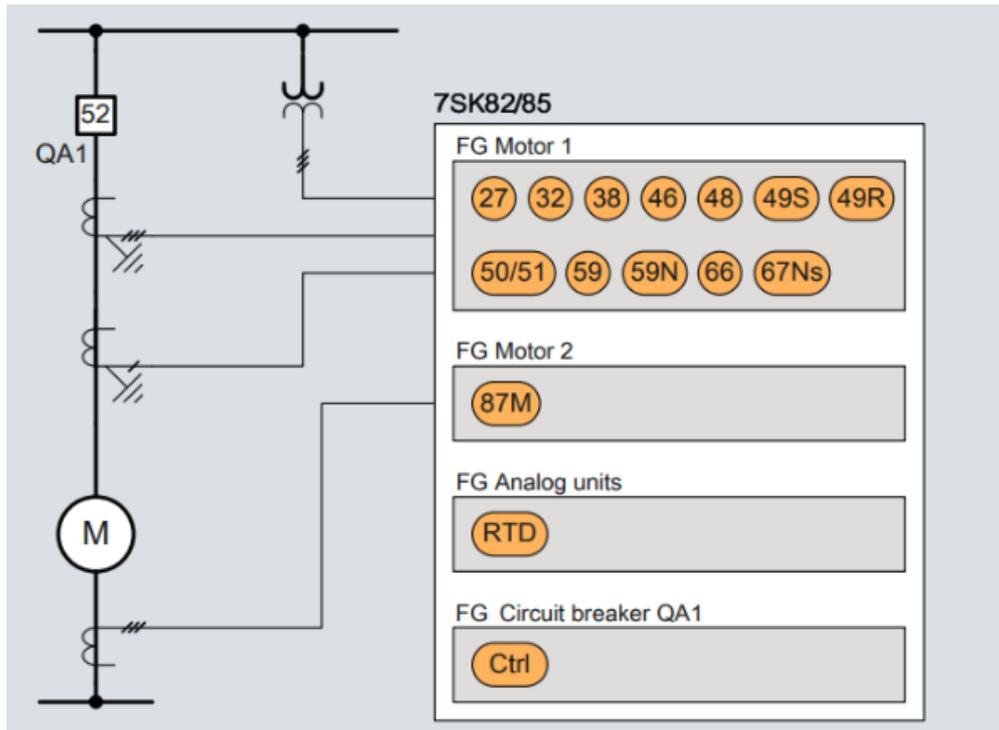


Figura 24. Protección diferencial de motor (87M) convencional.

Fuente: SIEMENS SIPROTEC 5 Catalog.

De esta manera, cuando ocurre una falta en los devanados del motor, las corrientes secundarias de los TCs tendrán magnitudes distintas y activarán el relé 87M, que desconecta el motor para evitar daños.

Aunque en ocasiones esta protección se aplica en motores conectados en configuración triángulo, este esquema es más común en motores conectados en estrella, lo cual es habitual en instalaciones de media tensión.

La protección diferencial de motor (87M) es una herramienta extremadamente poderosa, pero no siempre es necesario implementarla en todos los motores. Su uso puede incrementar significativamente los costes de inversión y complicar la instalación de los transformadores de corriente en ambos extremos del motor. No obstante, en situaciones donde la función del motor es crítica, como en bombas para sistemas de extinción de incendios o en industria petrolera, es esencial destinar los recursos necesarios para asegurar que el sistema de protección del motor sea lo más seguro y confiable posible.

Esto garantiza que las desconexiones del motor sean precisas y solo ocurran en caso de fallos internos del motor, evitando así disparos no deseados.

3.4. Variadores de velocidad

La información presentada a continuación sobre variadores de velocidad ha sido sacada de un artículo del fabricante de motores ABB [27] y de un artículo de la Compañía Levantina de Reductores [28], en los que se explica el funcionamiento de estos dispositivos.

Los variadores de velocidad o de frecuencia, también conocidos como ASD ('Adjustable-Speed Drive') o VFD ('Variable Frequency Drive'), son dispositivos que regulan la velocidad de un motor eléctrico. Estos equipos permiten un control preciso y constante de la velocidad del motor, mejorando su eficiencia y evitando que la maquinaria funcione únicamente según sus características inherentes y la energía disponible.

Un variador de velocidad opera variando la frecuencia y el voltaje de entrada del motor para controlar su velocidad y par. Por ello son dispositivos ideales para el control de motores de media tensión.

El variador de velocidad se coloca entre la fuente de alimentación y el motor. La energía aportada por la red pasa por el variador de velocidad, y este regula la energía antes de que llegue al motor, ajustando la frecuencia y la tensión según los requisitos del proceso. Este control permite reducir la potencia de salida en aplicaciones como el bombeos y ventilación, asegurando que el motor no opere a una velocidad mayor de la necesaria.

El variador de velocidad es muy importante en la búsqueda de mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de energía y, por tanto, disminuir las emisiones gases de efecto invernadero en el uso de los motores. Al ajustar la electricidad que llega al motor según la demanda real de la aplicación, estos dispositivos pueden reducir el consumo energético del motor entre un 20% y un 70%.

Además, el variador de velocidad no solo permite ajustar la velocidad para mejorar la eficiencia, sino que también incluye un componente de seguridad muy importante. Los variadores de velocidad poseen la capacidad de limitar la velocidad máxima del motor, evitando que alcance un número de revoluciones excesivo, y, por tanto, evita posibles daños al motor y la reducción de su eficiencia operativa.

4. Estudio del relé de protección SIPROTEC 7SK82 de SIEMENS

El relé de protección SIPROTEC 7SK82 de Siemens es un dispositivo avanzado diseñado para la protección, control, medición y supervisión de motores y generadores en sistemas eléctricos. Este relé multifuncional forma parte de la familia de productos SIPROTEC 5 y se destaca por su alta flexibilidad, facilidad de configuración y capacidad de integración en sistemas de automatización y control.

El relé de protección para motores SIPROTEC 7SK82 de Siemens está diseñado para ser compacto y rentable, ideal para su uso en motores de tamaño pequeño a mediano. Gracias a su flexibilidad y a la potente herramienta de ingeniería DIGSI 5, el SIPROTEC 7SK82 ofrece soluciones integrales para protección, control, automatización, supervisión y calidad de energía básica. Además, el relé puede obtener una certificación opcional conforme a EN 60079-14 o VDE 0165, Parte 1 (ATEX), permitiendo su uso en entornos con riesgo de explosión.

La principal función del SIPROTEC 7SK82 es proporcionar protección confiable y precisa a los equipos eléctricos, previniendo daños y fallos que podrían resultar en interrupciones del servicio y costes elevados de reparación y mantenimiento. Este relé implementa una amplia variedad de funciones de protección. Además, su capacidad de comunicación avanzada permite la integración en redes de control y la supervisión remota, lo que facilita la gestión eficiente de los sistemas eléctricos.

En este estudio se analizarán las diferentes protecciones implementadas por el relé SIPROTEC 7SK82 de Siemens y se evaluará cómo estas funciones contribuyen a la seguridad y estabilidad de los sistemas eléctricos y de los motores. Se abordarán aspectos técnicos y operativos del relé, su configuración, características y ventajas en la protección de motores de media tensión.

Toda la información aportada y expuesta anteriormente y a continuación relacionada con el sistema de protección SIPROTEC 7SK82 ha sido sacada de manuales, catálogos y otros

documentos ofrecidos por SIEMENS sobre el funcionamiento de este dispositivo [29][30].



Imagen 5. Protección de motor SIPROTEC 7SK82.

Fuente: Serie de equipos SIPROTEC 5 · Protección, control, automatización, supervisión y Power Quality – Básico · Catálogo – Edición 7

4.1. Características generales

El fabricante, en este caso SIEMENS, especifica las características y funciones que se resumen a continuación de la protección de motores SIPROTEC 7SK82 en su catálogo comercial de equipos de protección SIPROTEC 5, adjuntado al final de este documento en el apéndice B.

Las características generales del relé de protección de motores SIPROTEC 7SK82 son:

- La función principal del SIPROTEC 7SK82 es la protección de motores pequeños y medianos, con potencias de 100kW hasta 2MW.
- Las entradas del dispositivo son: 4 transformadores de intensidad, opción de instalar hasta 4 transformadores de tensión, 11 o 23 entradas binarias y 12 entradas RTD (Detector de Temperatura de Resistencia) opcionales.

- El relé cuenta con 9 o 16 salidas binarias.
- La flexibilidad del hardware permite diferentes configuraciones para las entradas y salidas binarias disponibles en el módulo básico 1/3. No hay posibilidad de añadir módulos de extensión 1/6. Disponible con pantalla grande o pequeña.
- El tamaño de la carcasa es de 1/3 x 19 pulgadas, es decir, 1/3 x 48,26 cm

Las ventajas del SIPROTEC 7SK82 son múltiples: ofrece una protección de motor compacta y rentable; garantiza seguridad eficiente a través de funciones avanzadas de protección; facilita el uso del equipo y software gracias a su diseño intuitivo; cumple con los estándares de ciberseguridad NERC CIP y BDEW White Paper; y asegura alta disponibilidad incluso en condiciones ambientales extremas, gracias al revestimiento de los módulos. Además, es completamente compatible con las ediciones 1, 2.0 y 2.1 de la norma IEC 61850.

Las funciones de protección del motor incluyen supervisión del tiempo de arranque, protección contra sobrecargas térmicas para el estator y rotor, bloqueo de re arranque, protección contra carga desequilibrada y protección contra salto de carga. También supervisa la temperatura del estator y los cojinetes mediante sensores de temperatura, ya sea con entradas de temperatura opcionales o con una unidad externa Thermobox. Ofrece protección tanto direccional como no direccional contra defectos a tierra del estator y sobreintensidades (cortocircuitos) con funciones adicionales. Detecta defectos a tierra en redes compensadas y aisladas mediante varias funciones avanzadas y proporciona protección contra sobretensiones y subtensiones, así como protección de arco. El relé incluye protección de potencia configurable, detección precisa de señales de intensidad y tensión hasta el 50º armónico para funciones seleccionadas y ofrece calidad de energía básica mediante la detección de asimetrías y variaciones de tensión, entre otros parámetros.

También cuenta con un editor lógico gráfico para la creación de funciones de automatización eficientes, representación unifilar en pantalla, interfaces Ethernet y opciones de comunicación redundantes. Además, incluye funciones integrales de ciberseguridad como el control de acceso basado en funciones y acceso autenticado a la

red, y permite un acceso fácil, rápido y seguro al equipo mediante un navegador web estándar.

Finalmente, el SIPROTEC 7SK82 facilita la comunicación de datos de protección a largas distancias utilizando varios medios físicos, detecta magnitudes y valores de medida para la evaluación del estado de la instalación, soporta pruebas y puesta en marcha sencillas, y ofrece una supervisión eficiente con capacidad de registro prolongada.

Se pueden revisar las funciones y las aplicaciones del dispositivo SIPROTEC 7SK82 más en detalle en el apéndice B al final de este documento, donde se adjunta la parte correspondiente de este relé del catálogo de protecciones SIPROTEC 5 de SIEMENS.

4.2. Descripción técnica del relé

A continuación, se muestra la información técnica ofrecida en los manuales de uso y funcionamiento de los equipos de protección SIPROTEC 5 7SK82/85 de SIEMENS.

Indicación de conformidad

El relé de protección SIPROTEC 7SK82 cumple con las directivas de máquinas del Consejo de la Comunidad Europea para armonizar las normativas de los Estados Miembros en materia de compatibilidad electromagnética (Norma CEM 2004/108/EEC) y de equipos eléctricos utilizados dentro de ciertos límites de tensión (Directiva de Baja Tensión 2006/95 EEC). La conformidad ha sido verificada a través de pruebas realizadas por Siemens AG, siguiendo la norma de producto EN 60255-26 para la directiva CEM y la norma EN 60255-27 para la directiva de baja tensión. Este equipo está diseñado y fabricado para aplicaciones industriales, conforme a los estándares internacionales IEC 60255 y la norma alemana VDE 0435.

Generalidades

Los equipos de protección y control de campo multifuncionales digitales de la serie SIPROTEC 5 están equipados con un avanzado microprocesador. Este microprocesador se encarga del procesamiento digital de todas las funciones del equipo, desde la adquisición de los valores de medición hasta la emisión de órdenes a los interruptores.

Entradas analógicas

Las entradas de medición convierten las corrientes y tensiones de los transformadores de medida y las ajustan a los niveles internos del equipo. Un dispositivo SIPROTEC 5 puede incluir transformadores de corriente y, según el modelo, también transformadores de tensión. Las entradas de corriente están diseñadas para detectar tanto las corrientes de fase como las de tierra. Utilizando un transformador toroidal, se puede medir la corriente de tierra con alta sensibilidad. Además, se pueden obtener mediciones muy precisas de las corrientes de fase. Las entradas de tensión capturan las tensiones necesarias para las funciones del equipo que requieren valores de corriente y tensión. Los valores analógicos se digitalizan internamente para su procesamiento en el microprocesador.

Sistema de microprocesador

Todas las funciones del equipo se procesan en el sistema del microprocesador. Estas funciones incluyen:

- Filtrado y adaptación de las magnitudes de medida
- Monitoreo continuo de las magnitudes de medida
- Supervisión de las condiciones de arranque para cada función de protección
- Control de los valores límite y tiempos transcurridos
- Gestión de señales para las funciones lógicas
- Decisiones sobre órdenes de disparo y cierre
- Almacenamiento de avisos, datos y registros de perturbaciones para análisis de fallos
- Administración del sistema operativo y sus funciones, como almacenamiento de datos, reloj de tiempo real, comunicación e interfaces
- Distribución de información al exterior

Entradas y salidas binarias

Mediante el uso de entradas y salidas binarias, el relé recibe información desde el motor u otros equipos (como, por ejemplo, órdenes de bloqueo). Se envían principalmente órdenes a las unidades de mando y avisos para la señalización remota de eventos y estados importantes.

Elementos frontales

En los dispositivos con panel de servicio integrado o independiente, los elementos ópticos (LED) y la pantalla (LCD) en el frontal proporcionan información sobre las funciones del equipo y señalan eventos, estados y valores de medida. El teclado integrado junto con la pantalla LCD permite realizar operaciones locales del equipo, permitiendo acceder a todas las informaciones del dispositivo como parámetros de ajuste, avisos de servicio y fallos, o valores de medida, y modificar los parámetros de ajuste. Además, es posible controlar los componentes de la planta desde la interfaz de usuario del equipo.

Interfaces serie

La interfaz serie ubicada en el frontal del equipo permite la comunicación con un PC mediante el programa de servicio DIGSI. Este software permite realizar operaciones de servicio para todas las funciones del equipo. Otras interfaces situadas en la parte posterior permiten la ejecución de diversos protocolos de comunicación.

Alimentación

Las distintas unidades funcionales del equipo reciben energía a través de una unidad de alimentación interna. Las interrupciones breves en la tensión de alimentación, que pueden ocurrir durante cortocircuitos en el sistema de alimentación auxiliar, generalmente se compensan con un condensador acumulador.

4.3. Funciones de protección del relé para motores de media tensión

Las funciones de protección del relé SIPROTEC 5 7SK82 está descrito detalladamente en el manual de protección SIPROTEC 5, Protección de motor, Manual C53000-G5078-C024-3, Edición 6.2015 [], del que se ha sacado la siguiente información. En este apartado se describirán brevemente las protecciones que incorporan los relés de protección SIPROTEC 7SK82, que aseguran la integridad y eficiencia operativa de los motores de media tensión que protegen.

El principio de funcionamiento de estas protecciones ha sido descrito en el apartado 3.3. *Medidas de protección en motores de media tensión* de este mismo documento. Por ello, a continuación, simplemente se realiza un breve resumen de dichas protecciones.

Protección de sobreintensidad, fases (ANSI 50/51)

Esta función protege contra corrientes excesivas en las fases del motor, detectando situaciones anormales que podrían dañar los devanados y otros componentes. La protección de sobreintensidad de fases es esencial para prevenir daños por sobrecargas o cortocircuitos en el motor. El manual proporciona instrucciones detalladas sobre cómo configurar los umbrales de corriente y los tiempos de activación para asegurar una respuesta rápida y efectiva.

Protección de sobreintensidad, tierra (ANSI 50N/51/N)

Esta función protege el motor contra corrientes excesivas que pueden dañar el sistema. Detecta sobreintensidades en el circuito a tierra, desconectando el motor en caso de una corriente excesiva para prevenir daños graves. El manual proporciona una guía completa sobre los parámetros configurables y los umbrales de activación de esta protección.

Protección direccional de sobreintensidad, fases, tierra (ANSI 67/67N)

La protección direccional de sobreintensidad no solo detecta corrientes excesivas, sino que también considera la dirección de la corriente. Esto es crucial para sistemas con configuraciones complejas de alimentación, donde la dirección de la falla puede afectar significativamente la respuesta de protección. Esta función es configurable para las fases y tierra, y el manual incluye detalles específicos sobre los ajustes de ángulo de disparo y los parámetros direccionales.

Protección diferencial del motor (ANSI 87M)

Esta protección detecta diferencias de corriente entre los terminales de entrada y salida del motor, identificando fallas internas como cortocircuitos. Es altamente sensible y rápida, minimizando el tiempo de exposición del motor a condiciones dañinas. En el manual se explican los cálculos de corriente diferencial y los ajustes necesarios para asegurar una operación precisa y confiable.

Supervisión del tiempo de arranque del motor (ANSI 48)

Esta función monitorea el tiempo de arranque del motor, asegurándose de que no exceda los límites seguros. Arranques prolongados pueden indicar problemas mecánicos o eléctricos que podrían dañar el motor. El manual describe cómo configurar los tiempos de arranque y los umbrales de alerta, así como las acciones correctivas automáticas.

Bloqueo de re arranque del motor (ANSI 66)

El bloqueo de re arranque evita que el motor se reinicie automáticamente después de una desconexión debido a una falla. Esto permite realizar inspecciones y reparaciones antes de volver a energizar el motor, asegurando una operación segura. Los detalles sobre los tiempos de bloqueo y las condiciones de reinicio se encuentran especificados en el manual.

Protección de sobrecarga térmica (ANSI 49)

Esta protección calcula el modelo térmico del motor, basándose en las corrientes medidas, para prevenir sobrecalentamientos que puedan dañar el aislamiento y los componentes del motor. El manual proporciona una guía exhaustiva sobre la configuración del modelo térmico y los umbrales de activación para diferentes condiciones de carga.

Protección de carga desequilibrada (ANSI 46)

Detecta y protege contra desequilibrios de carga que pueden causar sobrecalentamiento y daños al motor. Este desequilibrio puede ser debido a fallas en la alimentación o en el propio motor. En el manual se detalla cómo ajustar los parámetros para detectar desequilibrios y las respuestas automáticas configurables.

Protección de sobretensión (ANSI 59)

Protege el motor contra voltajes excesivos que pueden dañar el aislamiento y los componentes eléctricos. El manual incluye información sobre los umbrales de sobretensión y los tiempos de respuesta para asegurar una protección eficaz.

Protección de subtensión (ANSI 27)

Esta función protege el motor contra voltajes inferiores a los niveles operativos normales, que pueden causar un funcionamiento ineficiente y daños mecánicos. El manual

proporciona instrucciones detalladas para configurar los umbrales de subtensión y las acciones correctivas.

Protección de sobrefrecuencia (ANSI 81U)

Protege el motor contra frecuencias operativas superiores a las especificadas, que pueden causar un rendimiento ineficiente y daños. En el manual se detallan los ajustes de frecuencia y los mecanismos de protección

Protección de subfrecuencia (ANSI 81O)

De manera similar, la protección de subfrecuencia asegura que el motor no opere a frecuencias menores a las especificadas, evitando daños y asegurando un rendimiento óptimo. Los parámetros configurables se explican detalladamente en el manual.

Protección por disparo rápido por cierre sobre una falta (SOTF)

Monitorea el correcto funcionamiento del interruptor asociado al motor, asegurando que cualquier fallo en el interruptor no comprometa la protección del motor. El manual describe los parámetros de supervisión y las respuestas automáticas ante fallos detectados.

Supervisión de temperatura

Utiliza sensores de temperatura para monitorear el estado térmico del motor y sus componentes críticos. Esto previene daños por sobrecalentamiento al activar alarmas o desconectar el motor cuando se superan los umbrales de temperatura seguros. En el manual se explica cómo integrar y configurar los sensores de temperatura, así como los parámetros de monitoreo y las acciones correctivas.

Para más detalles sobre cada función de protección, incluyendo parámetros específicos, configuraciones y ejemplos prácticos, se recomienda consultar el capítulo 6 “*Funciones de Protección y Automatización*” del Manual C53000-G5078-C024-3, Edición 6.2015 del relé de protección SIPROTEC 5 7SK82.

4.4. Ejemplo de aplicación

En este subapartado se muestra un ejemplo de aplicación y conexión del relé SIPROTEC 7SK82 en un sistema eléctrico convencional de un motor de media potencia.

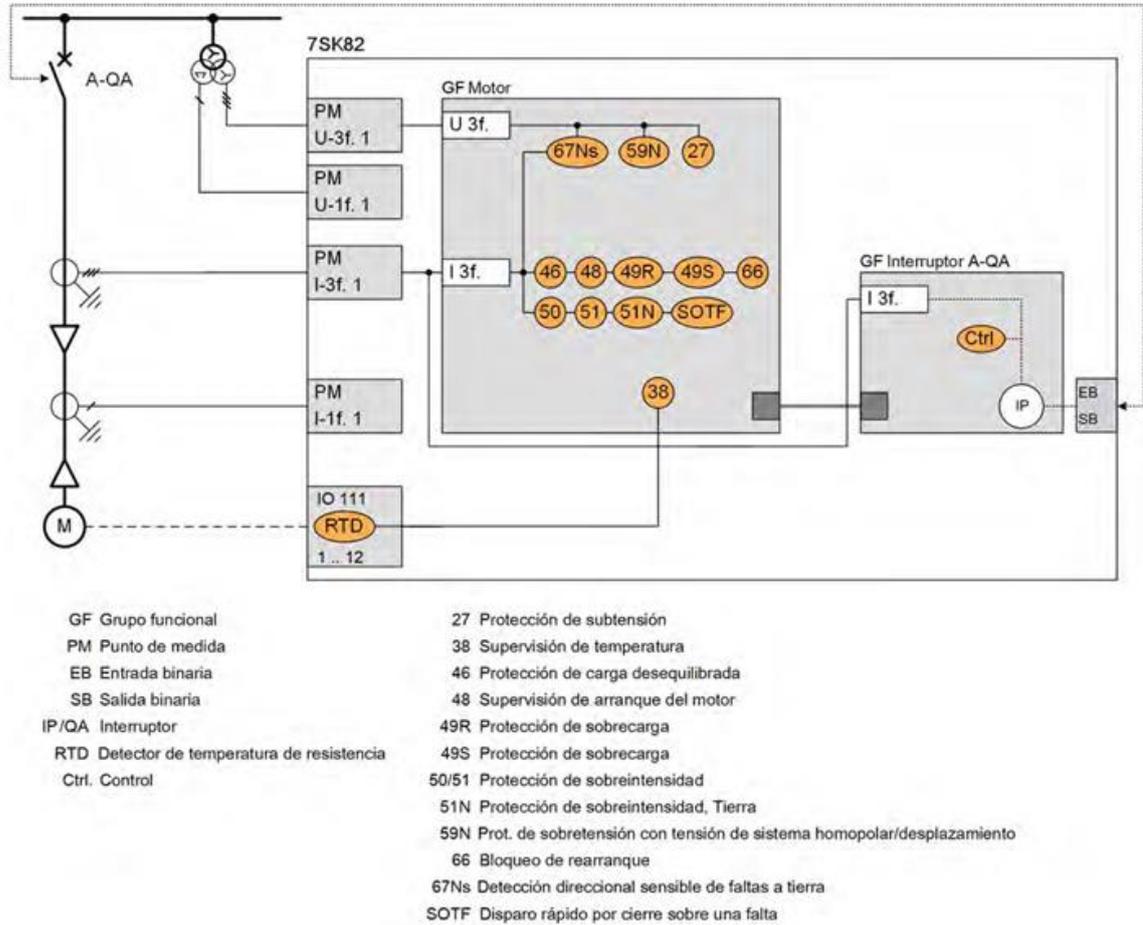


Figura 25. Protección de un motor de media potencia.

Fuente: Serie de equipos SIPROTEC 5 · Protección, control, automatización, supervisión y Power Quality – Básico · Catálogo – Edición 7

El diagrama superior muestra las conexiones del relé SIPROTEC 7SK82 en un sistema eléctrico típico de un motor de media potencia. A continuación, se describen las principales conexiones y su función.

Los Puntos de Medida (PM) se utilizan para la conexión de las señales de tensión y corriente del sistema. En el diagrama, se observan puntos de medida para:

- U-3f.1: Tensión trifásica.
- U-1f.1: Tensión monofásica.
- I-3f.1: Corriente trifásica.
- I-1f.1: Corriente monofásica.

Las entradas y salidas binarias (EB y SB) se utilizan para la comunicación de señales de control y estado entre el relé y otros componentes del sistema, como el interruptor automático.

Los Detectores de Temperatura de Resistencia (RTD) están conectados a la unidad IO 111, se encargan de supervisar la temperatura de los motores y generadores para evitar sobrecalentamientos.

El control (Ctrl) se refiere a las conexiones de control que permiten la configuración y operación del relé.

Por último, se muestran las protecciones que incorpora el relé conectadas cada una al parámetro que supervisan. Debajo del esquema aparece el código ANSI de cada protección y su correspondiente especificación.

5. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo de fin de grado se ha abordado con profundidad el estudio de las protecciones eléctricas necesarias para motores de media tensión, un tema de gran relevancia en el ámbito industrial. La protección de estos motores es crucial para garantizar no solo la eficiencia y la continuidad operativa, sino también la seguridad de las instalaciones y del personal. A continuación, se expone una revisión detallada de las principales conclusiones derivadas del estudio, destacando la importancia del trabajo y su contribución al campo de las protecciones eléctricas.

Los motores de media tensión son elementos vitales en gran diversidad de aplicaciones industriales, desde aplicaciones en industria pesada como cementeras y azucareras hasta en compresión o bombeos de grandes cantidades de masas. Su capacidad para manejar grandes cargas y operar en entornos exigentes los convierte en elementos indispensables y fundamentales en muchas operaciones críticas. Sin embargo, la complejidad del funcionamiento de estos motores y la gran magnitud de la energía que manejan también los hacen vulnerables a un gran abanico de fallos que pueden tener consecuencias muy graves, tanto en términos de seguridad como de costes de operación y mantenimiento.

La protección de los motores de media tensión es esencial para prevenir fallos catastróficos que podrían resultar en daños significativos al equipo, interrupciones en la operación de la máquina y del sistema al que esta pertenece y, por último, riesgos para la seguridad del personal. Diseñar e instalar las protecciones adecuadas en estos motores permite detectar y despejar la mayoría de los fallos al poco tiempo de aparecer estos, evitando que se desarrollen y que acaben desencadenando problemas de mayor gravedad. En este trabajo se ha destacado la importancia de implementar una estrategia de protección integral que abarque tanto protecciones internas del motor como las externas a este, debiendo adaptarlas a las características específicas de cada motor y su entorno de operación.

También, se ha comprobado que los relés de protección juegan un papel fundamental en la supervisión de los parámetros de operación de los motores de media tensión, en la detección de fallos, en la activación de medidas preventivas y en el aislamiento de los

equipos defectuosos. Es por ello por lo que la elección de un relé de protección adecuado es sumamente importante para la implementación de una estrategia de protección eficaz y segura, ya que según la aplicación industrial que lleve a cabo el motor, se priorizará la elección de determinadas funciones de protección frente a otras.

Además, la tecnología de los relés ha evolucionado significativamente con el tiempo. Los relés electromecánicos tradicionales, que, aunque todavía algunos están en uso, están siendo complementados y, en muchos casos, reemplazados por relés modernos y sistemas de protección digital. Estos avances en estos dispositivos de protección ofrecen una mayor precisión, mejor monitorización, más velocidad de respuesta, y una multitud de capacidades de diagnóstico avanzadas. Además, los relés digitales y modernos son más resistentes a las vibraciones y al desgaste mecánico, lo que aumenta significativamente la fiabilidad del sistema, además de reducir los costes de operación y mantenimiento de los equipos.

A pesar de los grandes avances tecnológicos en estos dispositivos de protección, los relés se enfrentan a varios desafíos, como la necesidad de mantenerse actualizados con las normas y estándares en continua evolución, y la integración con sistemas de automatización cada vez más complejos. Además, la ciberseguridad se ha convertido en una preocupación importante, especialmente para los relés que se utilizan en aplicaciones industriales críticas. Es fundamental que los fabricantes y los usuarios de los relés de protección continúen invirtiendo en investigación y desarrollo para abordar estos desafíos y mejorar la fiabilidad y seguridad de los sistemas de protección.

Por otro lado, los variadores de velocidad son dispositivos fundamentales en el control de motores eléctricos, proporcionando una regulación precisa de la velocidad y el torque. Permiten mejorar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de los motores al evitar arranques bruscos y adaptarse a las necesidades específicas de cada aplicación. Además, contribuyen a reducir los costes de operación y el desgaste mecánico de los motores. Su integración con sistemas de automatización facilita un control más flexible y optimizado de procesos industriales. Por tanto, los variadores de velocidad son esenciales para mejorar la eficiencia, rendimiento y durabilidad de los motores eléctricos en diversas aplicaciones.

En este estudio de las protecciones eléctricas de motores de media tensión se eligió analizar el equipo de protección SIPROTEC 7SK82 de SIEMENS, un dispositivo avanzado y versátil diseñado específicamente para la protección de motores, entre ellos los de media tensión. A lo largo del trabajo, se ha detallado cómo cada función de protección contribuye a la detección temprana de fallos y a la implementación de respuestas rápidas y efectivas. El relé SIPROTEC 7SK82 se ha seleccionado por su versatilidad, capacidad de integración y avanzada tecnología de protección. Este trabajo ha proporcionado un análisis de la información comercial y manuales de uso, ofreciendo un ejemplo de aplicación para su implementación en sistemas de media tensión.

El relé de protección SIPROTEC 7SK82 de SIEMENS se presenta como una solución avanzada y altamente versátil para la protección de motores de media tensión. A lo largo de su análisis, se han podido identificar varias conclusiones clave que destacan su importancia y beneficios en aplicaciones industriales. Este relé está diseñado específicamente para proporcionar una protección integral en motores de media tensión, abordando una gran variedad de condiciones de fallos y defectos que pueden comprometer la integridad y el rendimiento de los motores. Las funciones de protección que incluye el relé aseguran que cualquier anomalía o fallo sea detectado y mitigado de manera óptima, minimizando el riesgo de daños irreversibles y tiempos de inactividad que suponen un coste demasiado elevado.

El SIPROTEC 7SK82 incorpora tecnologías avanzadas que permiten una protección precisa y rápida. Por ejemplo, la protección diferencial del motor ofrece una respuesta rápida ante fallos internos, lo que es vital para evitar daños de gran extensión en la máquina. La supervisión del tiempo de arranque y el bloqueo de re arranque son esenciales para proteger el motor contra condiciones de arranque adversas y ciclos de operación inadecuados. La protección de sobrecarga térmica, junto con la supervisión de temperatura, garantiza que el motor opere dentro de los límites de temperatura seguros, previniendo daños por sobrecalentamiento.

Este relé cumple con normas internacionales como la IEC y la Conformidad Europea, lo que asegura su compatibilidad con otros equipos y sistemas de protección en sistemas eléctricos modernos. La conformidad con estas normativas garantiza que el SIPROTEC

7SK82 no solo ofrece protección efectiva sino también interoperabilidad y estandarización, facilitando su integración en infraestructuras eléctricas existentes.

Además, el SIPROTEC 7SK82 incluye capacidades avanzadas de diagnóstico y análisis que permiten a los ingenieros y técnicos monitorizar el estado del motor y del sistema de protección en tiempo real. Estas herramientas facilitan la identificación temprana de problemas potenciales y la planificación proactiva del mantenimiento, lo que contribuye a mejorar la fiabilidad y la disponibilidad del motor.

Por todo esto, se puede afirmar que la implementación de relés como el SIPROTEC 7SK82 en la protección de motores de media tensión contribuye significativamente a la sostenibilidad y a la eficiencia operativa de las instalaciones industriales en las que es instalado. Al proporcionar una protección precisa y avanzada y minimizar el tiempo de inactividad, se optimiza el uso de recursos y se reduce notablemente el consumo de energía asociado con fallos y reparaciones frecuentes.

El campo de las protecciones eléctricas de motores de media tensión está en constante evolución, y está altamente impulsado por los avances tecnológicos y los nuevos desafíos industriales. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para futuras investigaciones y campos de mejora, con el objetivo de seguir avanzando en la seguridad y eficiencia de los sistemas eléctricos a los que pertenecen los motores de media tensión.

Primero, es importante nombrar las tecnologías más punteras y que más prometen de estos últimos años. La implementación de inteligencia artificial y *machine learning* en sistemas de protección puede ofrecer capacidades avanzadas de diagnóstico y predicción que no se han visto nunca. Estos sistemas pueden analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, identificar patrones y, lo más prometedor, predecir posibles fallos antes de que ocurran. Es por esto que la integración de inteligencia artificial y *machine learning* en los sistemas de protección puede mejorar significativamente la precisión, la eficiencia y la productividad de las protecciones y, por tanto, de los motores de media tensión en las que se han instalado, permitiendo un mantenimiento impecable y reduciendo los tiempos de inactividad de las máquinas.

También, la comunicación efectiva entre los dispositivos de protección y los sistemas de control es esencial para una respuesta rápida y coordinada ante fallos y anomalías en la operación de los motores. Por ello, es indispensable el desarrollo de protocolos de comunicación avanzados que permitan una mayor interoperabilidad y velocidad de transmisión de datos entre los distintos equipos. Tecnologías como el Internet de las Cosas o *Internet of Things* (IoT), que permite la conexión de todos los equipos a través de la nube, pueden facilitar la implementación de redes de comunicación más robustas y eficientes.

Es importante también el desarrollo de nuevos materiales de aislamiento que puedan soportar condiciones extremas de temperatura y tensión para mejorar la durabilidad y confiabilidad de los motores de media tensión. Por ello, es vital la investigación en materiales avanzados que ofrezcan una mayor resistencia al desgaste y a los factores ambientales, reduciendo la necesidad de mantenimiento y aumentando la vida útil de los motores.

Por otro lado, el desarrollo de protecciones adaptativas, que pueden ajustar sus parámetros automáticamente según las condiciones operativas y ambientales del motor, representan una evolución significativa en las tecnologías de protección. La investigación y el desarrollo de estos sistemas de protección adaptativos permiten ofrecer una protección más robusta y personalizada para cada motor en particular. Estos sistemas pueden mejorar la resiliencia y eficiencia operativa, adaptándose dinámicamente a las condiciones cambiantes.

La estandarización de las protecciones eléctricas a nivel internacional es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en todas las instalaciones industriales. Se debe seguir avanzando en la creación de normativas globales que unifiquen los criterios de diseño, instalación y operación de los sistemas de protección. Esto no solo facilitará la globalización de las prácticas industriales, sino que también garantizará un nivel uniforme de seguridad y eficiencia en todo el mundo. También, la capacitación y formación continua de ingenieros y técnicos es esencial para mantenerse al día con los últimos avances en tecnología de protección. Por ello, es fundamental promocionar e invertir en programas de formación técnica que aborden las nuevas tecnologías y métodos de

protección, asegurando que el personal esté totalmente preparado para manejar los sistemas más avanzados y mantener los motores operando de manera óptima.

Por último, el mantenimiento predictivo, basado en el análisis de datos y la predicción de fallos, puede mejorar significativamente la eficiencia y la vida útil de los motores de media tensión. Gracias a la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo con el uso de sensores avanzados y análisis de datos en tiempo real, se pueden identificar y resolver problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos críticos y pongan en peligro la integridad del sistema y de los equipos.

En este trabajo de fin de grado se ha proporcionado una comprensión profunda y detallada de las protecciones eléctricas necesarias para los motores de media tensión, destacando la importancia de una estrategia de protección integral y bien diseñada. A través del análisis de las protecciones internas y externas, se ha demostrado cómo las tecnologías avanzadas de protección pueden mejorar significativamente la seguridad y eficiencia operativa de los motores. Las recomendaciones propuestas buscan no solo mejorar las prácticas actuales, sino también abrir nuevas vías para la investigación y la innovación en el campo de las protecciones eléctricas. La implementación de estas mejoras y avances garantizará que los motores de media tensión sigan operando de manera segura y eficiente, contribuyendo al desarrollo sostenible de las industrias que dependen de ellos.

6. Bibliografía

- [1] Pedro Jr. (29 de diciembre de 2023). *¿Qué es un motor de media tensión y cuáles son sus beneficios?* AJJ Ingeniería. <https://www.ajjingenieria.com/blog/ge-wolong-54/que-es-un-motor-de-media-tension-y-cuales-son-sus-beneficios-77>
- [2] CursosOnlineWeb.com. Equipo de redacción profesional. (abril de 2019). Partes de un motor eléctrico. Escrito por: Red educativa. <https://cursosonlineweb.com/partes-de-un-motor-electrico.html>
- WEG. <https://www.weg.net/catalog/weg/ES/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motores-de-Inducci%C3%B3n---Media-Alta-Tensi%C3%B3n/Motores-de-Inducci%C3%B3n-Trif%C3%A1sico/Motores-IEC/W50---TEFC-%28Hierro-Gris%29/W50-1000-kW-4P-450J-H-3F-6600-V-60-Hz-IC411---TEFC---B3R%28E%29/p/13008283>
- [3] Stephen J. Chapman. (1991). *Electric Machinery Fundamentals*. BAE Systems Australia.
- [4] Hughes A, Dury B. (2019). *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. Elsevier.
- [5] Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada RITA UD. (7 de mayo de 2018). *Motores Media Tensión*. YouTube. <https://youtu.be/TuvmntYnE18>
- [6] Zapata, F. (11 de enero de 2021). *Motor Jaula de Ardilla*. Lifeder. <https://www.lifeder.com/motor-jaula-de-ardilla/>
- [7] Electricity – Magnetism. *Motores de Inducción con Rotor Bobinado*. <https://www.electricity-magnetism.org/es/motores-de-induccion-con-rotor-bobinado/>
- TodoMotores. *Diferencia entre Motor de Inducción y Motor Síncrono*. <https://todomotores.com.ar/diferencia-entre-motor-induccion-sincrono>
- [8] WEG México. (26 de julio de 2022). WEGbinar 14 Selección y Aplicación de Motores de Media Tensión. YouTube. <https://youtu.be/Ltxoem90kM>.

- [9] ABB. (diciembre de 2006). *Manual para motores y generadores de inducción*. ABB. <https://library.e.abb.com/public/c2fdb13de9af1137c1257b130056ead1/3BFP%20000%20055%20R0106%20revE%20SPANISH.pdf>
- [10] Rockwell Automation. (1998). *Fundamentos de Protección de motores*. https://www.infopl.net/files/documentacion/motion_control/infopl_net_icg_wp001_es_p.pdf
- [11] ELAN S.A. *Grados de Protección IP y Clase de Aislación*. ELANELECTRIC. <https://www.elanelectric.cl/wp-content/uploads/2019/04/Grados-IP-y-Clase-de-Aislacion.pdf>
- [12] Jiménez, M. (2 de febrero de 2015). *Motores de Media Tensión: Protecciones eléctricas necesarias*. TECGINIA. <https://eng.tecginia.com/index.php/es/blog-es/tecnica/288-motores-de-media-tension-protecciones-electricas-necesarias>
- [13] Schneider Electric. *Protección contra sobrecarga o térmica (ANSI 49)*. https://product-help.schneider-electric.com/ED/TeSys/GV5-GV6_User_Guide/EDMS/DOCA0161ES/DOCA0161xx/Protection-functions/Protection-functions-5.htm
- [14] Granero, A. (15 de mayo de 2016). *Protección de máxima corriente de fases (ANSI 50 Y ANSI 51)*. Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos. <https://imseingenieria.blogspot.com/2016/05/proteccion-de-maxima-corriente-de-fases.html>
- Leiry. (24 de agosto de 2023). *Protección de Sobrecorriente (50/51)*. LeiryChinchilla. <https://www.leirychinchilla.com/proteccion-sobrecorriente/>
- [15] Schneider Electric. *Protección de arranque prolongado del motor (ANSI 48/51LR)*. https://product-help.schneider-electric.com/ED/TeSys/GV4_User_Guide/EDMS/DOCA0118ES/DOCA0118xx/ProtectionFunctions/ProtectionFunctions-15.htm#:~:text=La%20protecci%C3%B3n%20de%20arranque%20prolongado%20del%20motor%20se,Device%20app.%20oCon%20el%20software%20EcoStruxure%20Power%20Commission

- [16] Granero, A. (29 de mayo de 2017). *Protección de motores contra arranques demasiado frecuentes (ANSI 66)*. Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos. <https://imseingenieria.blogspot.com/2017/05/proteccion-de-motores-contrarranques.html#:~:text=Protecci%C3%B3n%20de%20motores%20contra%20arranques%20demasiado%20frecuentes%20%28ANSI,y%20din%C3%A1micos%20que%20provoca%20el%20fen%C3%B3meno%20del%20arranque>
- [17] Itzli. *Principio de funcionamiento de protección contra bajo voltaje 27*. <https://www.itzli.es/principio-de-funcionamiento-de-proteccion-contrabajo-voltaje-27/>
- [18] Schneider Electric. *Protección de infratensión (código ANSI 27)*. https://product-help.schneider-electric.com/ED/MTZ/Micrologic_X_User_Guide/EDMS/DOCA0102ES/DOCA0102xx/ProtectionFunctions/ProtectionFunctions-15.htm
- [19] Schneider Electric. *Protección contra desequilibrio de fases (ANSI 46)*. https://product-help.schneider-electric.com/ED/TeSys/GV5-GV6_User_Guide/EDMS/DOCA0161ES/DOCA0161xx/Protection-functions/Protection-functions-8.htm#:~:text=La%20protecci%C3%B3n%20contra%20desequilibrio%20de%20fases%20se%20activa,sobrepasa%20el%2030%20%25%20del%20disparo%20tunbal%20fijo
- [20] Schneider Electric. *Protección de defecto a tierra (G o ANSI 50N-TD/51N)*. [https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\\$/TPC_GroundFault_b5effd44_es_T001598192](https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/$/TPC_GroundFault_b5effd44_es_T001598192)
- [21] Grupo Elektra. *Protección defecto a tierra: G*. <https://www.grupoelektra.es/blog/wp-content/uploads/2020/04/Protecci%C3%B3n-defecto-a-tierra-G.pdf>
- [22] Schneider Electric. *Protección de sobretensión (código ANSI 59)*. [https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\\$/TPC_GroundFault_b5effd44_es_T001598192](https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/$/TPC_GroundFault_b5effd44_es_T001598192)

x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\$/TPC_Under_OverfrequencyProtection_b5effd44_es_T001598488

[23] Granero, A. (15 de mayo de 2016). *Protecciones direccionales (ANSI 67 y ANSI 67 N)*. Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos. <https://imseingenieria.blogspot.com/2020/04/protecciones-direccionales-ansi-67-y.html>

[24] UNIGAL. *¿Qué es la protección SOTF?* <https://unigal.mx/que-es-la-proteccion-sotf/>

[25] Schneider Electric. *Protección contra infrafrecuencia/sobrefrecuencia (ANSI 81)*. [https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc/a0102-](https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc/a0102-micrologic-)

x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\$/TPC_Under_OverfrequencyProtection_b5effd44_es_T001598488

[26] Leiry. (16 de octubre de 2023). *Protección Diferencial de Motor. (ANSI 87M)*. LeiryChinchilla. <https://www.leiryinchilla.com/proteccion-diferencial-motor-ansi-87m/>

[27] ABB. *Qué es un variador de frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas*. <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>

[28] Compañía Levantina de Reductores. *Variadores de velocidad: todo lo que necesitas saber sobre las cajas reductoras*. CLR <https://blog.clr.es/es/variadores-de-velocidad/#:~:text=Un%20variador%20de%20velocidad%20es%20el%20equipo%20utilizado,pueden%20ser%3A%20el%20el%C3%A9ctricos%20hidr%C3%A1ulicos%200mec%C3%A1nicos%20o%20incluso%20electr%C3%B3nicos.>

[29] SIEMENS. (2020). *Serie de equipos SIPROTEC 5 · Protección, control, automatización, supervisión y Power Quality – Básico · Catálogo – Edición 7*.

[30] SIEMENS. (2015). *SIPROTEC 5, Protección de motor, Manual C53000-G5078-C024-3, Edición 6*.

Anexos

A. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) implica identificar y analizar cómo un proyecto contribuye a alcanzar los objetivos globales establecidos por las Naciones Unidas para afrontar desafíos mundiales y promover un desarrollo sostenible en áreas como la pobreza, la salud, la educación, la energía y el medio ambiente, entre otros. En este proyecto, que se centra en las protecciones eléctricas de motores de media tensión, se pueden encontrar varios objetivos de desarrollo sostenible que se alinean directamente con esta iniciativa. Entre estos objetivos destacan:

ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante.

El proyecto busca mejorar la eficiencia energética de los motores de media tensión, lo que contribuye a un uso más sostenible de la energía disponible. La introducción y el diseño de protecciones eléctricas eficaces en estas máquinas no solo reducen el riesgo de fallos, sino que también optimizan el rendimiento energético. Al asegurar que los motores operen de manera más eficiente, se disminuye la necesidad de energía adicional, lo que a su vez reduce la emisión de gases de efecto invernadero y promueve el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles.

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.

El desarrollo de soluciones avanzadas para la protección eléctrica de motores de media tensión representa una contribución significativa a la innovación en el ámbito industrial. Estas mejoras tecnológicas facilitan la creación de infraestructuras eléctricas más robustas y eficientes. La implementación de tecnologías innovadoras y la modernización de sistemas industriales no solo mejoran la productividad y la seguridad, sino que también fomentan prácticas industriales sostenibles. Al fortalecer las infraestructuras eléctricas, el

proyecto apoya el crecimiento económico sostenible y el desarrollo de industrias resilientes.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables.

La implementación de medidas de mantenimiento predictivo y monitorización en los motores de media tensión ayuda a reducir el desperdicio y fomenta un enfoque más responsable hacia la producción y el consumo de energía. Estas prácticas permiten identificar problemas potenciales antes de que causen fallos importantes, lo que reduce los tiempos de inactividad y el uso innecesario de recursos. Al optimizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los motores, el proyecto contribuye a una gestión más sostenible de los recursos y a una reducción de la huella ambiental de las operaciones industriales.

Este proyecto promueve el avance tecnológico y la mejora continua en las protecciones eléctricas de motores de media tensión, contribuyendo directamente al desarrollo sostenible en el ámbito industrial. La mejora de la eficiencia energética, la innovación en la protección eléctrica y la gestión responsable de los recursos son componentes clave que alinean este proyecto con los ODS. Al implementar estas mejoras, se fortalece la capacidad industrial para operar de manera más eficiente y sostenible, apoyando así los objetivos globales de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas.

Además, al reducir el riesgo de fallos y optimizar el rendimiento energético, se contribuye a la estabilidad y fiabilidad de las infraestructuras energéticas, lo que es crucial para el desarrollo económico y social sostenible. La adopción de tecnologías avanzadas y prácticas responsables no solo beneficia a la industria, sino que también tiene un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente, demostrando cómo la ingeniería y la innovación son el punto de partida hacia un futuro más sostenible.

B. Catálogo SIPROTEC 7SK82

SIEMENS



SIPROTEC 5

Protección, control, automatización,
supervisión y Power Quality – Básico_

Catálogo • Edición 7

Descripción

La protección de motor SIPROTEC 7SK82 está diseñada de manera compacta y rentable para la aplicación de motores pequeños hasta medianos. Debido a su flexibilidad y a la herramienta de ingeniería DIGSI 5 de gran rendimiento, el equipo SIPROTEC 7SK82 puede ofrecer soluciones para protección, control, automatización, supervisión y Power Quality – Básico.

El equipo SIPROTEC 7SK82 está disponible opcionalmente con una certificación según EN 60079-14 ó VDE 0165, Parte 1 (ATEX) para motores en un entorno expuesto a las explosiones.

| | |
|---------------------------|--|
| Función principal | Protección del motor para motores pequeños y medianos (100 KW hasta 2 MW) |
| Entradas y salidas | 4 transformadores de intensidad, 4 transformador de tensión (opcional), 11 ó 23 entradas binarias, 9 ó 16 salidas binarias, 12 entradas RTD (opcional) |
| Flexibilidad del Hardware | Diversas estructuras cuantitativas de Hardware para las entradas y salidas binarias disponibles dentro del módulo básico 1/3, no se puede añadir ningún módulo de extensión 1/6, disponibles con pantalla pequeña y grande |
| Ancho de la carcasa | 1/3 × 19 pulgadas |

Beneficios

- Protección de motor compacta y rentable
- Seguridad por funciones de protección eficientes
- Servicio preciso y simple de los equipos y del software gracias a un diseño fácil de usar
- Cyber Security según NERC CIP y requerimientos BDEW Whitepaper
- Disponibilidad muy alta también bajo condiciones ambientales extremas mediante revestimiento en serie de los módulos
- Compatibilidad completa entre IEC 61850 edición 1, 2.0 y 2.1

Funciones

Con DIGSI 5, todas las funciones pueden ser configuradas y combinadas libremente de acuerdo con los requerimientos y el volumen funcional pedido.

- Funciones de protección del motor: Supervisión del tiempo de arranque, protección de sobrecarga térmica para estator y rotor, bloqueo de re arranque, protección de carga desequilibrada, protección salto de carga
- Supervisión de la temperatura del estator y de los cojinetes mediante sensores de temperatura con entradas de temperatura opcionales o con unidad Thermobox externa
- Protección de faltas a tierra (direccional, no direccional) para la detección de faltas a tierra del estator
- Protección de sobreintensidad direccional y no direccional (protección contra cortocircuito) con funciones adicionales
- Detección de faltas a tierra de cualquier género en redes compensadas y aisladas mediante las funciones siguientes: 3I0>, U0>, transitorios de falta a tierra, cos φ, sinφ, dir. Detección de faltas a tierra intermitentes, detección de armónicos y medida de la admitancia



[SIP5_GD_W3, 2, --, --]

Figura 2.12/2 Protección de motor SIPROTEC 7SK82

- Detección de falta a tierra mediante el procedimiento de localización de impulsos
- Protección de sobretensión y de subtensión
- Protección de arco
- Protección de potencia configurable como protección de potencia activa o reactiva
- Detección de señales de intensidad y tensión hasta el 50avo armónico con alta precisión para funciones de protección seleccionadas (por ejemplo, protección de sobrecarga térmica) y valores de medida
- PQ – Básico: Asimetría de tensión; variaciones de tensión: Sobretensión, pérdida de tensión, interrupción; TDD, THD y armónicos
- Control, verificación de sincronismo y protección contra fallo de maniobra
- Editor lógico gráfico para crear funciones de automatización eficientes en el equipo
- Representación unifilar (Single Line) en la pantalla pequeña y grande
- Interface Ethernet RJ45 eléctrico, integrado de manera fija para DIGSI 5 e IEC 61850 (Informe y GOOSE)
- 2 módulos de comunicación opcionales e insertables, aptos para diferentes protocolos redundantes (IEC 61850, IEC 60870-5-103, IEC 60870-5-104, Modbus TCP, DNP3 serie y TCP, PROFINET IO)
- Transmisión de datos fiable mediante los protocolos redundantes PRP y HSR
- Certificación para la aplicación en un entorno expuesto a las explosiones (EN 60079-14 ó VDE 0165, Parte 1, ATEX)
- Funcionalidad Cyber Security integral como el control de acceso basado en funciones (RBAC), el almacenamiento de eventos relevantes para la seguridad, el Firmware firmado o el acceso autenticado a la red IEEE 802.1X

Equipos SIPROTEC 5 y campos de aplicación

Protección de motor – SIPROTEC 7SK82

- Acceso fácil, rápido y seguro al equipo mediante un navegador Web estándar para visualizar todas las informaciones y datos de diagnóstico como también diagramas vectoriales, diagramas unifilares y páginas de pantalla del equipo
- Comunicación de datos de protección serie segura también para largas distancias y con todos los medios físicos disponibles (conductor de fibra óptica, conexión de dos hilos y redes de comunicación)
- Detección de magnitudes de medida de servicio y valores de medida de funciones de protección para la evaluación del estado de la instalación, para el soporte de la puesta en marcha y para el despeje de perturbaciones
- Entradas RTD integradas (opcional) para la supervisión térmica del motor
- Unidad de medida de fasor (PMU) para valores de medida de sincrofasor y protocolo IEEE C37.118
- Perturbografía eficiente (buffer para un tiempo de registro máx. de 80 s con 8 kHz ó 320 s con 2 kHz)
- Funciones de soporte para pruebas simples y puesta en marcha.

Aplicaciones

- Protección contra sobrecarga térmica del estator por sobreintensidad, problemas de refrigeración o polución
- Protección contra sobrecarga térmica del rotor durante la fase de arranque, por arranques muy frecuentes, por arranques prolongados o por bloqueo del rotor
- Supervisión de la asimetría de tensión o de fallo de fase
- Supervisión del estado térmico y de las temperaturas de los cojinetes mediante medida de temperatura
- Detección de accionamientos en vacío, por ejemplo, bombas y compresores
- Detección de faltas a tierra en el motor
- Protección contra cortocircuitos del motor
- Protección contra inestabilidad por subtensión
- Detección y registro de datos de calidad de la red en una red de media tensión y en una red subordinada de baja tensión

Plantillas de aplicación

Para las aplicaciones estándar se dispone en DIGSI de plantillas de aplicación („Templates“). Éstas contienen configuraciones y preajustes básicos.

Las siguientes plantillas de aplicación están disponibles:

- Medida de intensidad
 - Protección de sobrecarga térmica para el estator y rotor

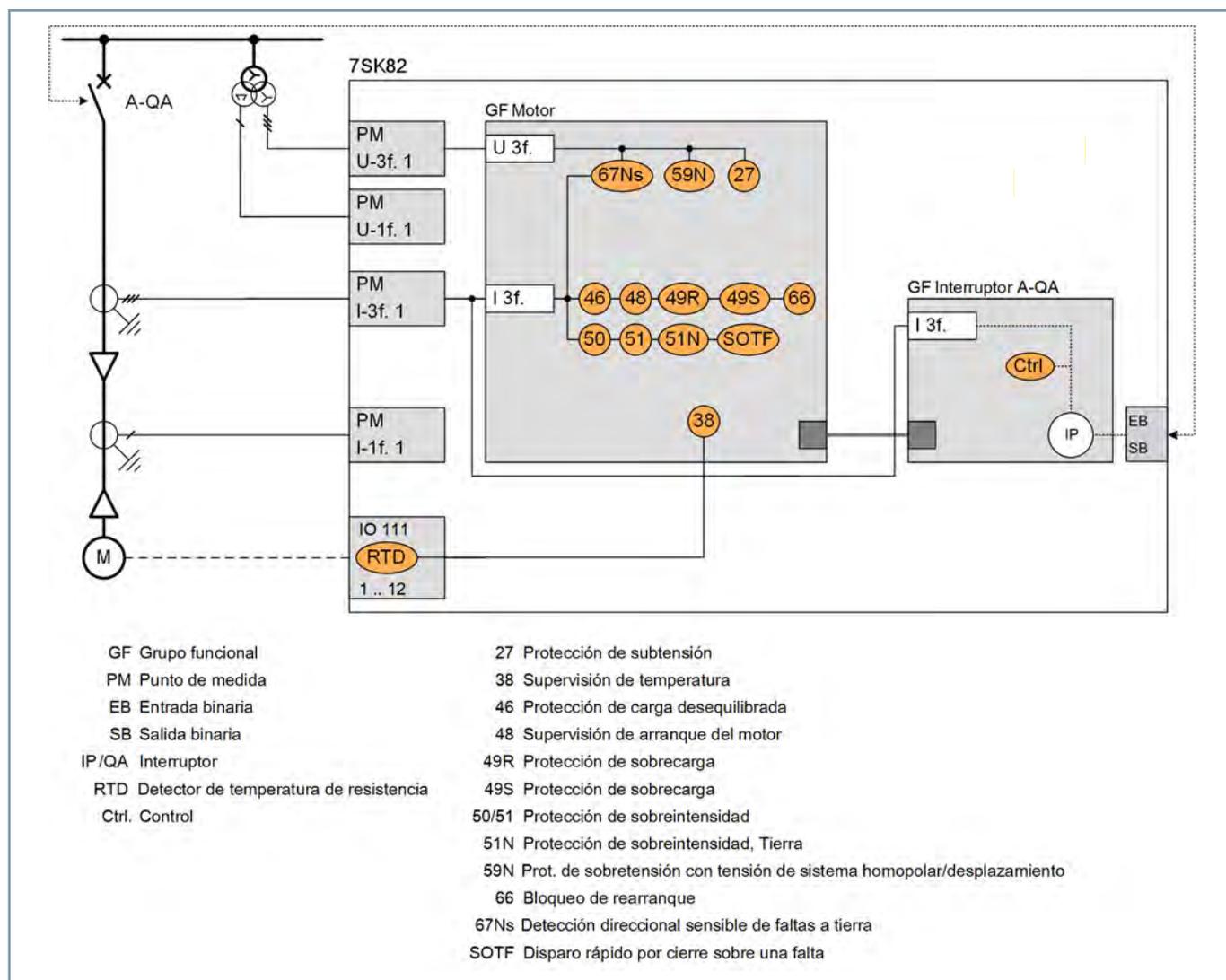
- Supervisión del tiempo de arranque
- Bloqueo de re arranque
- Protección de carga desequilibrada (térmica)
- Supervisión de temperatura
- Protección de salto de carga
- Protección de sobreintensidad (no direccional) para fases y tierra
- Detección de intensidad inrush de cierre del transformador
- Medida de intensidad y de tensión
 - Protección de sobrecarga térmica para el estator y rotor
 - Supervisión del tiempo de arranque
 - Bloqueo de re arranque
 - Protección de carga desequilibrada (térmica)
 - Supervisión de temperatura
 - Protección de salto de carga
 - Protección de sobreintensidad (no direccional) para fases y tierra
 - Detección de intensidad inrush de cierre del transformador
 - Detección sensible direccional de faltas a tierra para redes compensadas y aisladas como también para la detección de faltas a tierra del estator
 - Protección de sobretensión con sistema homopolar U0
 - Protección de subtensión con sistema de secuencia positiva U1
 - Supervisión de fallo de la tensión de medida

Ejemplo de aplicación

SIPROTEC 7SK82 – Protección de un motor de media potencia

Con las funciones de protección del motor y la protección de sobreintensidad del equipo SIPROTEC 7SK82 se protege un motor asíncrono de media potencia (hasta aprox. 2 MW) contra sobrecargas térmicas y mecánicas y contra cortocircuitos. La detección sensible direccional de faltas a tierra y la protección de sobretensión con tensión homopolar U0 reconocen las faltas a tierra del estator en el motor. Mediante las entradas de medida de temperatura integradas se puede detectar y supervisar el estado térmico del motor y también las temperaturas de los cojinetes. Los sensores de temperatura (por ejemplo, PT100) se conectan directamente a las entradas de medida RTD integradas.

Figura 2.12/3 muestra la capacidad funcional y la configuración básica de un equipo SIPROTEC 7SK82 para esta aplicación. Como base sirve la plantilla de aplicación „Medida de intensidad y de tensión“. Además, el equipo debe estar equipado con un módulo insertable para la comunicación con la unidad Thermobox.



[dw_motor-protection-7SK82, 2, es_ES]

Figura 2.12/3 Protección de un motor de media potencia

Equipos SIPROTEC 5 y campos de aplicación

Protección de motor – SIPROTEC 7SK82

| ANSI | Función | Abrev. | Disponible | Plantillas de aplicación (Templates) | |
|-------------|---|-----------------------|------------|--------------------------------------|---|
| | | | | 1 | 2 |
| | Funciones de protección para disparo tripolar | tripolar | ■ | ■ | |
| 14 | Rótor bloqueado | $I > + n <$ | ■ | ■ | ■ |
| 24 | Protección de sobreexcitación | U/f | ■ | | |
| 25 | Verificación de sincronismo, función de sincronización | Sinc. | ■ | | |
| 27 | Protección de subtensión: "trifásica" o "sistema de secuencia positiva U1" o "universal Ux" | U< | ■ | | ■ |
| 27R, 59R | Protección de variación de tensión (a partir de V8.30) | dU/dt | ■ | | |
| | Protección de subtensión por dirección de potencia reactiva (protección QU) | Q>/U< | ■ | | |
| 32, 37 | Protección de potencia activa/reactiva | P<>, Q<> | ■ | | |
| 32R | Protección de potencia inversa | - P< | ■ | | |
| 37 | Subintensidad | I< | ■ | | |
| 38 | Supervisión de temperatura | $\theta >$ | ■ | ■ | ■ |
| 46 | Protección de sobreintensidad de secuencia negativa | I2> | ■ | | |
| 46 | Protección de carga desequilibrada (térmica) | $I^2 t >$ | ■ | ■ | ■ |
| 46 | Protección de sobreintensidad de secuencia negativa con dirección | I2>, $\angle(U2, I2)$ | ■ | | |
| 47 | Protección de sobretensión, sistema de secuencia negativa | U2> | ■ | | |
| 47 | Protección de sobretensión: "Sistema de secuencia negativa U2" o "sistema de secuencia negativa U1/sistema de secuencia positiva U1" | U2>; U2/U1> | ■ | | |
| 48 | Supervisión del tiempo de arranque para motores | I ² inicio | ■ | ■ | ■ |
| 49 | Protección de sobrecarga térmica | $\theta, I^2 t$ | ■ | ■ | ■ |
| 49 | Protección de sobrecarga térmica, característica definida por el usuario | $\theta, I^2 t$ | ■ | | |
| 49R | Protección de sobrecarga térmica del rotor (motor) | θR | ■ | ■ | ■ |
| 50/51 TD | Protección de sobreintensidad, Fases | I> | ■ | ■ | ■ |
| | Disparo rápido por cierre sobre una falta | SOTF | ■ | | |
| 50HS | Desconexión rápida por alta intensidad | I>>> | ■ | | |
| 50/51 TD | Protección de sobreintensidad con sistema de secuencia positiva I1 (a partir de V7.9) | I1> | ■ | | |
| 50N/ 51N TD | Protección de sobreintensidad, Tierra | IN> | ■ | ■ | ■ |
| 50N/ 51N TD | Protección de sobreintensidad, monofásica | IN> | ■ | | |
| 50Ns/ 51Ns | Detección sensible de faltas a tierra para redes compensadas y aisladas incl. a) 3I0>, b) admittancia Y0>, c) armón. 3I0> (a partir de V7.8) | INs> | ■ | | |
| | Detección de faltas a tierra por localización de impulsos; nota: este escalón requiere adicionalmente la función "50Ns/51Ns o 67Ns Detección de faltas a tierra sensible para redes aisladas y compensadas" | IN-impulso | ■ | | |
| | Protección de faltas a tierra intermitentes | IIE> | ■ | | |
| 50BF | Protección Fallo del interruptor, tripolar | FIP | ■ | | |
| 50RS | Supervisión contra reencendido del arco en el interruptor | RAIP | ■ | | |
| 50L | Protección de salto de carga | I>L | ■ | ■ | ■ |
| 51V | Protección de sobreintensidad controlada por la tensión | $t=f(I,U)$ | ■ | | |
| 59, 59N | Protección de sobretensión: "trifásica" o "sistema homopolar U0" o "sistema de secuencia positiva U1" o "universal Ux" | U> | ■ | | |

Equipos SIPROTEC 5 y campos de aplicación

Protección de motor – SIPROTEC 7SK82

| ANSI | Función | Abrev. | Disponible | Plantillas de aplicación (Templates) | |
|-------|--|------------------------|------------|--------------------------------------|---|
| | | | | 1 | 2 |
| 60 | Supervisión por comparación de tensiones | $\Delta U >$ | ■ | | |
| 66 | Bloqueo de rearranque para motores | $I^2 t$ | ■ | ■ | ■ |
| 67 | Protección direccional de sobreintensidad, Fases | $I >, \angle(U, I)$ | ■ | | |
| 67N | Protección direccional de sobreintensidad, Tierra | $IN >, \angle(U, I)$ | ■ | | |
| 67Ns | Detección sensible de faltas a tierra para redes compensadas y aisladas incl. a) $3I_0 >$ b) $U_0 >$, c) Cos-/SinPhi, d) transitorios de falta a tierra, e) Phi(U,I), f) admitancia | | ■ | | ■ |
| | Escalón direccional con un armónico; nota: este escalón requiere adicionalmente la función "67Ns Detección de faltas a tierra sensible para redes aisladas y compensadas" | $\angle(U_0h, I_0h)$ | ■ | | |
| | Protección direccional de faltas a tierra intermitentes | $IIEdir >$ | ■ | | |
| 74TC | Supervisión del circuito de disparo | | ■ | | |
| 74CC | Supervisión del circuito de cierre (a partir de V7.9) | | ■ | | |
| 79 | Reenganche automático, tripolar | RE | ■ | | |
| 81 | Protección de frecuencia: "f>" o "f<" o "df/dt" | $f < >; df/dt < >$ | ■ | | |
| 81U | Compensación automática de frecuencia | $f < (CAF)$ | ■ | | |
| | Protección contra salto vectorial | $\Delta \varphi >$ | ■ | | |
| 86 | Bloqueo de cierre | | ■ | ■ | ■ |
| 87N T | Protección diferencial de faltas a tierra | ΔIN | ■ | | |
| 90V | Regulador de tensión para transformador de dos devanados | | ■ | | |
| 90V | Regulador de tensión para transformador de dos devanados con regulación paralela | | ■ | | |
| | Número de transformadores de dos devanados con regulación paralela (nota: sólo en combinación con la función "Regulador de tensión para transformador de dos devanados con regulación paralela") | | ■ | | |
| LF | Localizador de falta, unilateral | LF-unil. | ■ | | |
| PMU | Medida de sincrofasores | PMU | ■ | | |
| AFD | Protección de arco (sólo con módulo insertable ARC-CD-3FO) | | ■ | | |
| | Valores de medida - Estándar | | ■ | ■ | ■ |
| | Valores de medida, Ampliados: Mín., Máx., Medio | | ■ | | |
| | Contador de estadística de maniobras | | ■ | | |
| | Valores de medida para PQ-básico THD (Total Harmonic Distortion) y armónicos (a partir de V8.01) y valores medios de tensión THD (a partir de V8.40) | | ■ | | |
| | Valores de medida para PQ-básico Asimetría de tensión (a partir de V8.40) | | ■ | | |
| | Valores de medida para PQ-básico Variaciones de tensión - supervisión de caídas de tensión, sobretensiones e interrupciones de tensión (a partir de V8.40) | | ■ | | |
| | Valores de medida para PQ-básico TDD - Total Demand Distortion (a partir de V8.40) | | ■ | | |
| | CFC (estándar, control) | | ■ | ■ | ■ |
| | CFC aritmética | | ■ | | |
| | Supervisión de desgaste del interruptor | $\Sigma Ix, I^2 t, 2P$ | ■ | | |
| | Función de secuencia de mando | | ■ | | |
| | Detección de intensidad inrush de cierre | | ■ | ■ | ■ |
| | Acoplamiento externo | | ■ | | |

2.12

Equipos SIPROTEC 5 y campos de aplicación

Protección de motor – SIPROTEC 7SK82

| ANSI | Función | Abrev. | Disponible | Plantillas de aplicación (Templates) | |
|--|---|--------|------------|--------------------------------------|----|
| | | | | 1 | 2 |
| | Control | | ■ | ■ | ■ |
| | Interruptor | | ■ | ■ | ■ |
| | Seccionador/Seccionador de tierra | | ■ | | |
| | Perturbografía de las señales analógicas y binarias | | ■ | ■ | ■ |
| | Supervisión | | ■ | ■ | ■ |
| | Interface de datos de protección, serie | | ■ | | |
| | Adaptación de grupos de frecuencia (a partir de V7.8) | | ■ | | |
| | Cyber Security: Control de acceso basado en roles RBAC (a partir de V7.8) | | ■ | | |
| | Detección de temperatura vía protocolo de comunicación | | ■ | | |
| | Cyber Security: Acceso a la red autenticado mediante IEEE 802.1X (a partir de V8.3) | | ■ | | |
| Clase de puntos funcionales: | | | | 0 | 40 |
| La configuración y la clase de puntos de función para su aplicación pueden ser determinadas en el configurador de pedidos SIPROTEC 5 bajo www.siemens.com/siprotec . | | | | | |

Tabla 2.12/1 SIPROTEC 7SK82 - Funciones, plantillas de aplicación (Templates)

- (1) Medida de intensidad
- (2) Medida de intensidad y de tensión

| Variantes estándar para SIPROTEC 7SK82 | | |
|--|---|---|
| T1 | 1/3, 11 EB, 9 SB, 4 I Ancho de la carcasa 1/3 x 19", 11 entradas binarias 9 salidas binarias (1 contacto vivo, 8 estándar) 4 transformadores de intensidad Contiene los módulos: Módulo básico con PS101 e IO101 |  |
| T2 | 1/3, 23 EB, 16 SB, 4 I Ancho de la carcasa 1/3 x 19", 23 entradas binarias 16 salidas binarias (1 contacto vivo, 15 estándar) 4 transformadores de intensidad Contiene los módulos: Módulo básico con PS101, IO101 e IO110 |  |
| T3 | 1/3, 11 EB, 9 SB, 2 I, 12 RTDs Ancho de la carcasa 1/3 x 19" 11 entradas binarias 9 salidas binarias (1 contacto vivo, 8 estándar) 4 transformadores de intensidad 12 entradas de temperatura Contiene los módulos: Módulo básico con PS101, IO101 e IO111 |  |
| T4 | 1/3, 11 EB, 9 SB, 4 I, 4 U Ancho de la carcasa 1/3 x 19" 11 entradas binarias 9 salidas binarias (1 contacto vivo, 8 estándar) 4 transformadores de intensidad 4 transformadores de tensión Contiene los módulos: Módulo básico con PS101 e IO102 |  |
| T5 | 1/3, 23 EB, 16 SB, 4 I, 4 U Ancho de la carcasa 1/3 x 19" 23 entradas binarias 16 salidas binarias (1 contacto vivo, 15 estándar) 4 transformadores de intensidad 4 transformadores de tensión Contiene los módulos: Módulo básico con PS101, IO102 e IO110 |  |
| T6 | 1/3, 11 EB, 9 SB, 4 I, 4 U, 12 RTDs Ancho de la carcasa 1/3 x 19" 11 entradas binarias 9 salidas binarias (1 contacto vivo, 8 estándar) 4 transformadores de intensidad 4 transformadores de tensión 12 entradas de temperatura Contiene los módulos: Módulo básico con PS101, IO102 e IO111 |  |

Tabla 2.12/2 Variantes estándar para equipos de protección del motor SIPROTEC 7SK82

Los datos técnicos de los equipos se encuentran en el manual de equipos www.siemens.com/siprotec.