

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**GUÍA Y HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA  
PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES DE MOTORES DE  
GRAN POTENCIA CONSIDERANDO EL TIPO DE ARRANQUE Y  
MODELO TÉRMICO DEL MOTOR.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**ERICK ALEXANDER ESPÍN GARCÍA**

**DIRECTOR: NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ**

**Quito, diciembre 2021**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Erick Alexander Espín García, bajo mi supervisión.

---

**DR. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Erick Alexander Espín García, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

ERICK ALEXANDER ESPÍN GARCÍA

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	III
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
CAPITULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.2 ALCANCE .....	2
CAPITULO 2 .....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 MOTORES DE ALTA POTENCIA Y ALTO VOLTAJE. ....	4
2.2 TIPOS DE ARRANQUE DE MOTORES. ....	4
2.2.1 ARRANQUE DIRECTO .....	4
2.2.2 ESTRELLA DELTA .....	5
2.2.3 RESISTENCIA VARIABLE DEL ROTOR .....	6
2.2.4 REACTOR .....	7
2.2.5 AUTOTRANSFORMADOR.....	8
2.2.6 VARIADOR DE FRECUENCIA (VFD).....	9
2.3 MODELO TÉRMICO DE MOTOR. ....	10
2.3.1 CURVAS DE LÍMITE TÉRMICO. ....	12
2.4 PROTECCIÓN DE MOTORES. ....	14
2.4.1 PROTECCIONES SEGÚN LA NORMA IEEE STD C37.96-2012 .....	14
2.4.2 PROTECCIONES SEGÚN LITERATURA.....	14
2.4.3 RELÉS COMERCIALES DE PROTECCIÓN PARA MOTORES.....	27
2.5 COMPARACIÓN DE FUNCIONES PROTECCIONES DE LAS DIFERENTES MARCAS. ....	38
CAPÍTULO 3 .....	41
3. GUÍA DE PROTECCIÓN DE MOTORES DE ALTO VOLTAJE Y ALTA POTENCIA.....	41
3.1 PROTECCIONES RECOMENDADAS Y PROTECCIONES DE LOS RELÉS COMERCIALES. ....	41

3.2	PARAMETRIZACIÓN SELECCIONADA.....	41
3.3	PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES EN RELÉS COMERCIALES. 43	
3.4	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES. ....	49
3.4.1	ENTORNO DE PROGRAMACIÓN. ....	49
3.4.2	FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA .....	49
CAPÍTULO 4 .....		52
4.	APLICACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO. ....	52
4.1	SISTEMA IEEE DE 9 BARRAS.....	52
4.1.1	ARRANQUE DIRECTO .....	53
4.1.2	ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR.....	89
4.1.3	ARRANQUE CON REACTOR.....	98
4.1.4	ARRANQUE ESTRELLA DELTA. ....	106
4.2	SISTEMA INDUSTRIAL .....	114
4.2.1	ARRANQUE DIRECTO.....	116
4.3	PROTECCIÓN 81 CON ARRANQUE VFD .....	142
4.3.1	VFD .....	142
CAPITULO 5 .....		146
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	146
5.1	CONCLUSIONES .....	146
5.2	RECOMENDACIONES .....	147
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	148
7.	ANEXOS.....	151

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación desarrolla una filosofía de protecciones para motores de alto voltaje y gran potencia, considerando el tipo de arranque y el modelo térmico del mismo, partiendo de una recopilación bibliográfica de los tipos de arranque, los modelos térmicos, las protecciones recomendadas tanto en normas como libros de texto, los relés comerciales y sus funciones de protección para motores y los datos básicos de placa y los brindados por el fabricante en manuales. Para la filosofía de protecciones se recopiló, comparó y seleccionó las diferentes protecciones sugeridas por la bibliografía con las cuales se elaboró una guía metodológica de protecciones que brinda una parametrización de estas protecciones tanto de manera general como para diferentes marcas comerciales de relés que se puede encontrar en el mercado; con esta información se elaboró una herramienta computacional en el software MATLAB que calcula la parametrización de las protecciones teniendo en cuenta el modelo comercial y el tipo de arranque del motor. Finalmente, se comprobó el funcionamiento de la herramienta en el software DIGSILENT PowerFactory mediante estudio de cortocircuitos y simulaciones en el dominio del tiempo donde se utilizó como casos de estudio el sistema IEEE de 9 barras y un sistema industrial de distribución.

**PALABRAS CLAVE:** filosofía de protecciones, modelo térmico, tipo de arranque, parametrización.

## **ABSTRACT**

This thesis presents a philosophy of protections for high voltage and high-power motors, considering the starting method and the motor's thermal model. The process starts with a bibliographical compilation of the different types of starting methods, the thermal models, and recommended protections taken from standards and textbooks, the relays and functions of protection for commercial motors offered by several manufacturers. For the philosophy of protection, a comparison and selection of the different protections was elaborated, and a guide for parametrization of these protection functions was created considering different relays that can be found in the market, with this information a computational tool in the software MATLAB was elaborated that offers the parametrization of the protection functions considering the commercial model and the motor starting method. Finally, the operation of each protection function was verified using the PowerFactory software by means of short circuits study and simulations in the time domain time where the IEEE 9 bus system and an industrial distribution system were used.

**KEYWORDS:** protection philosophy, thermal model, motor starting, parameterization

# CAPITULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En el sistema eléctrico ecuatoriano, la carga motórica es clasificada como prioritaria ya que, según su Plan Maestro de Electricidad presentado en el año 2016, la carga industrial donde más son utilizados los motores fue del 23,73% de la carga total del país [1]. Los motores se los puede clasificar por su potencia (baja, media, alta y gran potencia), su voltaje (bajo, medio y alto) [2] y por su construcción ( síncronos y asíncronos). En la industria, los motores más comunes son: de alta y gran potencia, de alto voltaje y asíncronos y son utilizados en diferentes actividades y procesos como: ventiladores, sopladores, transportadores, trituradoras, compresores, grúas, bombas, extrusoras, refinerías de petróleo, y enfriadores. Pese a su robustez y la simplicidad de su construcción, la tasa de falla por año de estos motores es significativa, y a pesar de que se puede estimar en un 3% a 5% de fallas por año en industrias como cemento, minería, pulpa, y papel, la tasa de falla de motores puede aumentar hasta el 12% [3]. Se debe considerar también los altos costos de las fallas que pudieran aparecer y que incluyen la reparación, reemplazo, remoción e instalación de una nueva máquina y las pérdidas de producción.

De las fallas que pueden presentarse en un motor: eléctricas, mecánicas y mecánicas que progresan a eléctricas, las relacionadas con el sobrecalentamiento debido al mal dimensionamiento del motor, enfriamiento insuficiente a baja velocidad, cambios súbitos en la carga del motor, ruptura del aislamiento por cortocircuitos o sobretensiones son las que más daños producen en el devanado del estator. Además, se debe mencionar el tipo de arranque de motor ya que al ser motores de gran potencia se producen problemas por el alto consumo de corriente, altos picos de torque, caídas de voltaje, sobre calentamiento del motor, sobredimensionamiento del sistema de protecciones y aumento de mantenimientos [4], por lo que es muy necesario aplicar un arrancador a este tipo de motores.

En base a lo mencionado, se puede concluir que los motores de gran potencia y alto voltaje son componentes importantes en los procesos productivos de la industria, sus costos de adquisición y reparación pueden llegar a ser altos y convierten a este tipo de motores en un componente crítico en el proceso; por esta razón, es necesario definir esquemas de protección adecuados que garanticen su funcionamiento y su vida útil.



## **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general de este Proyecto Técnico es elaborar una guía metodológica y una herramienta computacional para la parametrización de la protección de motores de alta potencia considerando el tipo de arranque y modelo térmico.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con sistemas de protección, tipos de arranque y modelado térmico de motores de alta potencia y alto voltaje.
- Determinar las funciones de protección a aplicarse en motores de alta potencia, considerando los diferentes tipos de arranque y modelo térmico del motor.
- Elaborar una guía metodológica y una herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de cada una de las funciones de protección de motores de alta potencia.
- Validar el adecuado funcionamiento del sistema de protecciones de un motor de alta potencia frente a diferentes disturbios en la red eléctrica, mediante estudios de cortocircuito y simulaciones en el dominio del tiempo.

## **1.2 ALCANCE**

En una primera etapa, se realizará una recopilación bibliográfica de los tipos de arranque para motores, esquemas de protección y métodos para determinar los parámetros de las funciones de protección. Se recopilará información relacionada con la modelación térmica de los motores y se estudiará la modelación de motores y protecciones en software PowerFactory de DigSilent. Se partirá de las recomendaciones emitidas por estándares y normas internacionales y las recomendaciones emitidas por los fabricantes de relés y de motores.

Posteriormente, en base a la información recopilada se determinarán las funciones de protección aplicables a motores de alta potencia y alto voltaje, considerando los diferentes tipos de arranque y las características térmicas del motor. Las funciones de protecciones seleccionadas se cotejarán con aquellas disponibles en los relés comerciales convencionales. Se definirán las más típicas y sus parámetros principales.

En la etapa siguiente, se elaborarán una guía metodológica y una herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de cada una de las funciones de

protección definidas anteriormente. La herramienta computacional se implementará en Matlab. Adicionalmente, se considerará el modelado térmico del motor aplicado en el ámbito de las protecciones eléctricas.

Finalmente, mediante estudio de cortocircuitos y simulación de fallas el dominio del tiempo, se comprobará la adecuada parametrización y funcionamiento del sistema de protecciones del motor. El estudio de cortocircuito y simulaciones en el dominio del tiempo se realizarán mediante el software PowerFactory de DigSilent. Diferentes casos de estudio se implementarán en el sistema IEEE 9 barras y 3 generadores, así como un sistema industrial de distribución.

## **CAPITULO 2**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 MOTORES DE ALTA POTENCIA Y ALTO VOLTAJE.**

Según la referencia [2], los motores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Según su potencia nominal: baja ( $P_n < 1 \text{ hp}$ ), media ( $1 \text{ hp} < P_n \leq 500 \text{ hp}$ ), alta y gran potencia ( $P_n > 500 \text{ hp}$ );
- Según su voltaje nominal: bajo ( $V_n < 690 \text{ V}$ ), medio ( $690 \text{ V} < V_n \leq 1000 \text{ V}$ ) y alto ( $V_n > 1000 \text{ V}$ ).

Además, algunos autores afirman que más del 90% de motores utilizados en la industria son trifásicos de inducción; los motores de gran potencia pueden tener una capacidad de hasta 30000 hp y los motores de alto voltaje pueden operar hasta voltajes de 13800 voltios [5], [6]. Los costos de este tipo de motores son variables, dependiendo del fabricante y de la aplicación, sus valores oscilan entre los 10.000 USD hasta los 300.000 USD [7].

#### **2.2 TIPOS DE ARRANQUE DE MOTORES.**

Para esta sección se considerarán los tipos de arranque más empleados y que están implementados el software PowerFactory de DigSilent.

##### **2.2.1 ARRANQUE DIRECTO**

El arranque directo de un motor es cuando se aplica a sus terminales de forma directa el voltaje nominal al que debe trabajar el motor. Cuando un motor arranca con carga y de forma directa, tiende a absorber una intensidad de corriente muy alta, llegando hasta 8 o más veces la intensidad de corriente nominal. Este aumento de corriente en un periodo corto de tiempo (arranque), produce mayores caídas de voltaje en los alimentadores.

Este procedimiento presenta una serie de inconvenientes y altos costos relacionados con el mantenimiento de la máquina, a pesar de ser sencillo y de bajo costo de aplicación [8].

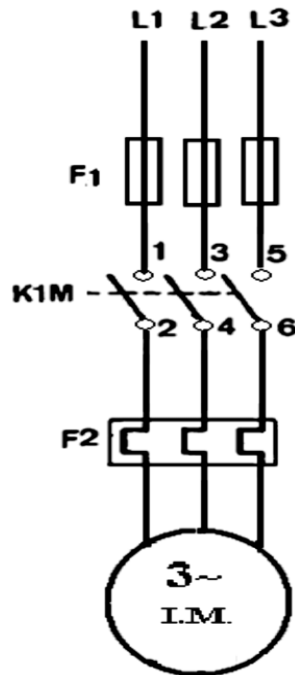


Figura 1. Esquema Arranque Directo

### 2.2.2 ESTRELLA DELTA

El arranque estrella – delta es la forma más económica y común de arranque utilizado en industrias para motores grandes. Los devanados del motor de inducción trifásico se conmutan entre conexión estrella y triángulo para arrancar el motor. Para arrancar, el motor de inducción se conecta en estrella mediante un relé bipolar triple.

Esta forma de arranque tiene como objetivo reducir la intensidad de corriente absorbida por el motor durante el periodo de arranque, y se utiliza en motores que inician su marcha con demanda de par resistente inferior a la nominal.

Cuando el motor acelera, un relé temporizador cambia la conexión en estrella de los devanados del estator a la conexión delta, lo que permite el voltaje total en cada devanado. Se recomienda no pasar de conexión estrella a conexión delta mientras el motor no haya alcanzado al menos el 80% de su velocidad nominal.

Este método reduce en un tercio la corriente de arranque directo, sin embargo, ocurren picos de corriente al momento de conmutar a delta, aumenta el estrés mecánico y el estrés eléctrico que puede producir averías. Los cambios se producen debido a que el motor está en movimiento y al desconectarse la alimentación hace que el motor actúe como un generador con tensión de salida, que puede ser de la misma amplitud que de la red.

También el par se ve reducido en un tercio respecto al par de arranque directo. A pesar de que se reduce la corriente de arranque su par es débil [8].

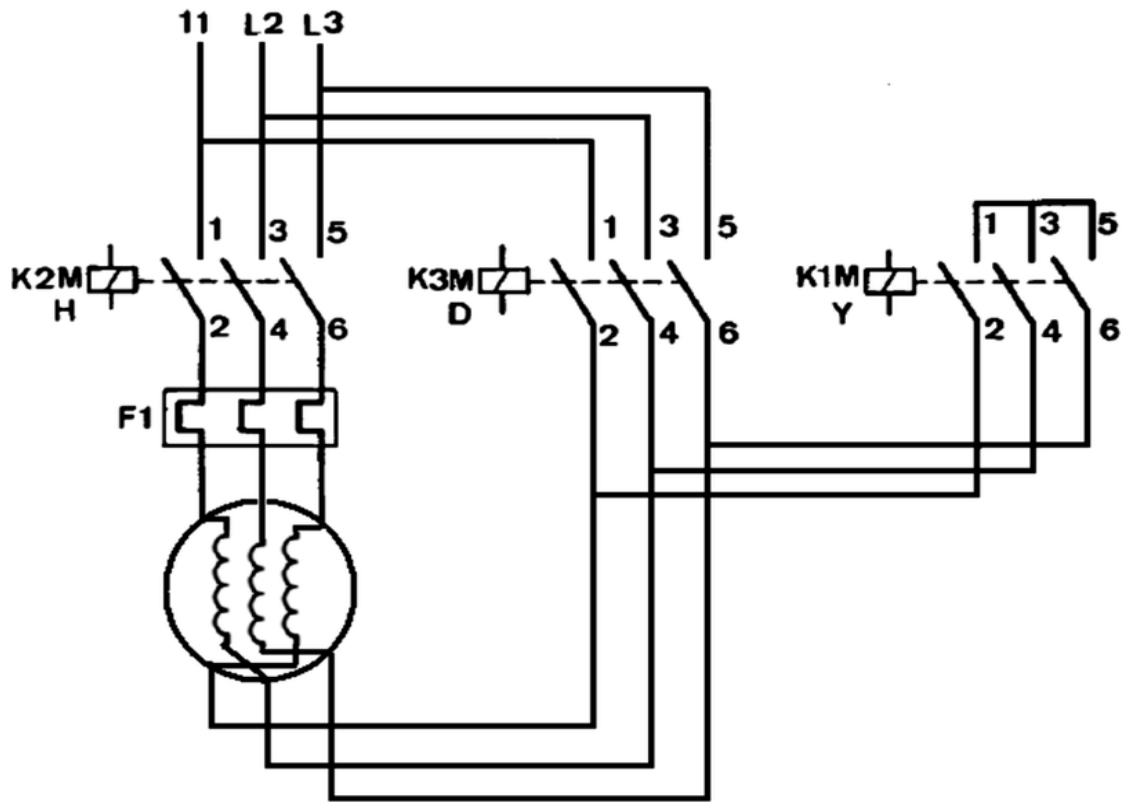


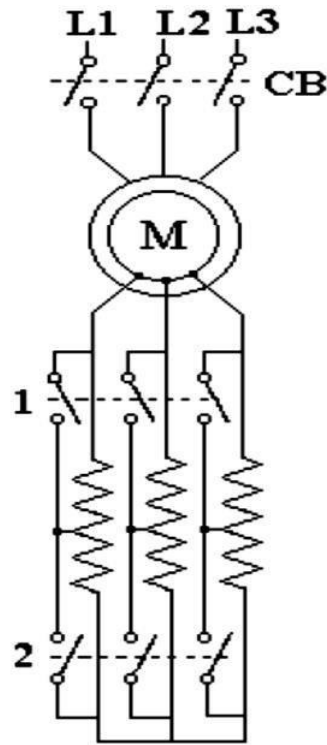
Figura 2. Esquema Arranque Estrella Delta

### 2.2.3 RESISTENCIA VARIABLE DEL ROTOR

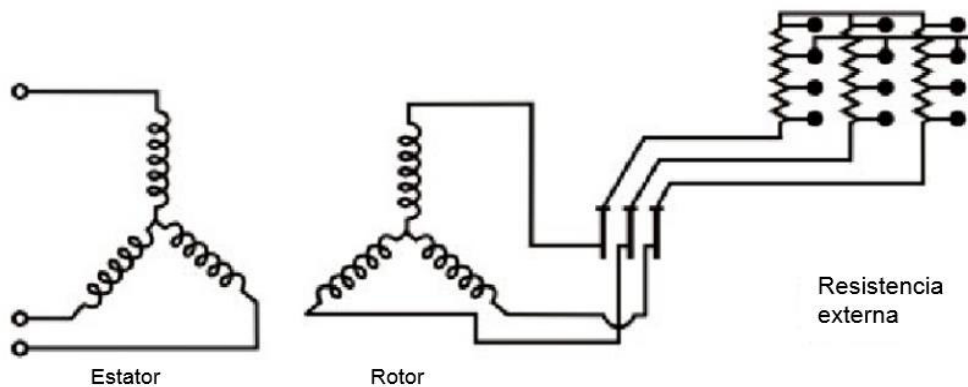
Para poder realizar este tipo de arranque, es necesario que el motor tenga rotor bobinado y acceso a los terminales del mismo. Este tipo de arranque se utiliza cuando el motor con rotor bobinado acciona maquinas cuyo par de arranque inicial sea bajo. El objetivo es reducir la intensidad de corriente absorbida en el periodo de arranque del motor.

El estator se alimenta siempre a plena carga. El voltaje del alimentador se suministra directamente al bobinado estático. Mientras aumenta la velocidad del motor, se va reduciendo paulatinamente el valor de las resistencias conectadas en el rotor; cuando el motor alcanza la velocidad nominal, la resistencia se corta completamente y los terminales del rotor quedan en cortocircuito.

Este método brinda un aumento progresivo del par de arranque durante la aceleración. Sin embargo, la variación de la tensión mediante resistencias en serie produce un alto consumo de energía durante el arranque [8].



**Figura 3.** Esquema Arranque Resistencia variable del rotor



**Figura 4.** Conexión Arranque Resistencia variable del rotor

### 2.2.4 REACTOR

Un arrancador de reactor tiene el mismo objetivo que las resistencias conectadas en el rotor, pero ahora son conectados en el estator, a excepción que se utilizan reactores o bobinas de choque para limitar la corriente de entrada en lugar de resistencias. Los reactores limitan la corriente de pico con reactancia inductiva en lugar de resistencia. Los reactores tienen una ventaja en los circuitos de limitación de corriente debido al tiempo de subida de la corriente en un circuito inductivo, en un circuito resistivo la corriente alcanzará su valor total según la Ley de Ohm instantáneamente; mientras que, en un circuito inductivo

la corriente debe aumentar a una tasa exponencial. Este tiempo de aumento exponencial de la corriente reduce aún más la corriente de entrada.

Cuando el motor alcanza su estado estable, el reactor se retira del circuito. Algunos circuitos pueden utilizar varios pasos de arranque, dependiendo de los requisitos del circuito [9].

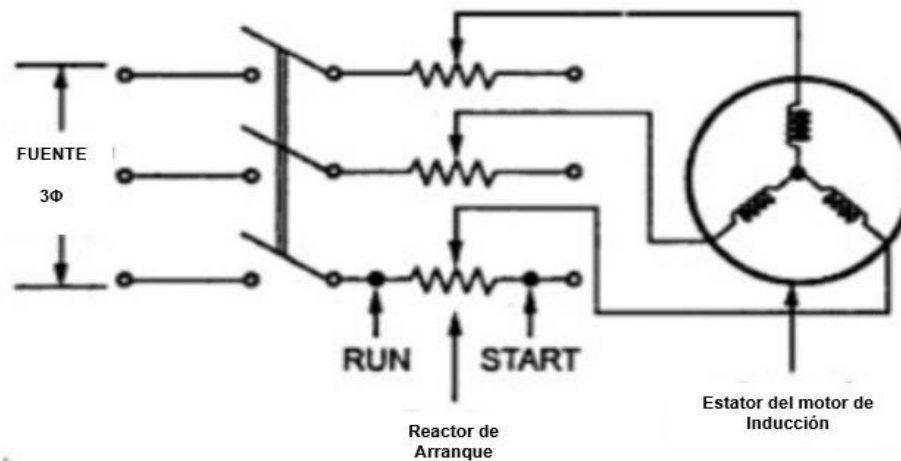
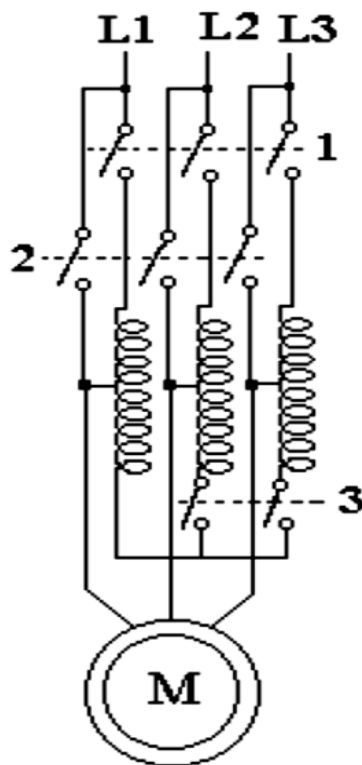


Figura 5. Esquema Arranque Reactor

### 2.2.5 AUTOTRANSFORMADOR

Este tipo de arranque es utilizado en motores con rotor cortocircuitado y que accionen maquinas cuyo par resistente de arranque sea bajo, con la finalidad de reducir la intensidad de corriente durante el periodo de arranque del motor.

Este arranque aplica tensiones reducidas al estator del motor mediante un autotransformador, de manera que estas tensiones tengan un crecimiento hasta alcanzar la tensión nominal de línea del motor. Generalmente, las salidas del autotransformador son 55%, 65%, 80% del voltaje de línea. Este método reduce la corriente de arranque entre 1.7 a 4 veces la corriente nominal, sin embargo, también se reduce el par de arranque entre 0.4 a 0.85 del torque nominal. Este método se utiliza para motores de gran potencia debido a la gran reducción de picos de corriente de arranque [10].



**Figura 6.** Esquema Arranque por Autotransformador

### 2.2.6 VARIADOR DE FRECUENCIA (VFD)

Un VFD toma el voltaje de línea de corriente alterna (CA), lo convierte en un voltaje de corriente continua (CC), filtra el voltaje de CC y luego invierte la señal de vuelta. Ese valor RMS de esta inversión simula un voltaje de CA. La frecuencia de salida del variador suele ser de 0 a CA frecuencia de línea de entrada. También son posibles frecuencias más altas que la CA nominal cuando se requieren para ciertas aplicaciones [11].

Los VFD para motores de CA han sido la innovación que ha vuelto a poner de relieve el uso de motores de CA. El motor de inducción de CA puede cambiar su velocidad cambiando la frecuencia del voltaje utilizado para alimentarlo. Esto significa que si el voltaje aplicado a un motor de CA es de 50 Hz (utilizado en países como China), el motor funciona a su velocidad nominal. Si la frecuencia aumenta por encima de 50 Hz, el motor funcionará más rápido que su velocidad nominal, y si la frecuencia de la tensión de alimentación es inferior a 50 Hz, el motor funcionará más lento que su velocidad nominal. De acuerdo con el principio de funcionamiento del variador de frecuencia, es el controlador electrónico diseñado específicamente para cambiar la frecuencia de voltaje suministrado al motor de inducción [12].



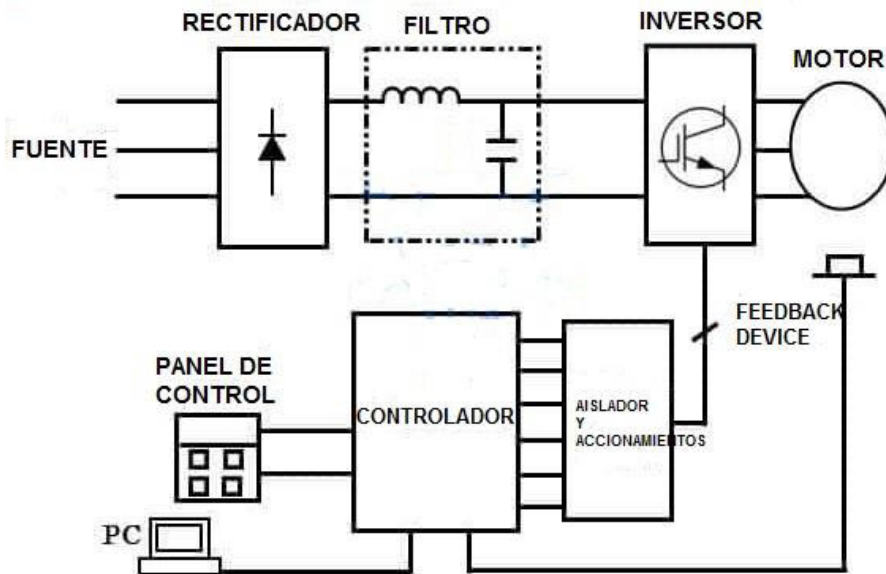


Figura 7. Esquema de arranque por VFD.

## 2.3 MODELO TÉRMICO DE MOTOR.

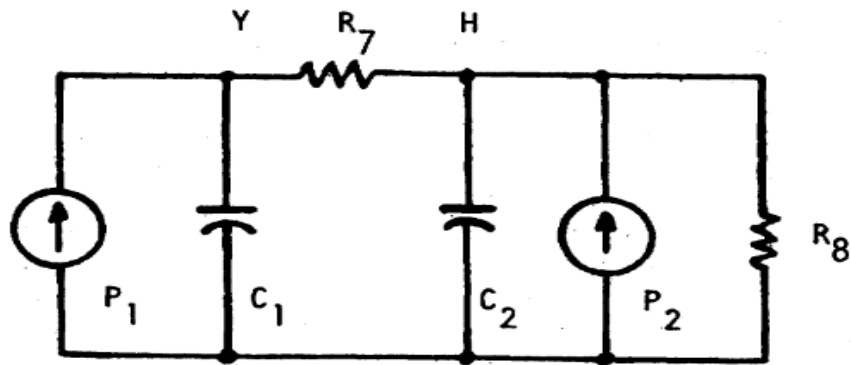
Los modelos térmicos de los motores son necesarios para estimar la temperatura en puntos críticos cuando realizar la medición directa no es posible y donde los retrasos de tiempo de medición no pueden ser tolerados. Las temperaturas de mayor preocupación están asociadas a los conductores del estator y del rotor.

Los sistemas térmicos tienen parámetros distribuidos, incluso las soluciones aproximadas de este tipo son onerosas. Dado que el conocimiento de la distribución de temperatura no es necesario, el uso de modelos de parámetros concentrados, con nodos que representan puntos críticos, es más útil y mucho más simple. A cada nodo se le asigna una capacitancia térmica y el calor que fluye entre los nodos pasa a través de resistencias. Por ejemplo, las fuentes de calor como conductores y pérdidas en el núcleo están representadas por fuentes de corriente inyectadas en el nodo del circuito equivalente.

Los modelos térmicos desacoplados para el estator y el rotor proporcionan buenos resultados para las condiciones de arranque, ya que el espacio de aire proporciona una barrera sustancial para la transferencia de calor. Un reporte del proceso térmico es el siguiente: Durante el arranque, la calefacción es casi adiabática, ya que se pierde poco calor en comparación con la entrada de calor. Mientras está en funcionamiento, el calor del conductor del estator se disipa a través del aislamiento del estator, y finalmente, en el ambiente ayudado por la ventilación. Debido a la histéresis y corrientes parásitas, las

pérdidas calientan el núcleo de hierro directamente y al conductor del rotor, el calor fluye hacia el hierro del rotor y sale a través de la ventilación y conducción del eje [13].

Como modelos térmicos para el estator y el rotor se tienen los siguientes:



**Figura 8.** Circuito equivalente térmico del estator

Donde:

$P_1$ : Pérdidas en el conductor.

$P_2$ : Pérdidas en el núcleo.

Y: Aumento en la temperatura del conductor.

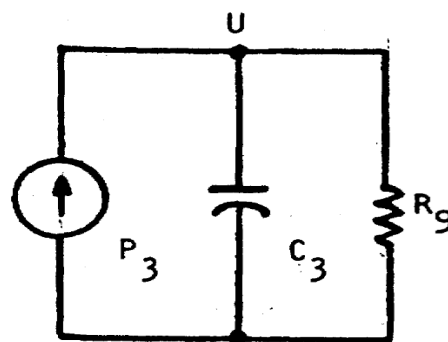
H: Aumento en la temperatura del núcleo.

$C_1$ : Capacitor térmico del conductor.

$C_2$ : Capacitor térmico del núcleo.

$R_7$ : Resistencia del aislamiento.

$R_8$ : Resistencia del ambiente.



**Figura 9.** Circuito equivalente térmico del rotor

Donde:

P3: Pérdidas en el conductor.

C3: Capacitor térmico del conductor.

U: Aumento en la temperatura del conductor.

R9: Resistencia del ambiente.

Estos procesos son emulados por los modelos térmicos analógicos eléctricos para el estator y el rotor que se muestran en Figuras 8 y 9, respectivamente. En la Figura 8, las fuentes de corriente P1 y P2 representan pérdidas de potencia en el estator determinado por el modelo eléctrico. Son las pérdidas del conductor y del núcleo, respectivamente. P3 en la Figura 9 representa la pérdida térmica del conductor del rotor también determinada por el modelo eléctrico. Las capacitancias y resistencias térmicas se identifican en cada figura. Los nodos del circuito identifican los puntos críticos en el motor.

El voltaje del nodo del estator Y representa la temperatura del conductor en el estator y H representa la temperatura del núcleo. En el modelo de rotor, U representa la temperatura del conductor del rotor.

Las ecuaciones de estado para el modelo de estator son:

$$\dot{Y} = \frac{1}{C1} \times P1 - \frac{1}{R7 \times C1} \times Y + \frac{1}{R7 \times C2} \times H \quad (1)$$

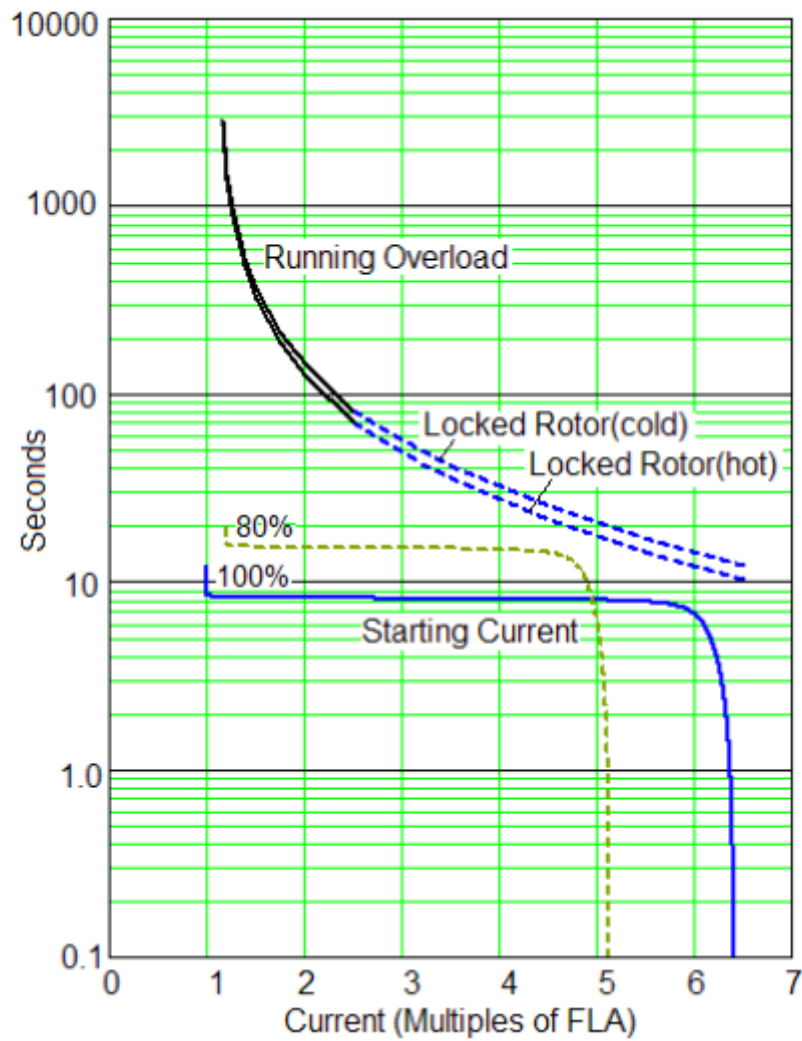
$$\dot{H} = \frac{1}{C2} \times P2 + \frac{1}{R7 \times C2} \times Y - \frac{R7 \times R8}{R7 \times R8 \times C2} \times H \quad (2)$$

Las ecuaciones de estado para el modelo de rotor son:

$$\dot{U} = \frac{1}{C3} \times P3 - \frac{1}{R9 \times C3} \times U \quad (3)$$

### 2.3.1 CURVAS DE LÍMITE TÉRMICO.

Los datos térmicos de un motor de inducción son emitidos en forma de curvas de límite térmico. Estas son características de tiempo-corriente que muestran tiempos seguros en condiciones de emergencia de rotor bloqueado, aceleración lenta y sobrecarga de funcionamiento. Para mostrar correlación con esta práctica, los modelos térmicos se pueden utilizar para obtener las curvas de límite térmico como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 10.** Curvas de límite térmico de un motor 7000 hp, 920 rpm

Las curvas de límite térmico muestran solo dos de las posibles condiciones de un proceso térmico de primer orden, donde en un equilibrio de calor, el almacenamiento y la pérdida de calor determinan la temperatura. Es evidente que la dinámica simple de un relé de sobrecorriente no puede proporcionar una protección térmica adecuada para un motor para todas las condiciones de funcionamiento [14].

## 2.4 PROTECCIÓN DE MOTORES.

### 2.4.1 PROTECCIONES SEGÚN LA NORMA IEEE STD C37.96-2012

La norma IEEE Std C37.96-2012 brinda un listado de protecciones recomendadas para los diferentes componentes de motores grandes que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Protecciones según norma IEEE Std C37.96-2012 [15].

Falla en componente	Protección
Cojinetes	38, 39
Bobinados	26, 46, 49, 50, 50N, 51, 51N, 51R, 59, 87.
Rotor	21, 26, 46, 49, 50, 50N, 51, 51N, 51R, 59, 87.
Eje o acoplamiento	37, 39.
Cepillos o anillo colector	40, 53, 55.
Dispositivos externos	27, 32, 40, 47, 53, 55, 60, 63, 64, 78, 81.

### 2.4.2 PROTECCIONES SEGÚN LITERATURA.

Considerando diferentes libros relacionados con protecciones eléctricas [16]–[19], donde se mencionan diferentes esquemas de protección para motores, se elaboró un listado con las protecciones más importantes y que coinciden entre los diferentes libros. Se presenta a continuación el listado resumen:

- Protección contra fallas de fase (50/51)
- Protección diferencial (87)
- Protección contra fallas a tierra (50N/51N)
- Protección térmica (49) y de rotor bloqueado (14)
- Protección de rotor bloqueado para motores grandes (21)
- Protección de desequilibrio y rotación de fase (46)
- Protección de subtensión (27)
- Transferencia y recierre de barra (79)
- Protección de arranques repetitivos y jogging (66)
- Protección de sobrecarga (49)

## 2.4.2.1 ESQUEMAS DEL LISTADO DE PROTECCIONES.

### 2.4.2.1.1 Protección contra fallas de fase

Los relés de sobre corriente instantáneos no direccionales (50, 51) pueden usarse para proteger motores de inducción. Las fallas generalmente proporcionan una corriente mayor que la corriente de arranque del rotor bloqueado, excepto en las fallas entre espiras. Puede fluir una corriente considerable entre las vueltas, pero desafortunadamente, hay muy poca evidencia de esto disponible en los terminales del motor hasta que se convierte en otros tipos de falla como fase a tierra o fase a fase. El motor es el dispositivo final en el sistema eléctrico, por lo que se pueden utilizar relés instantáneos, sin que existan problemas de coordinación. La retroalimentación del motor de inducción a las fallas del sistema es relativamente pequeña ( $1 / X_d'' + \text{offset}$ ) y decae rápidamente en unos pocos ciclos; por lo tanto, se pueden aplicar relés no direccionales.

Las relaciones de TC que alimentan estos relés deben ser seleccionadas de manera que la corriente máxima del motor proporcione entre 4 y 5 A de corriente secundaria. Los relés instantáneos de fase deben configurarse muy por encima de la corriente asimétrica de bloqueo del rotor, y, muy por debajo de la corriente de falla mínima [16]. Esto se puede equiparar donde  $I_{LR}$ , la corriente simétrica de rotor bloqueado está dada por:

$$I_{LR} = \frac{1}{X_{1S} + X_d''} \quad (4)$$

Dónde:

- $I_{LR}$  = Corriente de rotor bloqueado.
- $X_{1S}$  = Reactancia total (impedancia) del sistema de energía o fuente al motor.
- $X_d''$  = Reactancia

Esta ecuación es similar a la ecuación de la corriente de arranque del motor, donde el máximo de inicio o la corriente de rotor bloqueado tiene una fuente muy grande o infinita, por lo que  $X_{1S}$  se acerca a cero. Una falla en el motor está dada por [16]:

$$I_{3\Phi} = \frac{1}{X_{1S}} \quad (5)$$

Dónde:

- $I_{3\phi}$  = Corriente de falla del motor.

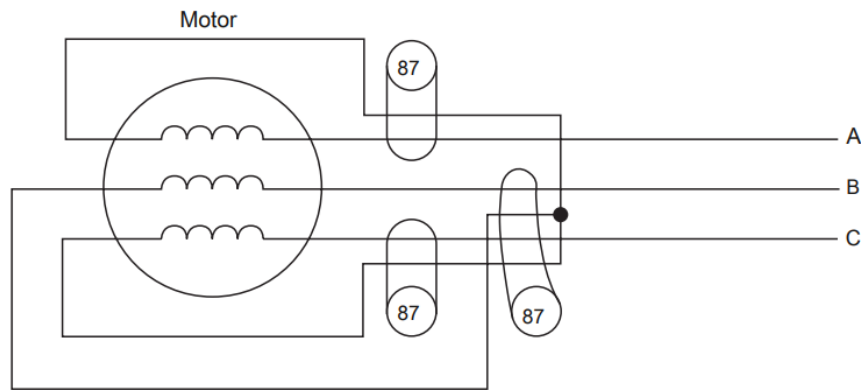
Para permitir la resistencia de falla y diferentes tipos de fallas y para asegurar la activación de la unidad por falla mínima, la activación instantánea del relé de fase debe establecerse en menos de un tercio de  $I_{3\phi}$ , a una falla trifásica simétrica en el alimentador del motor. Además, la corriente de pickup debe establecerse en 1,6 veces  $I_{LR}$  o más, limitada por la impedancia de la fuente. La relación  $I_{3\phi}/I_{LR}$  por tanto, debería ser superior a aproximadamente 5,0 [17].

#### 2.4.2.1.2 Protección diferencial

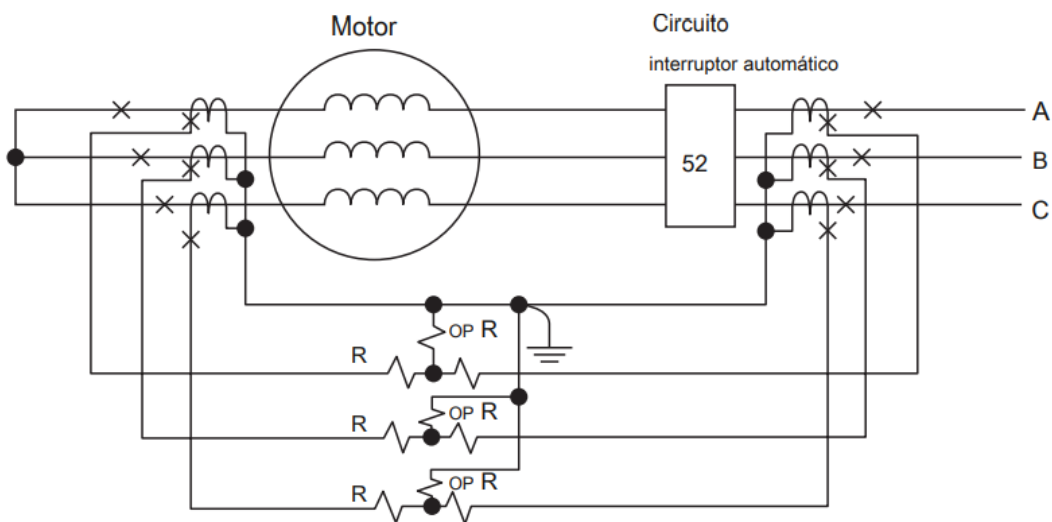
En la mayoría de casos, se prefiere el uso de la protección diferencial (87). Sin embargo, para algunos motores, los dos extremos de los devanados pueden no estar disponibles y no se puede aplicar esta protección. Si ambos extremos de los devanados están disponibles, el mejor diferencial, en términos de sensibilidad, velocidad y seguridad, es pasar los conductores de los devanados a través de un TC de suma de flujo (anillo). Las aberturas o ventanas máximas típicas en estos TC son de aproximadamente 8 pulgadas de diámetro.

Con una relación fija de 50: 5 y un relé instantáneo de sobre corriente (50), la combinación puede proporcionar una captación de casi 5 A de corriente primaria. Este es un diferencial de equilibrio de flujo, independiente de la carga y las magnitudes de la corriente de arranque y con solo un TC por fase, de modo que no existe el rendimiento correspondiente del TC. La protección interna de fase y tierra se proporciona dentro del motor y hasta la ubicación del TC. Se requiere otra protección para las conexiones al disyuntor, arrancador, etc. La limitación es el tamaño del conductor en relación con la apertura del TC.

Se debe aplicar un diferencial convencional con TC en los cables de salida y neutro donde no se puede usar el tipo de suma de flujo. Normalmente, los dos conjuntos de TC serían del mismo tipo y relación, por lo que son aplicables los relés diferenciales de dos restricciones convencionales 87.



**Figura 11.** Esquema de protección Diferencial con TC de tipo sumatorio de flujo (anillo) y relés de sobrecorriente instantáneos (50) [16].



**Figura 12.** Esquema de protección diferencial con TC de tipo convencional y relés diferenciales [16].

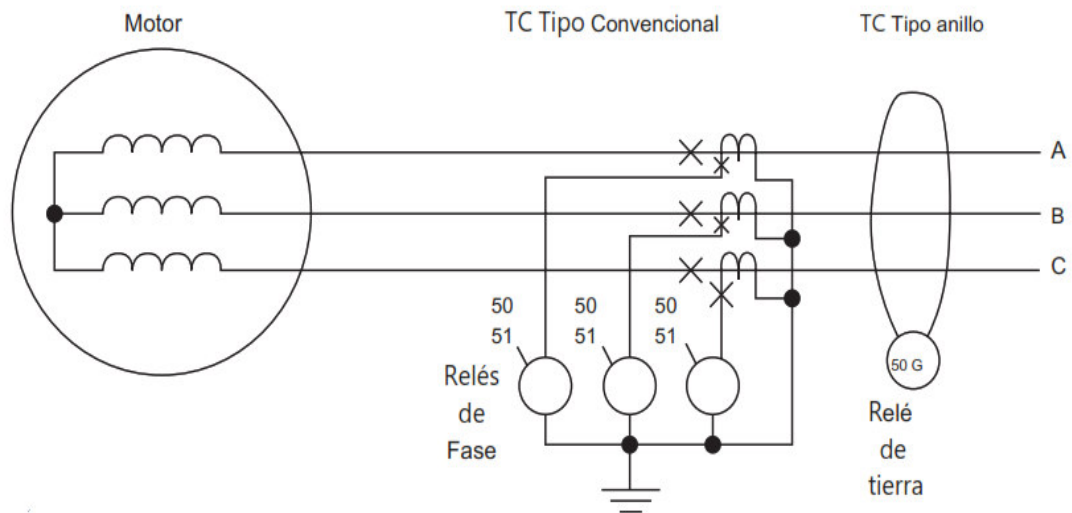
#### 2.4.2.1.3 Protección contra fallas a tierra

En cuanto a la protección de fase, también se aplican relés instantáneos de sobre corriente para la protección de falla a tierra (50G, 50N, 51N). Cuando corresponda, el método preferido es utilizar un transformador de corriente del tipo de suma de flujo, con los tres conductores del motor pasando a través de la abertura del TC. Esto proporciona una suma magnética de las tres corrientes de fase, de modo que la salida secundaria al relé sea de secuencia cero (3I0). La relación de TC, comúnmente 50:5, es independiente del tamaño del motor, mientras que los TC convencionales en las fases deben dimensionarse para la carga del motor. La ventaja es una alta sensibilidad con buena seguridad, pero está limitada

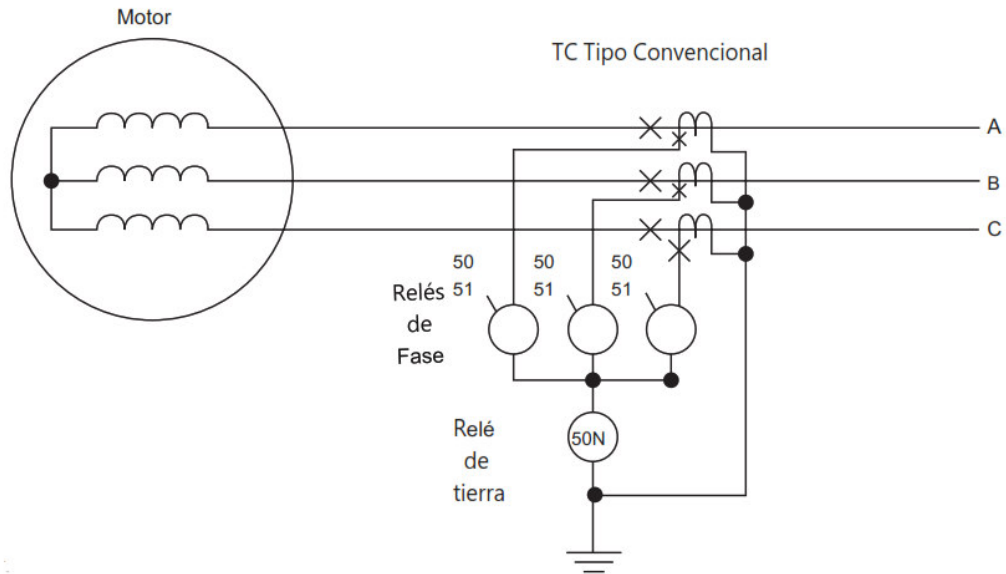


por el tamaño del conductor que puede pasar a través de la abertura del TC. La sensibilidad típica es de 5A de corriente primaria [16].

La práctica común en un servicio de estación y los sistemas de energía industrial de 2400 a 14,400 V es utilizar una conexión a tierra de baja resistencia. Al utilizar el esquema de "transformador de corriente de rosca", dichos sistemas ofrecen todas las ventajas de las unidades de disparo instantáneas (velocidad, confiabilidad, simplicidad, bajo costo) sin ninguna preocupación por la corriente de arranque, las contribuciones de falla del motor, la falsa corriente residual o alta sensibilidad. La Figura 13 muestra cómo el transformador de corriente de tipo secuencia cero BYZ se puede utilizar como suministro para la unidad 50 de disparo instantáneo (IT) o el relé 51 de sobrecorriente temporizada (CO). Las sensibilidades típicas que se pueden obtener con estos sistemas de protección de falla a tierra se muestran en la Tabla 2.



**Figura 13.** Protección contra sobrecorriente de tierra con tres conductores pasados a través de un TC de tipo sumatorio de flujo [16].



**Figura 14.** Protección contra sobrecorriente de tierra con TC convencional [16].

**Tabla 2.** Configuraciones y sensibilidades de relés usando TCs de secuencia cero 50/5 BYZ

Tipo de Relé	Configuración de relé	Sensibilidad mínima en primario 310 amperios		Primario Máximo 310 amperios para una sincronización y coordinación precisas	
		4¾ ID**	7¾ ID**	4¾ ID**	7¾ ID**
IT	0.15	5.0	5.0	—	—
CO-8 o 9*	0.5	9.0	10.0	25	112
CO-8 o 9*	2.5	24.0	24.0	540	1215
CO 11*	0.5	6.0	7.0	70	150
CO11*	2.5	24.0	24.0	700	900

\*CO-8 relé de sobrecorriente curva inversa, CO-9 relé de sobrecorriente curva muy inversa, CO-11 relé de sobrecorriente curva extremadamente inversa [20].

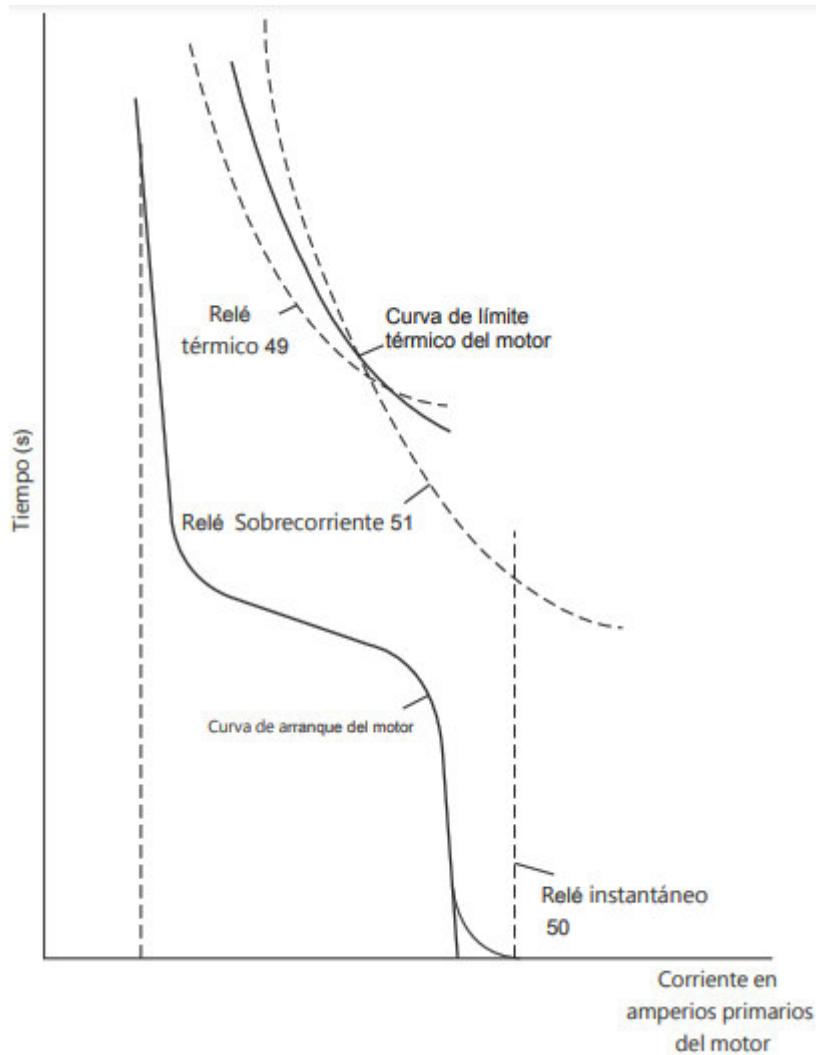
\*\* 4¾ ID y 7¾ ID son el diámetro interior de la ventana en pulgadas.

#### *2.4.2.1.4 Protección térmica y de rotor bloqueado*

Esta protección implica la aplicación de relés (49-51) para coincidir estrechamente con las curvas térmicas y de rotor bloqueado. Sin embargo, debe recordarse que las curvas térmicas del motor son representaciones aproximadas de zonas de daño térmico para operación general o normal. Los relés deben operar justo antes de que se alcancen o excedan los límites. Esta protección, diseñada y empaquetada de varias formas, proporciona una muy buena protección para la mayoría de los motores.

Los relés térmicos están disponibles en varias formas:

1. Un tipo réplica, donde las características de calentamiento del motor se aproximan estrechamente con un elemento bimetálico dentro de una unidad de calentador de corriente. Estos funcionan solo con corriente.
2. Relés que operan desde bobinas exploradoras, generalmente detectores de temperatura de resistencia (RTD), integrados en los devanados del motor. Estos funcionan solo a la temperatura del devanado, y el diseñador coloca los detectores en el motor en el punto caliente o zona de peligro más probable [16]. Por lo general, se aplican solo a motores grandes, generalmente de 1500 hp y superiores, donde hay RTD disponibles. El RTD es un excelente indicador de la temperatura promedio del devanado que está influenciado por los efectos de la temperatura ambiente, las variaciones de ventilación y el historial de carga reciente [17].
3. Relés que operan con una combinación de corriente y temperatura. Se debe tener cuidado para asegurarse de que no haya condiciones de operación que no puedan cubrirse con las combinaciones, cuando ambas son necesarias para la operación del relé. La corriente alta y la temperatura alta normalmente indican problemas, pero la corriente alta sin una temperatura alta medible, puede existir por sobrecalentamiento en el rotor, los cojinetes, por problemas de la transmisión y de los controladores o conexiones. Para estos casos, la combinación de corriente y temperatura puede proporcionar una protección limitada o nula.



**Figura 15.** Protección típica de sobrecarga, rotor bloqueado y falla para un motor [16].

Utilizar las corrientes de secuencia positiva y negativa en una ecuación relacionada con el calor generado dentro del motor permite proteger el motor en todo el rango de corriente del estator con y sin desequilibrio. La característica tiempo-corriente es como se muestra en la Figura 15 para un relé de protección de motor (MPR). Para asegurar una protección adecuada de rotor bloqueado, la posición de la curva se puede establecer ligeramente por debajo del tiempo de rotor bloqueado de voltaje completo. Dependiendo de la disponibilidad de RTD, el corte se puede configurar para proteger el motor durante una condición de sobrecarga. Un ajuste de corte típico sin RTD sería del 115 al 125% de la corriente a plena carga [16].

Para la configuración de este tipo de relés es necesario contar con varios datos del motor proporcionados por el fabricante y en el caso que no se los tenga, se puede calcularlos a través de las ecuaciones (6) y (7) [19]:

- *Constante de tiempo térmica del motor en frío.*

$$\sigma_{uf} = \frac{T_{rbf}}{60 \times \ln \left[ \frac{\left( \frac{I_{rbf}}{I_{nm}} \right)^2}{\left( \frac{I_{rbf}}{I_{nm}} \right)^2 - 1,1} \right]} \quad (6)$$

Donde:

- $T_{rbf}$  = tiempo del rotor bloqueado en frío, en s;
- $I_{rbf}$  - corriente del rotor bloqueado en frío, en A.
- $I_{nm}$  - corriente nominal del motor, en A.

- *Constante de tiempo térmica del motor en caliente.*

$$\sigma_{uf} = \frac{T_{rbq}}{60 \times \ln \left[ \frac{\left( \frac{I_{rbq}}{I_{nm}} \right)^2 - 1}{\left( \frac{I_{rbq}}{I_{nm}} \right)^2 - 1,1} \right]} \quad (7)$$

Donde:

- $T_{rbq}$  - tiempo del rotor bloqueado en caliente, en A;
- $I_{rbq}$  - corriente de rotor bloqueado en caliente, en A.

- *La constante numérica K.*

Este valor se obtiene dividiendo a el valor de la constante de tiempo de calentamiento térmico del motor considerado por el valor entero 10 [19].

#### *2.4.2.1.5 Sensores resistivos de temperatura (RTD)*

La temperatura del estator se puede obtener directamente de los sensores resistivos de temperatura incrustados en el aislamiento cerca de los conductores del devanado. Los sensores, conocidos como RTD, se colocan durante la construcción del motor. Los RTD tienen un coeficiente de resistencia - temperatura tipo lineal positivo. En consecuencia, una medición directa de la resistencia RTD, incluidos sus cables, se mide en un circuito puente y es convertido directamente a temperatura. Motores de 1500 hp y superiores suelen estar equipados con tres RTD, por devanado de fase, dos RTD para medir la temperatura del cojinete y un RTD para indicar la temperatura ambiente. Los tipos disponibles de RTD son: platino de 100 ohmios, níquel de 100 ohmios, níquel de 120 ohmios y cobre de 10 ohmios. Los RTD de fase adicional proporcionan redundancia.

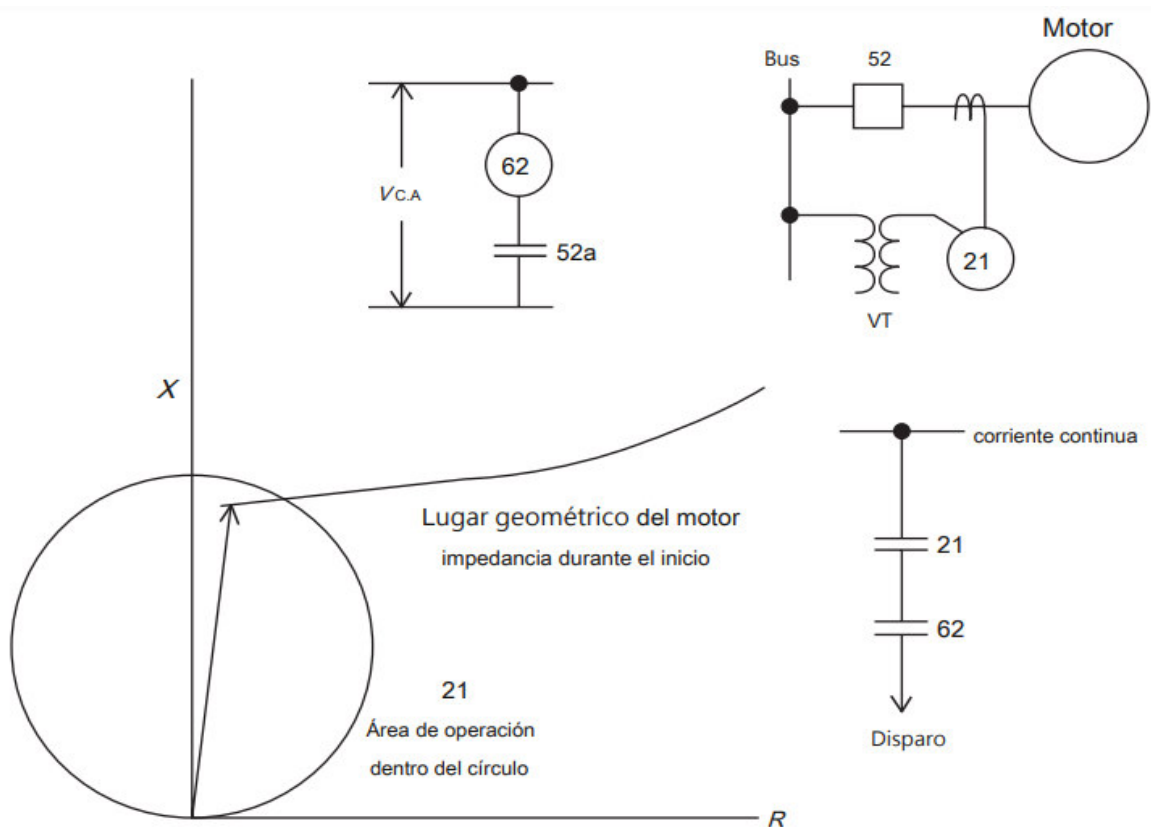
Los relés de microprocesador se adaptan a la medición de hasta 12 RTD y proporcionan un umbral de alarma y disparo por temperatura para complementar la protección de sobrecarga térmica sin embargo, responden demasiado lento para ser utilizados como la protección primaria de sobrecarga. Los RTD son particularmente útiles para detectar el sobrecalentamiento causado por ventilación obstruida y proporcionan la medición de temperatura directa cuando la temperatura del devanado aumenta más rápido de lo indicado por la corriente [18].

#### *2.4.2.1.6 Protección de rotor bloqueado para motores grandes (21)*

La corriente de rotor bloqueado permitida puede ser muy cercana o menor que la corriente de arranque, en general, esto ocurre con motores modernos muy grandes. La protección para esto puede ser un interruptor de velocidad cero integrado en el motor. Si el motor no acelera al energizarse, se abre el circuito de suministro. Las preocupaciones con el uso de este tipo de protección son que el motor podría arrancar y bloquearse a menos de la velocidad de carga completa; la otra preocupación es la dificultad de las pruebas y el mantenimiento [16], [17].

La protección para rotores bloqueados se puede obtener aplicando un relé de distancia. El relé se configura mirando hacia el motor. La relación entre el voltaje del sistema y la corriente de arranque es una impedancia, que se puede determinar y trazar como un vector en el diagrama R-X como se muestra en la Figura 16. A partir de un valor específico al inicio, aumenta en magnitud y cambia el ángulo de fase a medida que el motor acelera. El

relé de distancia 21 se establece de modo que su círculo operativo MHO encierre el vector de impedancia de rotor bloqueado. Cuando el motor se activa cerrando el disyuntor 52, el relé de distancia 21 funciona y el temporizador 62 se activa. Al usar un temporizador operado por CA, se obtiene un tiempo variable con voltaje para igualar los tiempos de rotor bloqueado más largos permitidos a un voltaje más bajo. La fuerte corriente de arranque puede hacer que el voltaje caiga momentáneamente durante el período de arranque. Si el inicio es exitoso, el fasor de impedancia se mueve fuera del círculo operativo 21 antes de que se cierre el contacto del temporizador 62. Si el inicio no tiene éxito, el vector de impedancia permanece en el círculo y cuando el temporizador 62 funciona, se inicia el disparo. El temporizador se configura según lo determinado por la curva de tiempo de rotor bloqueado permisible desde el voltaje total hasta aproximadamente el 75% o el 80% de voltaje. Esta protección no cubre la imposibilidad de acelerar a la velocidad máxima ni de arrancar con el motor aun en movimiento.



**Figura 16.** Conexión y operación de protección 21 para motores grandes [16].

#### 2.4.2.1.7 Protección de desequilibrio y rotación de fase

Hay varios controles disponibles para la detección de desequilibrio: (1) diferencias de magnitud entre las corrientes trifásicas y (2) la presencia de corriente de secuencia negativa (46D).

El tipo de balance de corriente (46) compara las magnitudes de la corriente de fase y opera cuando una corriente de fase es significativamente diferente en magnitud de cualquiera de las otras dos corrientes de fase. Esta es una protección muy efectiva para que los alimentadores de motor individuales detecten fases abiertas o desequilibrios en ese circuito. Si el circuito al que está conectada esta protección suministra otras cargas, se debe tener cuidado para asegurar que cualquier fase abierta o desequilibrio no sea camuflado por la corriente balanceada a plena carga. Se debe aplicar un relé para cada carga o alimentador. La sensibilidad mínima típica de estos relés es de aproximadamente 1 A en una fase con corriente cero en la otra o 1,5 en el sistema por unidad (pu) en una fase y 1 pu en la otra.

Otro tipo de esquema de protección responde a la corriente de secuencia negativa (46D), ya sea instantáneamente, con un retraso de tiempo fijo agregado o siguiendo la característica de la ecuación (8):

$$I_2^2 \times t = K \quad (8)$$

Estos tipos de relé (46D) no se aplican generalmente para la protección de motores [16]. Además, un relé de desequilibrio de fase puede proteger hasta cinco motores conectados a un solo alimentador, dependiendo de cómo se operen los motores y sus cargas relativas. Por ejemplo, el relé no funcionará, si un motor que opera con una quinta parte de la carga total del alimentador no está funcionando, pese a que el resto de los motores estén a plena carga [17].

#### 2.4.2.1.8 Protección de baja tensión

El bajo voltaje en un motor da como resultado alta corriente y falla al arrancar, para alcanzar la velocidad nominal. Muy a menudo, la protección para baja tensión se incluye como parte del arrancador del motor, pero se recomienda que se dispare un relé de baja tensión de tiempo inverso (27) cuando existe una baja tensión prolongada y como respaldo [16].



#### *2.4.2.1.9 Transferencia y recierre de barra.*

Cuando los motores, ya sean de inducción o síncronos, se vuelven a energizar antes de que hayan dejado de girar, pueden producirse pares transitorios elevados, con posibles daños o destrucción. Esto puede ocurrir cuando se realiza una transferencia rápida de motores desde una barra que ha perdido voltaje a una barra auxiliar activa. Tales transferencias son necesarias para mantener encendidos los servicios auxiliares que abastecen a grandes plantas generadoras o procesos industriales críticos.

La mayoría de las experiencias indican que muchas fallas en alimentadores son transitorias, como resultado de la inducción de rayos, el viento o el contacto con árboles. Como la empresa distribuidora está ansiosa por restablecer el servicio rápidamente a sus clientes, utiliza frecuentemente un reenganche de alta velocidad (alrededor de 0,20–0,60 s) y, por lo tanto, vuelve a energizar los motores, con posibles daños.

Los límites de seguridad para la reconexión de motores son complejos. Si la transferencia rápida es obligatoria, se debe prestar especial atención a esto durante la etapa de diseño, de lo contrario, la mejor política es retrasar las reconexiones que vuelven a energizar los motores de inducción o asegurarse de que los motores se desconecten rápidamente del sistema.

Para los motores de inducción, la reenergización no debe ocurrir hasta que el voltaje del motor haya caído al 33% o menos de valor nominal. Para motores síncronos, no se debe permitir la reenergización hasta que se pueda efectuar una resincronización adecuada. Esto significa abrir el suministro del motor rápidamente en caso de pérdida de suministro. Un medio eficaz para abrir el disyuntor de suministro en estas condiciones es la aplicación de un relé de baja frecuencia. El ajuste típico del relé de baja frecuencia (81) sería del 98% al 97% del valor nominal, con tiempo para anular los efectos de caída momentánea de voltaje, pero antes de que pueda tener lugar la reenergización. Si la planta tiene generación local, o hay otros vínculos con la generación del alimentador de suministro, se debe tener cuidado para garantizar que la frecuencia disminuya al perder el alimentador. La generación suficiente para mantener la carga, particularmente en períodos de carga ligera, da como resultado un cambio de frecuencia insignificante [16].

#### *2.4.2.1.10 Protección de arranques repetitivos y jogging*

Arrancar motores repetidamente con un tiempo insuficiente entre arranque, o hacerlos funcionar con variaciones extremas de carga (jogging), puede resultar en altas temperaturas del motor. Es posible que una temperatura alta siga a un pico de carga de corta duración con una carga de corriente baja subsiguiente en operación normal y no exceda los límites del motor. Los termistores en motores más pequeños y una unidad de sobrecarga térmica integrada que responde al calentamiento total para motores más grandes proporcionan un medio de protección. Se han utilizado relés (49) que funcionan tanto con sobrecorriente como con sobretemperatura. Una temperatura alta sin sobrecarga o una sobrecarga alta sin temperatura alta pueden no provocar su funcionamiento. La aplicación de esta protección requiere un análisis cuidadoso del motor, considerando que las unidades del microprocesador pueden también monitorear esto de manera efectiva [17].

#### *2.4.2.1.11 Protección de sobrecarga*

Las curvas de calentamiento son difíciles de obtener y varían considerablemente con el tamaño y el diseño del motor. Además, estas curvas son un promedio aproximado de una imprecisa zona térmica, en la que diversos grados de daño puede traducirse en la reducción de la vida útil del aislamiento. Es difícil entonces que cualquier diseño de relé se aproxime a estas curvas adecuadamente en el rango de sobrecargas sostenidas leves a sobrecargas severas de rotor bloqueado.

Los relés de sobrecarga térmica ofrecen una buena protección para sobrecargas ligeras y medias (de larga duración), pero no pueden para sobrecargas pesadas. El relé de sobrecorriente de inducción de larga duración ofrece una buena protección para las sobrecargas pesadas, pero sobreprotege para sobrecargas ligeras y medianas. Una combinación de dos dispositivos proporciona una protección térmica completa [17].

### **2.4.3 RELÉS COMERCIALES DE PROTECCIÓN PARA MOTORES**

### 2.4.3.1 ABB

#### 2.4.3.1.1 Relé REM 630

El REM630 es un relé integral para gestión de motores que permite la protección, control, medición y supervisión de motores asíncronos y síncronos de tamaño mediano y grande en la industria manufacturera [21].



Figura 17. RELÉ REM 630 [21].

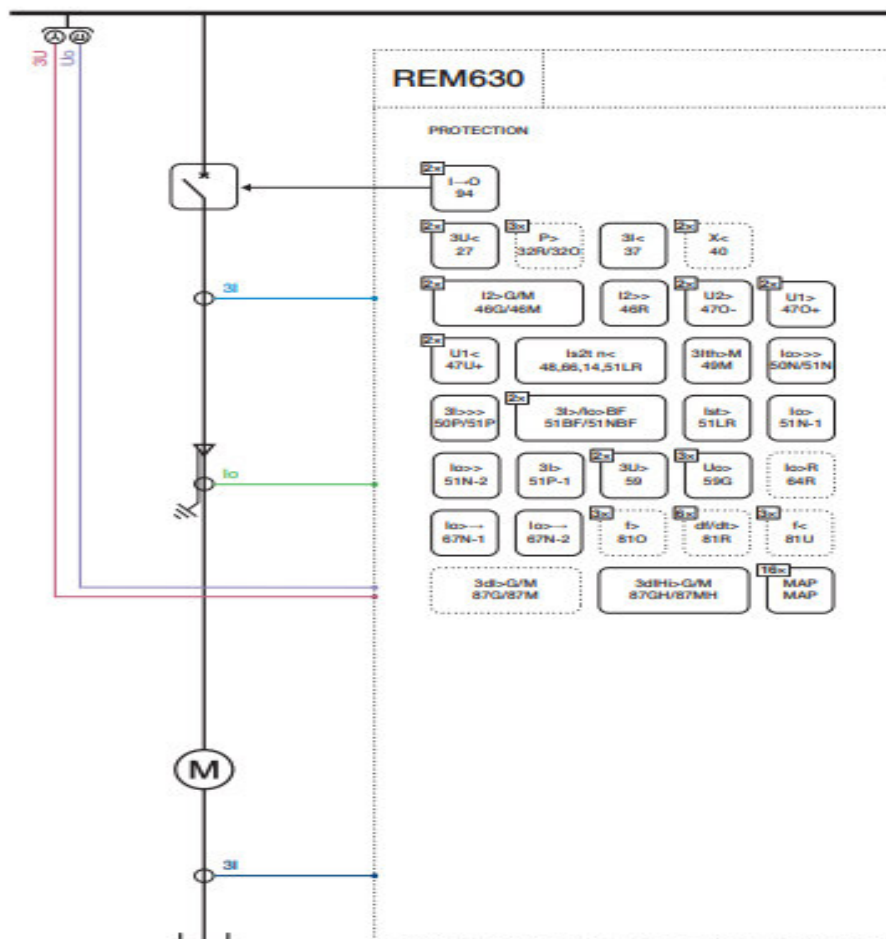


Figura 18. Esquema de protecciones Relé REM630 [22].

#### 2.4.3.1.2 Funciones

**Tabla 3.** Lista de protecciones relé ABB REM630.

<b>Número</b>	<b>Funciones de Protección</b>
50/51	Sobre corriente temporal e instantáneo
67	Relé direccional de sobre corriente
51V	Protección contra sobrecorriente restringida por voltaje
49F	Relé térmico para líneas
49T/G	Relé térmico para transformador
51L/R	Protección contra sobrecorriente con load jam
37	Relé de mínima potencia
49M	Relé térmico para motores
48	Relé de secuencia incompleta
66	Arranque repetitivo
14	Relé de rotor bloqueado
51N/50N	Sobre corriente temporal e instantáneo para neutro
67N	Relé direccional de sobre corriente para neutro
21YN	Protección de falla a tierra direccional y de sobrecorriente no direccional
64R	Relé protector de contacto a tierra para rotor.
51NHA	Protección contra sobrecorriente para armónicos.
32N	Relé direccional de potencia para neutro
27/59THD	Relé de falla a tierra del estator 100% (basado en el 3er armónico).
67YN	Protección de falla a tierra basado en admitancia multifrecuencia
87T	Relé de protección diferencial para transformador
87NL	Relé de protección diferencial de baja impedancia
87NH	Relé de protección diferencial de alta impedancia
87G	Relé de protección diferencial para generador
87M	Relé de protección diferencial para motor
87GH	Protección diferencial basada equilibrio de flujo o de alta impedancia
46	Relé de corriente para inversión o equilibrio de fases
46PD	Relé de protección para discontinuidad de fase
46R	Relé de protección para fase inversa
46G/46M	Protección de sobrecorriente de secuencia negativa para máquinas
59	Relé de máxima tensión
27	Relé de mínima tensión
59G	Protección de sobretensión residual
47O +	Protección de sobretensión secuencia positiva
47O -	Protección de sobretensión secuencia negativa
47U +	Protección de subtensión secuencia positiva
24	Protección contra sobreexcitación

78V	Protección de cambio de vector de voltaje
27RT	Función de protección a través de un paseo de bajo voltaje
81 O	Relé de sobre frecuencia
81U	Relé de baja frecuencia
81R	Protección de gradiente de frecuencia
81LSH	Desconexión de carga
21,21P,21N	Protección de distancia
40	Protección de subexcitación trifásica
21GT	Protección de subimpedancia trifásica
32R/32 O	Protección de potencia inversa / sobrepotencia direccional
32U	Protección de baja potencia
32Q	Protección de potencia reactiva
68	Detección de corriente inrush trifásica
94	Lógica de disparo
85	Esquema lógico de comunicación.

### 2.4.3.2 SCHNEIDER

#### 2.4.3.2.1 Relé Easergy MiCOM P24x

Easergy MiCOM P24x es un relé que ofrece numerosas funciones adicionales para protección, monitoreo, diagnóstico, herramientas de análisis de fallas y ayudas para el mantenimiento, que lo hacen adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Son compactos y especialmente desarrollados y diseñados para máquinas rotativas. Los relés P24x desempeñan un papel fundamental en muchos procesos industriales y de generación con las siguientes exigencias:

- Máquinas rotativas de tamaño mediano y grande
- Máquinas de alta inercia
- Protección diferencial
- Amplia gama de corrientes y tiempos de arranque y parada
- Amplia gama de resistencia térmica en condiciones equilibradas o desequilibradas [23]



Figura 19. Relé Easergy MiCOM P241

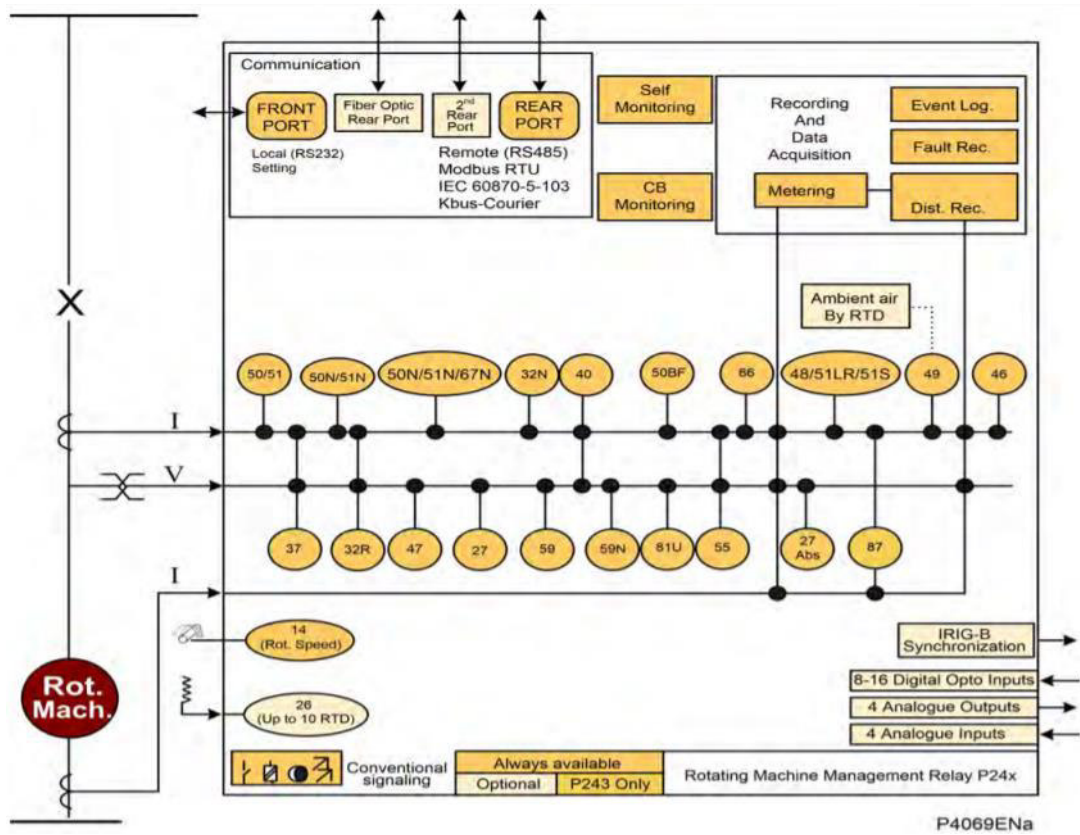


Figura 20. Diagrama de protecciones para relé Easergy MiCOM P24x

#### 2.4.3.2.2 Funciones

Tabla 4. Lista de protecciones relé Easergy MiCOM P241

Número	Funciones de Protección	P24x
87	Relé de protección diferencial.	P243

50/51	Relé de cortocircuito, relé temporizado de máxima corriente	P241/ P242/ P243
50N/51N	Relé de cortocircuito a tierra, relé temporizado de máxima corriente a tierra	P241/ P242/ P243
50N/51N/67N	Relé de cortocircuito a tierra, relé temporizado de máxima corriente a tierra, relé direccional de máxima corriente a tierra.	P241/ P242/ P243
32N/64N	Relé direccional de potencia, relé protector de contacto a tierra	P241/ P242/ P243
32R	Relé protección de potencial invertida	P241/ P242/ P243
37	Relé de mínima potencia	P241/ P242/ P243
40	Relé de corriente de campo	P241/ P242/ P243
49	Relé térmico de máquina	P241/ P242/ P243
46	Relé de corriente para inversión o equilibrio de fases	P241/ P242/ P243
55	Relé de factor de potencia	P241/ P242/ P243
59N	Relé de máxima tensión homopolar	P241/ P242/ P243
27	Relé de mínima tensión	P241/ P242/ P243
59	Relé de máxima tensión	P241/ P242/ P243
47	Relé voltimétrico de secuencias de fases	P241/ P242/ P243
81U	Relé de protección contra infrafrecuencia	P241/ P242/ P243
48/51LR	Relé de protección de arranque prolongado del motor	P241/ P242/ P243
14	Dispositivo de subvelocidad	P241/ P242/ P243
50S	Protección de fallo de interruptor	P241/ P242/ P243
66	Relé a impulso - (protección contra arranques sucesivos)	P241/ P242/ P243
27 (remanent)	Protección de mínima tensión remanente	P241/ P242/ P243
RTD	Sensor de Temperatura	-
50BF	Protección de falla del interruptor	P241/ P242/ P243
VTS	Transformador para supervisión de voltaje	P241/ P242/ P243
CTS	Transformador para supervisión de corriente	P241/ P242/ P243

### 2.4.3.3 SEL

#### 2.4.3.3.1 Relé SEL-849

El SEL-849 es un producto versátil apto para aplicaciones industriales y de empresas suministradoras de energía. Ofrece protección de motor basada en la corriente, el voltaje y la temperatura; protección de alimentador basada en la corriente y el voltaje; detección de arco eléctrico; y medición de potencia [24].



Figura 21. Relé SEL-849 [24].

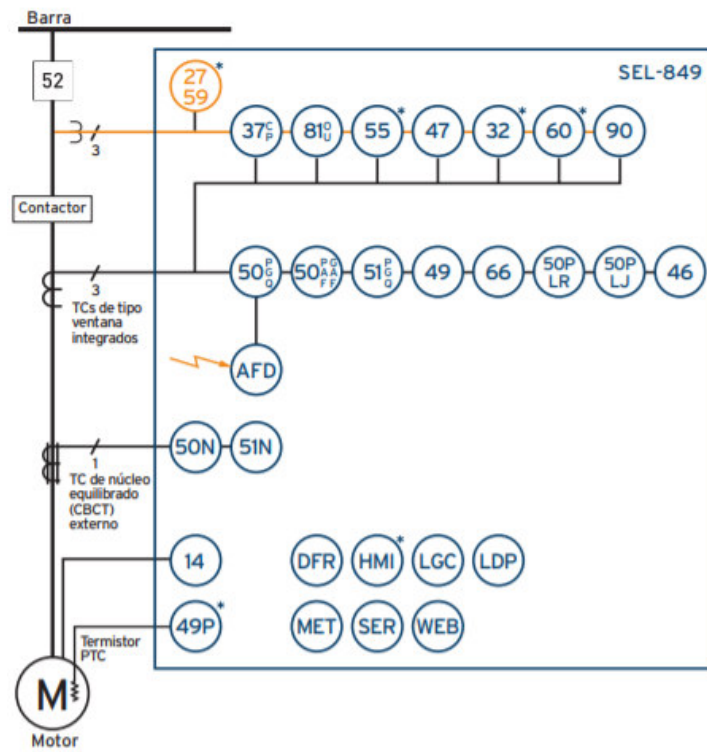


Figura 22. Diagrama de protecciones para relé SEL-849 [25].

#### 2.4.3.3.2 Funciones

Tabla 5. Lista de protecciones relé SEL-849

Número	Funciones de Protección
14	Interruptor de velocidad
27	Bajo voltaje*



32	Potencia direccional*
37C	Baja corriente
37P	Baja potencia*
46	Desbalance de corriente
47	Inversión de fase
49	Modelo térmico
49P	Sobret temperatura PTC
50G AF	Sobrecorriente residual de arco eléctrico
50N	Sobrecorriente neutral
50P AF	Sobrecorriente de fase de arco eléctrico
50 (P, G, Q)	Sobrecorriente (fase, tierra, secuencia negativa)
50P LJ	Atascamiento de carga
50P LR	Rotor bloqueador
51N	Sobrecorriente de tiempo inverso de neutro
51 (P, G, Q)	Sobrecorriente-tiempo (fase, residual, secuencia negativa)
55	Factor de potencia*
59	Sobrevoltaje de fase*
60	Pérdida de potencial*
66	Arranques por hora
81 (O, U)	Sobre/baja frecuencia*
90	Control de carga
Funciones adicionales	
AFD	Detector de arco eléctrico
CC	Recubrimiento de protección*
DFR	Reportes de eventos-arranque del motor, estadísticas de operación del motor, Registrador de eventos secuenciales (SER)
IHM	Interfaz del operador*
LDP	Perfil de datos de carga
LGC	Ecuaciones de control SELOGIC *****
MET	Medición-tensión y corriente RMS, frecuencia, potencia, factor de potencia, energía, máxima/mínima, térmica, capacidad térmica usada
SER	Registrador de eventos secuenciales
VFD	Admite tracción de frecuencia variable
WEB	Servidor web

\*Característica opcional

### 2.4.3.4 SIEMENS

#### 2.4.3.4.1 RELÉ Reyrolle 7SR57

Los dispositivos de protección de motores 7SR57 incluyen una amplia gama de funciones de protección y comunicaciones Ethernet IEC 61850. Para minimizar aún más las variantes del producto, la fuente de alimentación y las entradas binarias cubren todo el rango operativo con umbrales configurables de entradas binaria [26].



Figura 23. Relé Reyrolle 7SR57.[27]

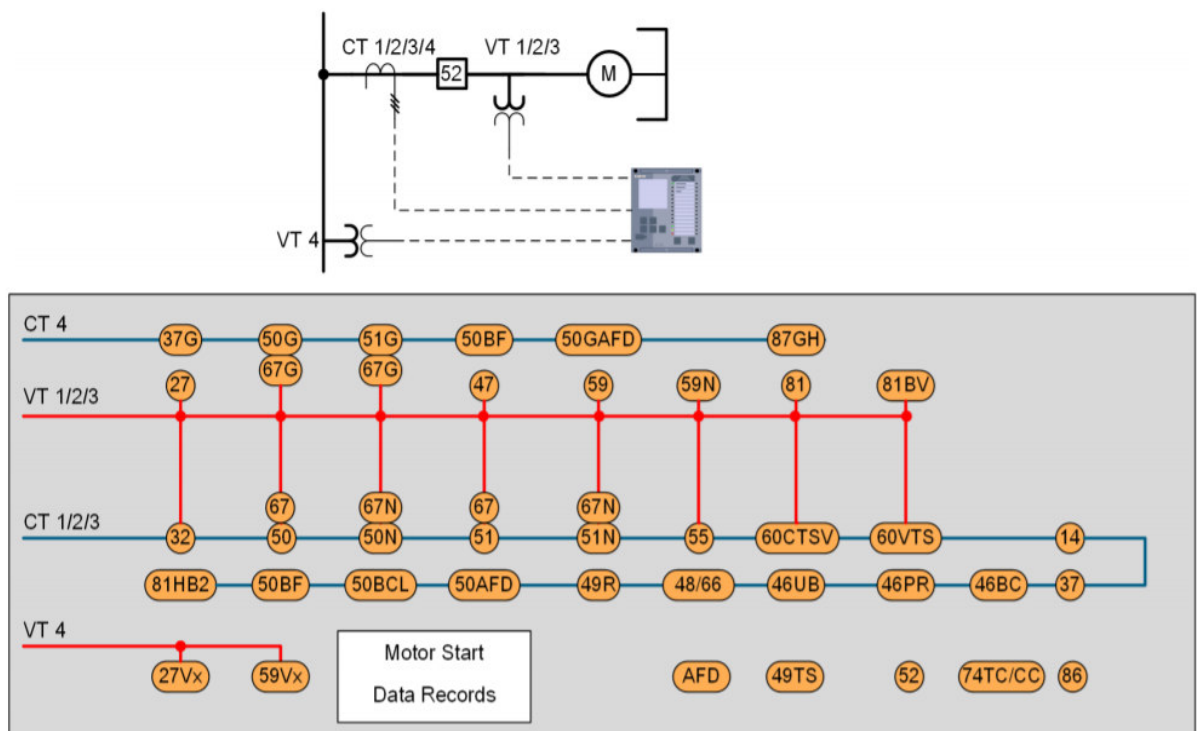


Figura 24. Diagrama de protecciones para relé Reyrolle 7SR57. [27]

#### 2.4.3.4.2 Funciones

**Tabla 6.** Lista de protecciones relé Reyrolle 7SR57

<b>Número</b>	<b>Funciones de Protección</b>
14	Protección de roto bloqueado
37/37G	Protección de subcorriente- fase/ tierra
46BC	Detección de conductor roto
46PR	Inversión de rotación de fase
46UB	Desequilibrio de fase
48	Supervisión de hora de inicio
49R	Protección de sobrecarga térmica del rotor
49TS	Supervisión del sensor de temperatura (requiere una unidad RTD)
50/50G/50N	Sobrecorriente instantánea / falla a tierra
50AFD	Detección de arco eléctrico (requiere componentes externos)
50BCL	Límite de capacidad de ruptura
50BF	Protección contra falla del interruptor automático- 3 polos
51/51G/51N	Sobrecorriente retardada / falla a tierra
52	Control de disyuntor
60 CTS/CT	Supervisión
66	Número de arranques
74CC/74TC	Supervisión de circuito cerrado y circuito de disparo
81B	Monitor de retroceso
81HB2	Detección de corriente de irrupción
86	Bloqueo
87GH	Protección de falla a tierra restringida- alta impedancia
Funciones opcionales	
27/27Vx	Protección de subvoltaje
32	Protección de energía
47	Secuencia de protección contra sobrevoltaje
55	Factor de potencia
59/59Vx	Protección contra sobrevoltaje
59N	Desplazamiento de voltaje neutro
60VTS VT	Supervisión
67/67G/67N	Direccional- falla de fase / tierra
81	Protección de frecuencia – “f >” o “f <”
81 B-V	Monitor de retroceso- referencia de voltaje
Funciones de monitorización	

Primaria, secundaria, secuencia de fases, corriente y voltaje
Frecuencia, potencia y energía
Registros de datos de fallas, eventos y formas de onda
Registro de datos de arranque del motor

### 2.4.3.5 GE

#### 2.4.3.5.1 RELÉ Multilin M60

El sistema de protección de motores M60 ofrece soluciones integrales de protección y control para motores trifásicos de tamaño mediano a grande. El M60 proporciona protección, control y diagnóstico que incluyen modelo térmico con RTD y polarización de desequilibrio de corriente, diferencial de estator, potencia inversa y de avance, módulo RTD externo, motores de dos velocidades, arranque a voltaje reducido, detección de barra de rotor rota y más [28].



Figura 25. Relé Multilin M60 [28].

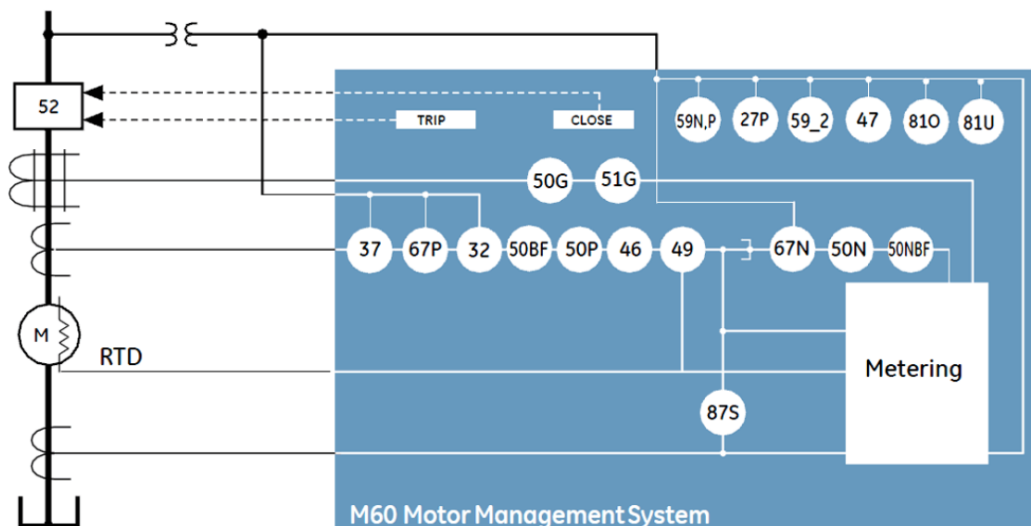


Figura 26. Diagrama de protección para relé Multilin M60 [28].

#### 2.4.3.5.2 Funciones

**Tabla 7.** Lista de protecciones relé Multilin M60

<b>Número</b>	<b>Funciones de Protección</b>
27P	Subvoltaje de fase
27X	Subvoltaje auxiliar
32	Potencia direccional sensible
37	Baja potencia
46	Desequilibrio actual
47	Voltaje de secuencia de fase
49	Sobrecarga térmica
50BF	Fallo del disyuntos
50G	Sobrecorriente instantánea de tierra
50N	Sobrecorriente instantánea neutra
50P	Sobrecorriente instantánea de fase
51G	Sobrecorriente de tiempo de tierra
59N	Sobrevoltaje neutro
59P	Sobrevoltaje de fase
59X	Sobrevoltaje auxiliar
59_2	Sobrevoltaje de secuencia negativa
66	Arranques por hora, tiempo entre arranques
67N	Sobreintensidad direccional neutra
67P	Sobrecorriente direccional de fase
87S	Diferencial del estator
81O	Sobrefrecuencia
81U	Infrafrecuencia
-	Atasco mecánico
--	Baja potencia

## 2.5 COMPARACIÓN FUNCIONES DE PROTECCIÓN DE LAS DIFERENTES MARCAS.

<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>ABB</b>	<b>GE</b>
14	14	87	50/51	27P

<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>ABB</b>	<b>GE</b>
27	37/37G	50/51	67	27X
32	46BC	50N/51N	51V	32
37C	46PR	50N/51N/67N	49F	37
37P	46UB	32N/64N	49T/G	46
46	48	32R	51L/R	47
47	49R	37	37	49
49	49TS	40	49M	50BF
49P	50/50G/50N	49	48	50G
50G AF	50AFD	46	66	50N
50N	50BCL	55	14	50P
50P AF	50BF	59N	51N/50N	51G
50 (P, G, Q)	51/51G/51N	27	67N	59N
50P LJ	52	59	21YN	59P
50P LR	60 CTS/CT	47	64R	59X
51N	66	81U	51NHA	59_2
51 (P, G, Q)	74CC/74TC	48/51LR	32N	66
55	81B	14	27/59THD	67N
59	81HB2	50S	67YN	67P
60	86	66	87T	87S
66	87GH	27 (remanent)	87NL	81O
81 (O, U)	27/27Vx		87NH	81U
90	32		87G	
	47		87M	
	55		87GH	
	59/59Vx		46	

<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>ABB</b>	<b>GE</b>
	59N		46PD	
	60VTS VT		46R	
	67/67G/67N		46G/46M	
	81		59	
	81 B-V		27	
			59G	
			47O +	
			47O -	
			47U +	
			24	
			78V	
			27RT	
			81 O	
			81U	
			81R	
			81LSH	
			21,21P,21N	
			40	
			21GT	
			32R/32 O	
			32U	
			32Q	
			68	
			94	
			85	

## CAPÍTULO 3

### 3. GUÍA DE PROTECCIÓN DE MOTORES DE ALTO VOLTAJE Y ALTA POTENCIA.

#### 3.1 PROTECCIONES RECOMENDADAS Y PROTECCIONES DE LOS RELÉS COMERCIALES.

La metodología que se siguió para seleccionar las protecciones de motores de alto voltaje y gran potencia se basa en la comparación entre las protecciones recomendadas en estándares técnicos y libros especializados con aquellas funciones de protección disponibles en relés comerciales. Se recomiendan las siguientes funciones:

- ✓ Protección de rotor bloqueado (14)
- ✓ Protección de subtensión (27)
- ✓ Desbalance de corriente (46)
- ✓ Protección de sobrecarga o térmica (49)
- ✓ Protección de sobrecorriente (50,51)
- ✓ Protección de fallas a tierra (50G, 50N, 51N)
- ✓ Protección contra arranques repetitivos (66)
- ✓ Protección de baja frecuencia (81)
- ✓ Protección diferencial (87)

#### 3.2 PARAMETRIZACIÓN SELECCIONADA

**Tabla 8.** Parametrización de protecciones

<b>Función</b>	<b>Configuración Típica</b>	<b>Observación</b>
14	Configuración de corriente 1/2 rotor bloqueado. El tiempo de actuación para la protección debe estar cercano al tiempo de arranque del motor.	Si no se dispone de protección rotor bloqueado, se puede aplicar esta configuración a un relé 51 cuando el tiempo de inicio es de 20



<b>Función</b>	<b>Configuración Típica</b>	<b>Observación</b>
	Se deberá aplicar una curva de tiempo definido.	a 70 segundos para poder tener esta protección.
27	Bajo voltaje: 75 a 80% El tiempo de actuación para la protección debe estar cercano al tiempo de arranque del motor. Se deberá aplicar una curva de tiempo definido	Protección bajo voltaje, secuencia de fase, y desbalance de voltaje.
46	Diferencia de 0,5 pu en fase o una configuración de 0,16 pu en secuencia negativa. El tiempo de actuación para la protección debe ser instantáneo.	Protección contra desbalance de corriente.
49	Se recomienda el uso de RTD configurando la temperatura máxima de operación del motor y la actuación debe ser instantánea.	Protección de sobrecarga: ventilación bloqueada o temperatura ambiente alta.
50	Se debe establecer 2 veces corriente de rotor bloqueado. El tiempo de actuación para la protección debe ser instantáneo.	Protección contra fallas.
50G	La configuración de corriente será de: 0,15 A. El tiempo de actuación para la protección debe ser instantáneo.	Usar con un TC 50/5 BYZ.
51	La configuración debe ser mayor a corriente de rotor boqueado (1,15 a 1,25 veces). El tiempo de actuación para la protección debe ser entre 5 y 6 segundos. Se deberá aplicar una curva de tiempo definido	Protección sobrecorriente temporizada.
50N/51N	la corriente de pickup debe ser: 0,5 A. Con un tiempo de actuación de 0,1 s. Se deberá aplicar una curva de tiempo definido	Proporciona protección de neutro.
66	Máximo 5 arranques en frio	Protección de arranques repetitivos
81	La configuración debe ser del 98.3% de frecuencia nominal.	Protección contra caídas de frecuencia.

Función	Configuración Típica	Observación
	El tiempo de actuación para la protección debe ser instantáneo.	
87	La configuración de corriente debe ser :0,15 A. El tiempo de actuación para la protección debe ser instantáneo.	Proporciona fase y protección de tierra. Utilizar tres transformadores BYZ 50:5. 50G es necesario para protección de cable si BYZ está en el motor

### 3.3 PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES EN RELÉS COMERCIALES.

Para la parametrización de las protecciones se utilizarán los datos básicos que tiene la placa del motor y las hojas de datos que entregan los fabricantes, que según la referencia [29] son:

- Potencia del motor en HP
- Voltaje nominal
- Número de fases
- Velocidad del motor a plena carga
- Factor de servicio.
- Frecuencia.
- Corriente nominal a plena carga
- Corriente de rotor bloqueado
- Clase de aislamiento
- Temperatura ambiente.
- Subida de temperatura a un factor de servicio = 1.0
- Subida de temperatura a un factor de servicio = 1.5
- Tiempo de aceleración.
- Tiempo de bloqueo seguro del rotor bloqueado en frío.
- Tiempo de bloqueo seguro del rotor bloqueado en caliente.

- Arranques máximos por hora
- Arranques consecutivos en frío y caliente.
- Constante de tiempo de enfriamiento en funcionamiento en minutos.

En la Tabla 9 se muestra la parametrización y comparativa de las diferentes funciones de protección para de los distintos relés comerciales que se puede encontrar en el mercado.

**Tabla 9.** Parametrización de funciones de relés comerciales.

	<b>ABB</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>
<b>14</b>	Incluida en 66	(NECESITA UN INTERRUPTOR 52 a) START CRITERIA: 52 a STARTING CURRENT: $0,5 * I$ rotor bloqueado [A] PROTECTION START TIME: tiempo de arranque [s]. STALL ROTOR-STR: Enable	Incluida en 49.	SETTING: $0,5 * I$ rotor bloqueado [A] DELAY: tiempo de arranque [s] CONTROL: RUNNING (para FVD) / NONE (otro tipo de arranque)
<b>27</b>	STAR VALUE: 0.75 [pu] OPERATING CURVE TIME: IEC-Def time OPERATE DELAY TIME: tiempo de arranque [s]	(NECESITA UN INTERRUPTOR 52 a) V<1 FUNCTION: DT V<1 VOLTAGE SET: $0,75 * VN$ [V] TIME DELAY: tiempo de arranque [s] MEASUR'T MODE: phase-phase	27PP1P: $0.75 * VN$ 27PP1D: tiempo de arranque [s]	IMPUT SELECTION: Ph-Ph UV GUARD SETLING: 5V SETTING: 75% DELAY: tiempo de arranque [s]
<b>46</b>	START VALUE: 0.166 [pu] MACHINE TIME MULTI PLAYER: 1 OPERATING CURVE TIPE: IEC-Def time	CURRENT SET: $0.166 * INA$ [A] DELAY: 200 [ms]	46UBT: 28,6% 46UBTD: tiempo de arranque [s]	TYPE: NPS SETTING: $0,1666 * IN$ DELAY: 5 [s] MIN OPERATE TIME: 1 [s]

	<b>ABB</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>
	OPERATE DELAY TIME: 0.04 [s]			
<b>49</b>	<p>EnV TEMPERATURE MODE: FLC ONLY</p> <p>EnV TEPERATURE SET: (temperatura ambiente donde opera el motor)</p> <p>ALARM TERM VALUE: (dato de placa)</p> <p>OVERLOAD FACTOR: 1.05</p> <p>WEIGHTING FACTOR p: 50 en arranque directo, 100 para otros arranques.</p> <p>TIME CONSTANT: dato de placa o poner 1050 [29]</p>	<p>ITHCURRENT SET: 1 * IN [A]</p> <p>K COEFFICENT: THERMAL CONSTANT/10</p> <p>THERMAL CONSTANT: DATO DE PLACA</p>	<p>OLPU: 1,15*FLA</p> <p>THERMAL METHOD: CURVE</p> $CURVE < \frac{\text{Locked rotor Amps}^2 \times \text{Safe Stall Time, Hot in Seconds}}{FLA \times 36 \times 2.8}$	<p>MEASUREMENT: Averange</p> <p>NPS WEIGHTING FACTOR (k): 3</p> <p>I THETA THERMAL OVERLOAD: 1.05*IN</p> <p>MOTOR START CURRENT: I rotor bloqueado [A]</p>
<b>50</b>	<p>START VALUE: 2* I rotor bloqueado [pu]</p> <p>OPERATE DELAY: 0.02 [s].</p>	Incluida en 51.	<p>50P1P: 2* I rotor bloqueado [A]</p> <p>50P1D: 0.1 [s].</p>	<p>SETTING: 2* I rotor bloqueado [A]</p> <p>DELAY: 0 [s]</p>
<b>50G</b>	No tiene esta protección.	No tiene esta protección.	<p>50G1P: 0.15 [A]</p> <p>50G1D: 0.2 [s].</p>	<p>SETTING: 0,15 [A]</p> <p>DELAY: 0.5 [s]</p>
<b>50N</b>	Incluida en 51N	Incluida en 51N	<p>50N1P: 0.5 [A]</p> <p>50N1D: 0.1 [s].</p>	<p>SETTING: 0.5 [A]</p> <p>DELAY: 0.1 [s]</p>
<b>51</b>	<p>START VALUE: 1,15* I rotor bloqueado [pu]</p>	<p>FUNTION: IEC S INVERSE</p> <p>DELAY: 10[ms].</p>	<p>51P1P: 1,15* I rotor bloqueado [A]</p> <p>51P1C: C1</p>	<p>SETTING: 1,15 * I rotor bloqueado [A]</p>

	<b>ABB</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>
	TIME MULTIPLIER: 1 OPERATING CURVE TYPE: IEC Def time OPERATE DELAY TIME: 5 o 6 [s].	CURRENT SET: 1,15* I rotor bloqueado [A] TIME DIAL: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{2 \times Irb}{1,15 \times Irb} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$	51P1TD: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{2 \times Irb}{1,15 \times Irb} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$	CHAR: IEC-NI TIME MULT: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{2 \times Irb}{1,15 \times Irb} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$ DELAY: 10 [ms]
<b>51N</b>	START VALUE: 0,5 [A] TIME MULTIPLIER: 1 OPERATING CURVE TYPE: ANSI Def time OPERATE DELAY TIME: 0.1 [s]	FUNTION: IEC S INVERSE CURRENT: 0,5 [A] DELAY: 10 [ms]. TIME DIAL: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{0,55}{10,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$ Pol.TYPE: NEG SEQUENCE	51N1P: 0.5 [A] 51N1C: C1 51N1TD: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{0,55}{10,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$	SETTING: 0.5 [A] CHAR: IEC-NI TIME MULT: $TMS = \frac{0,1 \times \left[ \left( \frac{0,55}{10,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$ DELAY: 10 [ms]
<b>66</b>	MOTOR START-UP: 0,5 * I rotor bloqueado [pu] MOTOR START-UP TIME: tiempo de arranque del motor [s]. LOCK ROTOR TIME: 10 [s].	SETEAR EL NUMERO DE ARANQUES EN FRIJO Y EN CALIENTE (MAXIMO 5)	MAX START: número de arranques. MINIMUM TIME BETWEEN STARTS: depende de aplicación del motor.	SETEAR NUMERO DE ARANQUES

	<b>ABB</b>	<b>SCHNEIDER</b>	<b>SEL</b>	<b>SIEMENS</b>
			MINIMUM MOTOR STOPPED TIME: depende de aplicación del motor.	
<b>81</b>	START VALUE: $0,983 \cdot f_N$ [Hz] OPERATE DELAY TIME: 0.08	(NECESITA UN INTERRUPTOR 52 a) $f < 1$ STATUS: IMDT $f < 1$ SETTING: $0,983 \cdot f_N$ [Hz]	81D1TP: $0,98333 \cdot f_N$ [Hz] 81D1TD: 1.0 [s]	OPERATION: UNDER SETTING: $0,98333 \cdot f_N$ [Hz] HYSTERESIS: 0.1% DELAY: 1 [s].
<b>87</b>	HIDE OPERATE VALUE: 1 rotor bloqueado [%] LOW OPERATE VALUE: $0,15 / I_n$ [%] SLOPE SECTION 2: 20 END SECTION 1: 50 END SECTION 2: 150	DIFFIS1: 0.15 [A]	No tiene esta protección.	No tiene esta protección.
<b>RTD</b>	No tiene esta función.	SELECT RTD: # de bits RTD TRIP SET: temperatura máxima [°C]	No tiene esta función.	TEMP INPUT TRIP: temperatura máxima del motor.

## 3.4 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES.

### 3.4.1 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN.

Para el desarrollo de la herramienta computacional se utilizó el software Matlab y la aplicación App Designer, que permite el diseño y programación de aplicaciones. Para la elaboración de la herramienta se plantea un diseño simple e intuitivo con checkboxes, dropdowns, campos numéricos para entrada de datos, cuadros de texto y un botón de inicio, además de mensajes de error o advertencias a través de ventanas emergentes, esto facilita el uso de la herramienta.

Para la programación de la herramienta, se tomaron en cuenta las marcas comerciales de los relés consultadas, sus funciones de protección y la parametrización propuesta, donde el usuario ingresará los datos básicos del motor, que se han indicado en la sección 3.3 de este documento.

El manual de usuario de la herramienta se encuentra en el ANEXO 1.

### 3.4.2 FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta computacional consta de 1 sola pantalla donde se ingresan los datos del motor, se seleccionan las funciones de protección que se desea parametrizar, se selecciona la marca del relé y el tipo de arranque del motor.

**PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES PARA MOTORES**

MARCA	ABB	CORRIENTE NOMINAL	226 A.Prim	RELACIONES DE TRASFORMACIÓN	
TIPO DE ARRANQUE	ARRANQUE DIREC...	FRECUENCIA	60 Hz	PRIMARIO	SECUNDARIO
TIEMPO DE ARRANQUE	5 s	VOLTAJE	13200 V.Prim	TC	0 5 A
		CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO	1205 A.Prim	TP	0 120 V
				TIEMPO DE PARADA SEGURO EN CALIENTE	23 s

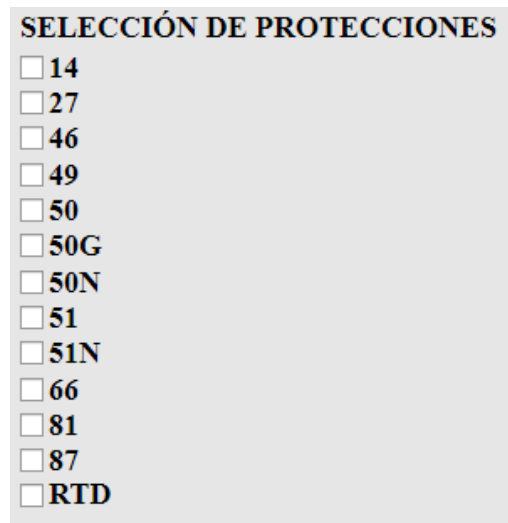
**SELECCIÓN DE PROTECCIONES**

- 14
- 27
- 46
- 49
- 50
- 50G
- 50N
- 51
- 51N
- 66
- 81
- 87
- RTD

Figura 27. Ventana principal de la herramienta computacional.



Las funciones de protección que se pueden seleccionar para su parametrización dentro de la herramienta, se las presenta en la figura 28.

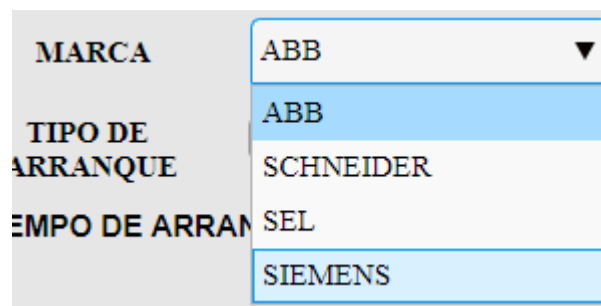


**SELECCIÓN DE PROTECCIONES**

- 14
- 27
- 46
- 49
- 50
- 50G
- 50N
- 51
- 51N
- 66
- 81
- 87
- RTD

**Figura 28.** Funciones de protección disponibles en la herramienta.

Las marcas de relés comerciales que se puede seleccionar están en la figura 29.



**MARCA**

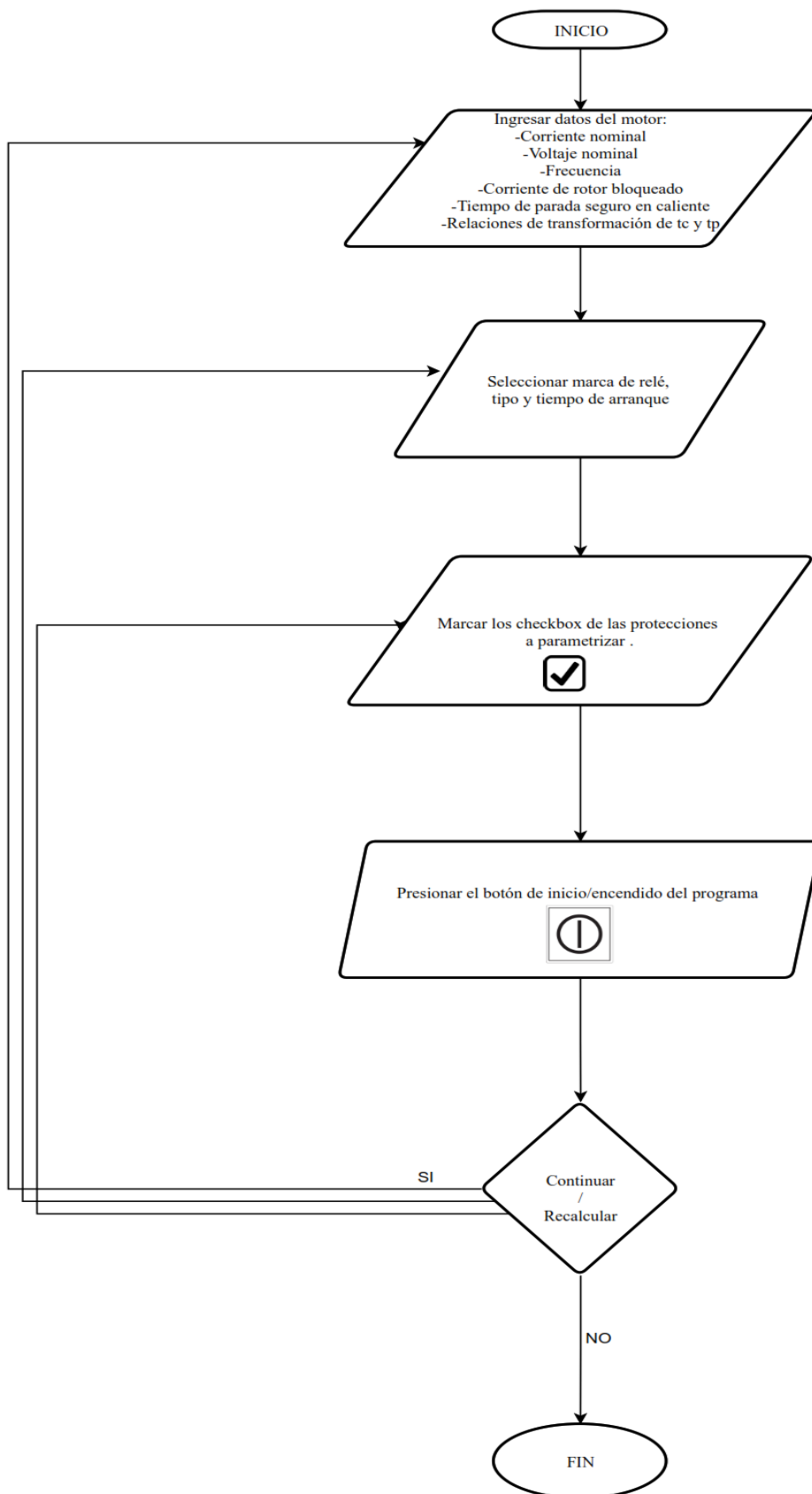
ABB ▼

- ABB
- SCHNEIDER
- SEL
- SIEMENS

**Figura 29.** Marcas de relés comerciales disponibles en la herramienta.

Para los tipos de arranque, los disponibles en la herramienta son los presentados ya en la sección 2.2 de este documento.

La herramienta computacional elaborada se limita a la parametrización de las funciones de protección y de los relés comerciales presentados en el punto 3.3, además que los valores presentados en el sistema por unidad dentro de la herramienta siempre estarán en bases de los valores ingresados del motor.



# CAPÍTULO 4

## 4. APLICACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO.

### 4.1 SISTEMA IEEE DE 9 BARRAS

Para este caso de estudio se conectó un motor de inducción a través de un autotransformador a la barra 6 del sistema IEEE de 9 barras.

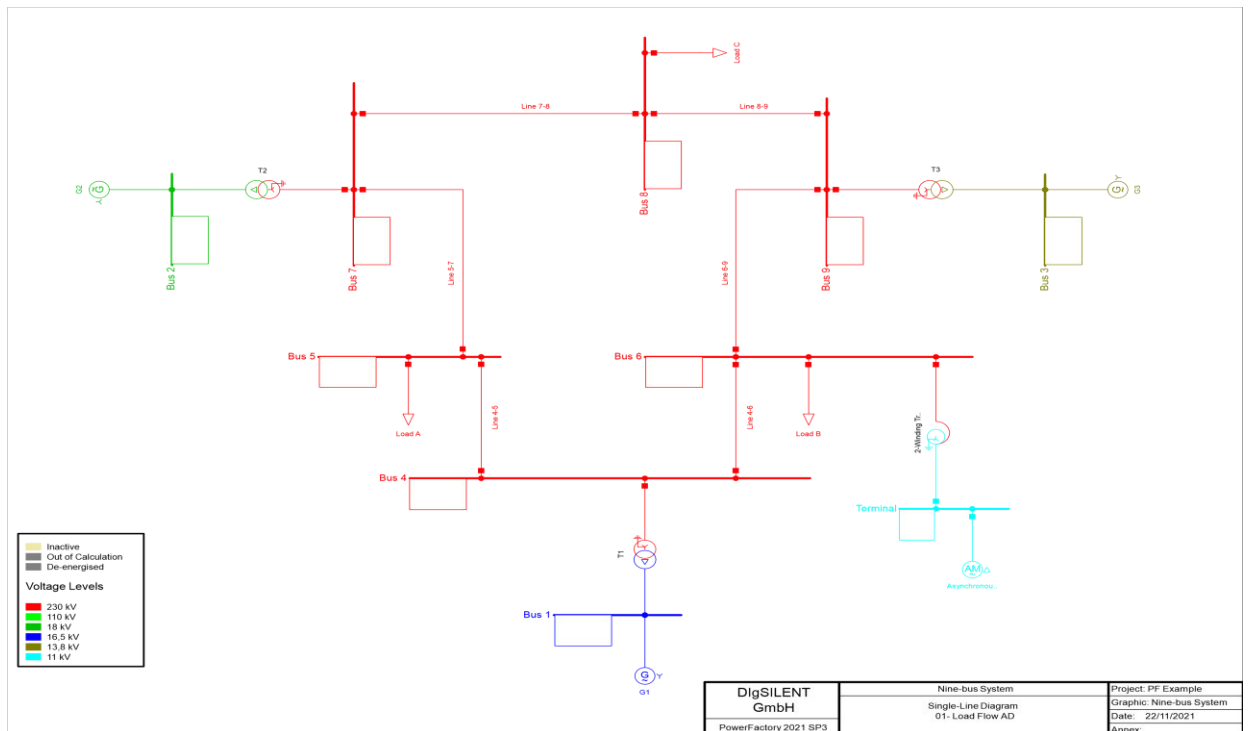


Figura 30. Sistema IEEE 9 barras.

Tabla 10. Datos técnicos del motor de prueba sistema IEEE.

Datos técnicos del motor	
Tc	700/1 [A]
Tp	11000/110 [V]
VN	11 [kV]
P	8 [MW]
fp	0,91
f	60 [Hz]
lrb	5,4 [pu]
Stall time hot	20 [s]

Para las pruebas del correcto funcionamiento para cada función de protección se realizarán simulaciones RMS cambiando los parámetros de los elementos del sistema, tal como se detalla en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Eventos para prueba de protecciones.

<b>Protección</b>	<b>Parámetro por cambiar</b>
27	Tap del transformador a voltaje 0.75 pu
51	mdmlp* a un valor de 6 pu (parámetro del motor)
51N	Aumento de carga monofásica igual a 0,0625 pu en la barra del motor
81	Aumento de carga igual a 10 MVA
49	mdmlp* a un valor de 1,75 pu (parámetro del motor)
50	Cortocircuito bifásico en barra del motor
46	Aumento de carga monofásica igual a 0,125 pu en la barra del motor

\* mdmlp: parámetro que genera un cambio en la carga mecánica del motor.

Se simularon los siguientes tipos de arranque del motor:

- Arranque directo: evento de apertura/cierre de interruptor con una variación de tap.
- Autotransformador: variación de 3 pasos de tap (nntap\_Trif)
- Y – D : evento de motor (i\_star)
- Reactor: evento de motor (xstadd)
- VFD: para este arranque se utilizó el ejemplo que brinda el software, debido a la complejidad de implementación y se muestra en la sección 4.3.

#### **4.1.1 ARRANQUE DIRECTO**

Para el arranque directo, la parametrización de las protecciones para el motor obtenida de la herramienta computacional es:

### PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES PARA MOTORES

MARCA	ABB	CORRIENTE NOMINAL	461 A.Prim
TIPO DE ARRANQUE	ARRANQUE DIREC...	FRECUENCIA	60 Hz
TIEMPO DE ARRANQUE	6 s	VOLTAJE	11000 V.Prim
		CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO	2489 A.Prim

#### RELACIONES DE TRASFORMACIÓN

PRIMARIO	SECUNDARIO
TC	700 5 A
TP	11000 120 V
TIEMPO DE PARADA SEGURO EN CALIENTE	20 s

#### SELECCIÓN DE PROTECCIONES

- 14
- 27 STAR VALUE: 0.75 pu; OPERATING CURVE TIME: IEC-Def time; OPERATE DELAY TIME: 6 s
- 46 START VALUE: 0.16 pu; TIME MULTIPLAYER: 1; OPERATING CURVE TIME: IEC-Def time; OPERATE DELAY TIME: 0.04 s
- 49
- 50
- 50G
- 50N
- 51 (PHLPTOC) START VALUE: 6.2034 pu; TIME MULTIPLIER: 1; OPERATING CURVE TYPE: IEC Def time; OPERATE DELAY TIME: 6 s
- 51N START VALUE: 0.0010836 pu; TIME MULTIPLIER: 1; OPERATING CURVE TYPE: ANSI Def time; OPERATE DELAY TIME: 0.1 s
- 66
- 81
- 87
- RTD

**Figura 31.** Parametrización de protecciones.

#### 4.1.1.1 ABB

##### 4.1.1.1.1 Prueba de Protección de Bajo Voltaje (27)

Para esta prueba de la protección de bajo voltaje, se procedió a configurar la parametrización que brinda la herramienta computacional. Se ingresó el tipo de curva, el parámetro de voltaje al 75% y la mitad del tiempo que dura el arranque del motor.

The screenshot shows a software dialog box titled "Common Time Characteristic - ...em\Terminal\Cub\_2\Relay Model\Under-Overvoltage\PHPTUV1 PhPh.RelChar". The dialog is divided into several sections:

- Basic Data:** IEC Symbol: U<, ANSI Symbol: 27, Measure Type: Voltage (V).
- Tripping Times:** Name: PHPTUV1 PhPh, Type: ...0\REM 630\Under-Overvoltage\PHPTUV1 PhPh.
- Description:** Includes checkboxes for "Out of Service" and "Tripping Direction" (set to None).
- Characteristic:** Set to "IEC Def. Time (27)".
- Input Setting:** 0,75 p.u., 90 sec.V, 8250, pri.V.
- Time Dial:** 6,00. Reset Delay: 0,000.

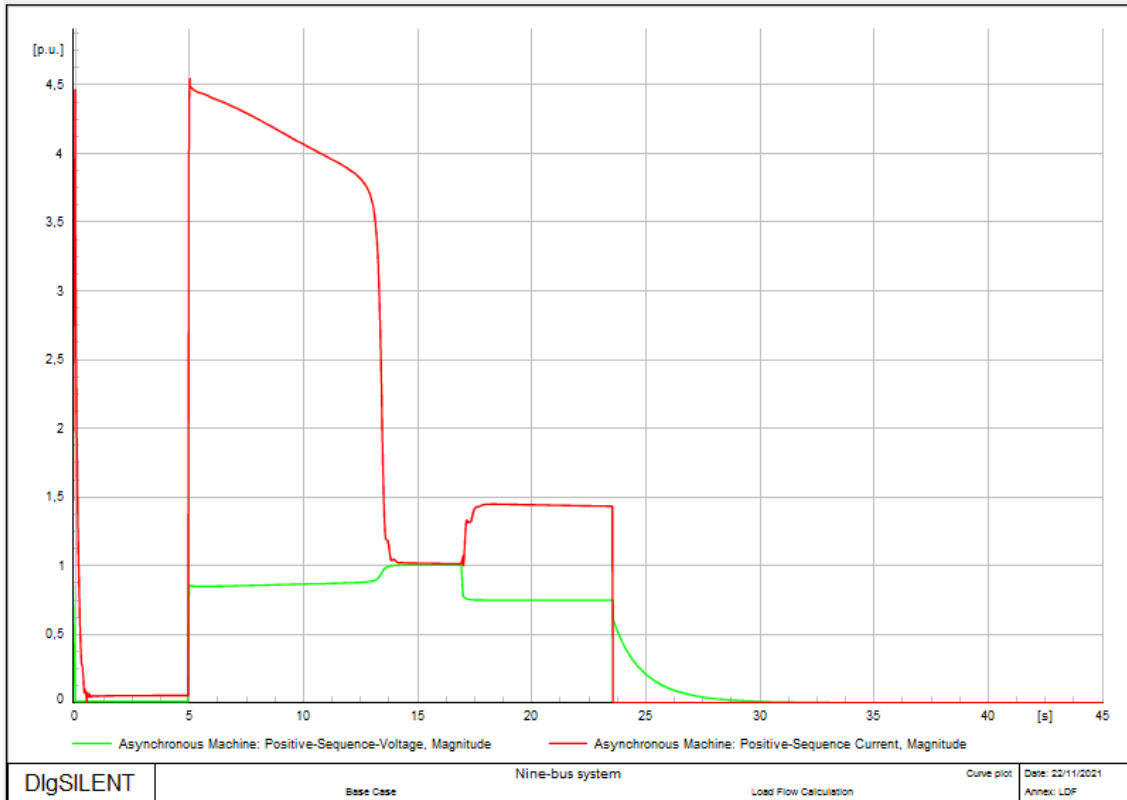
Buttons for "OK", "Cancel", and "Relay" are visible on the right side of the dialog.

**Figura 32.** Configuración del relé

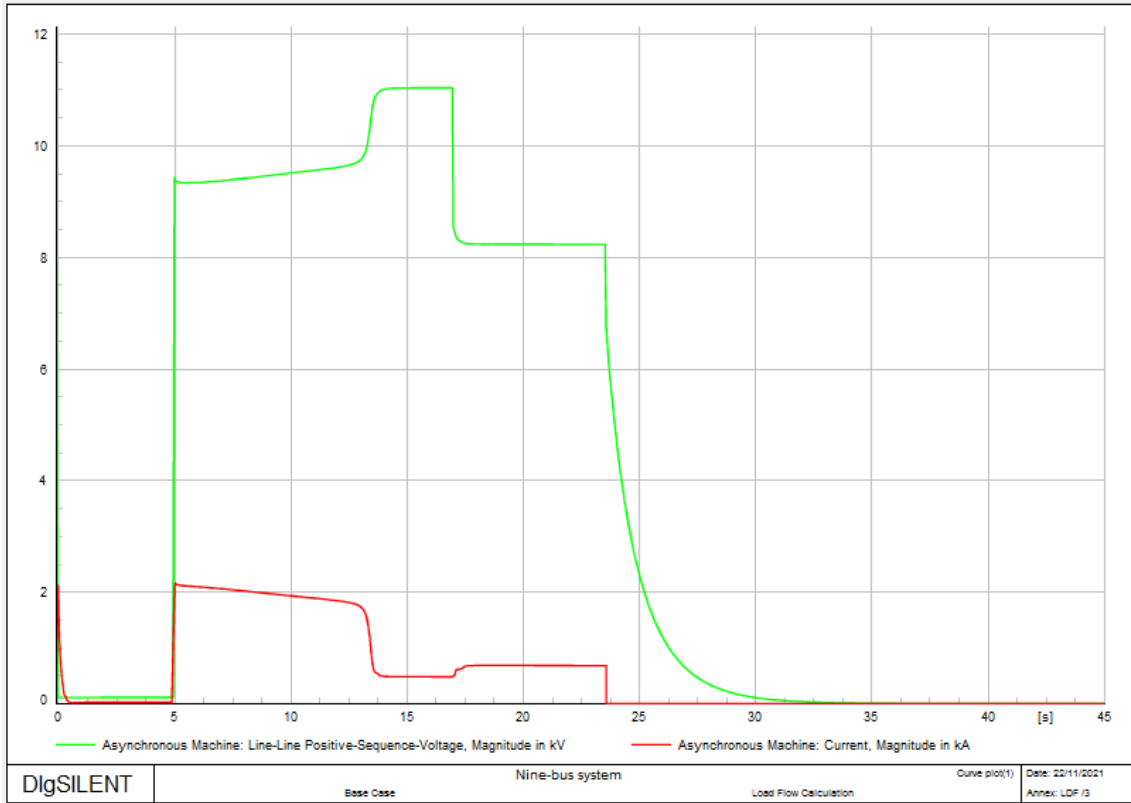
Como se puede observar la Tabla 12, para la prueba de esta protección se realizó una disminución del voltaje a través del tap del transformador.

**Tabla 12.** Eventos para prueba de protección 27.

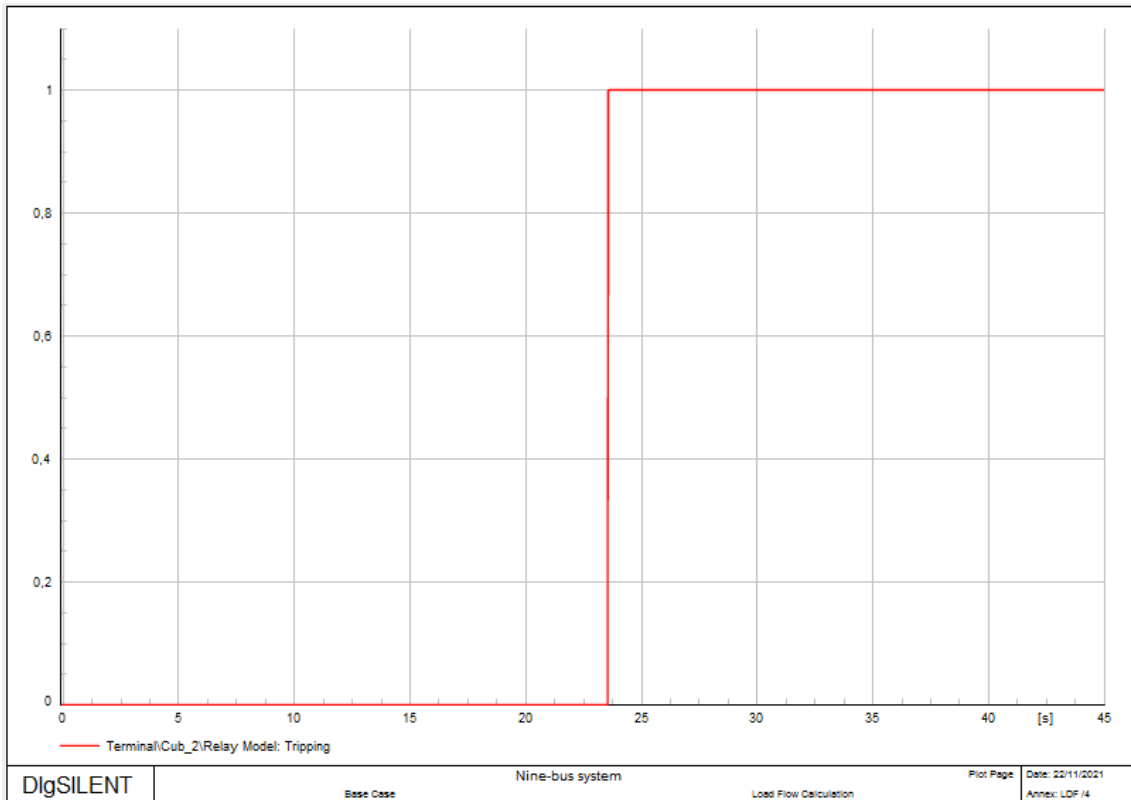
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Posición del tap a -26	17



**Figura 33.** Voltaje y corriente en pu.



**Figura 34.** Voltaje y corriente.

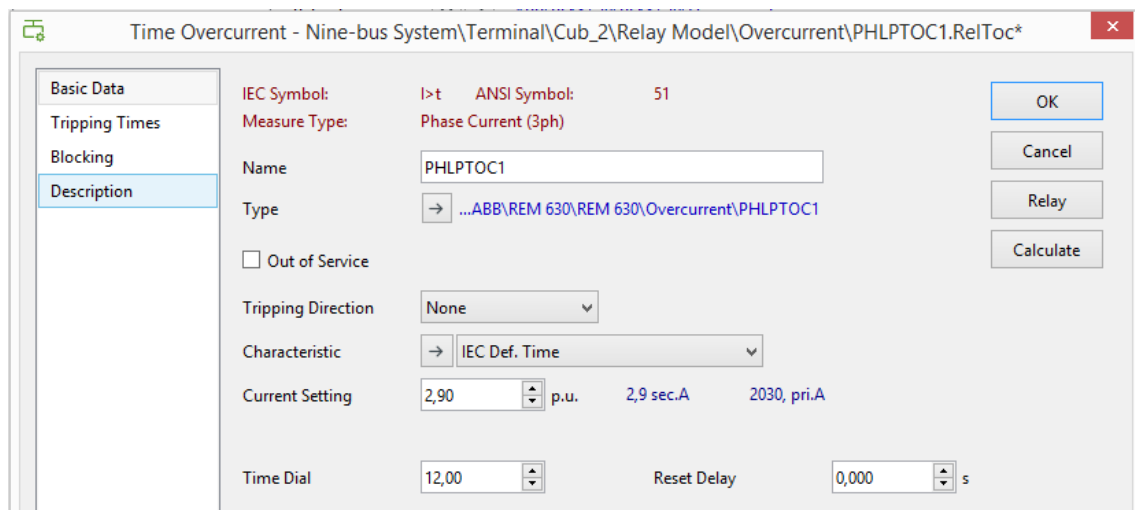


**Figura 35.** Disparo del relé.

Como se puede observar en las figuras 33-35, los resultados obtenidos en la prueba de la protección 27 son correctos, ya que se aprecia un arranque exitoso del motor sin tener una actuación inesperada de la protección por este evento y una correcta operación de la protección cuando ocurre la perturbación de bajo voltaje.

#### 4.1.1.1.2 Prueba de protección sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de protección de sobrecorriente temporizada, al no tener un parámetro dentro del software para poder simular un evento de rotor bloqueado, se procedió a realizar un cambio en la carga mecánica del motor para poder aumentar la corriente del motor y probar esta protección; se seleccionó el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de arranque del motor.



**Figura 36.** Configuración del relé.

La Tabla 13 indica los eventos programados para probar la protección 51.

**Tabla 13.** Eventos para prueba protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	20



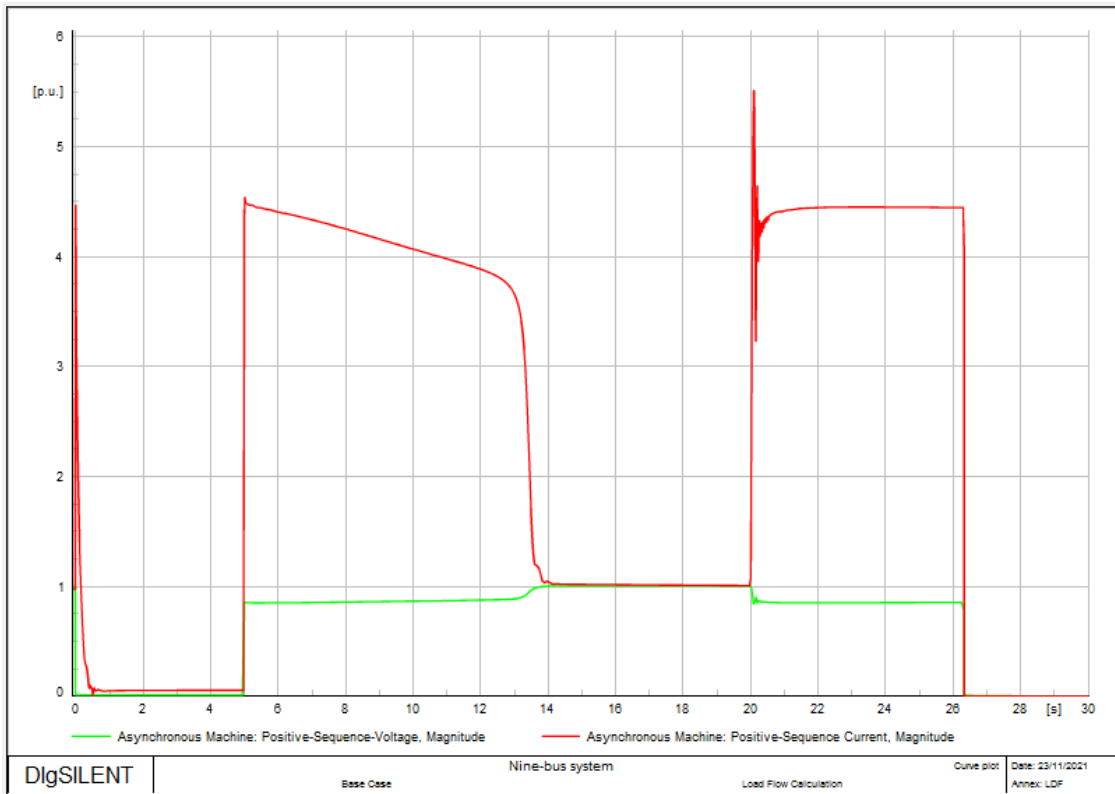


Figura 37. Voltaje y corriente en pu.

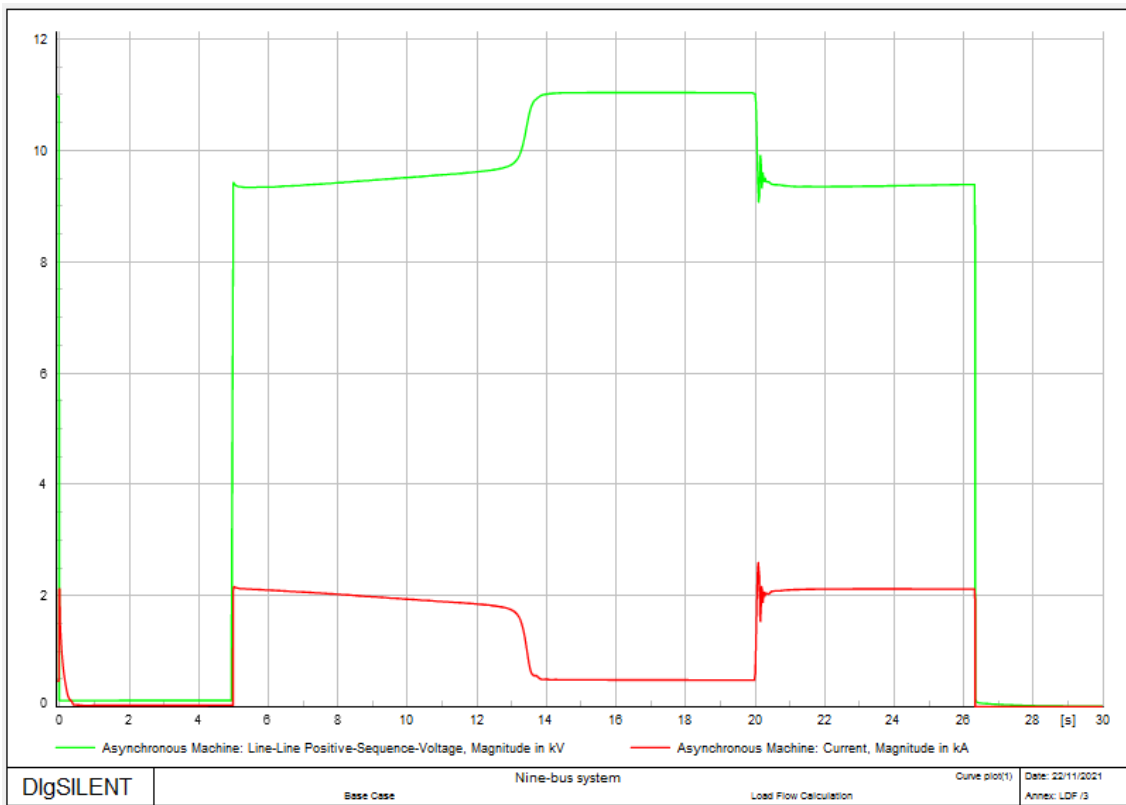
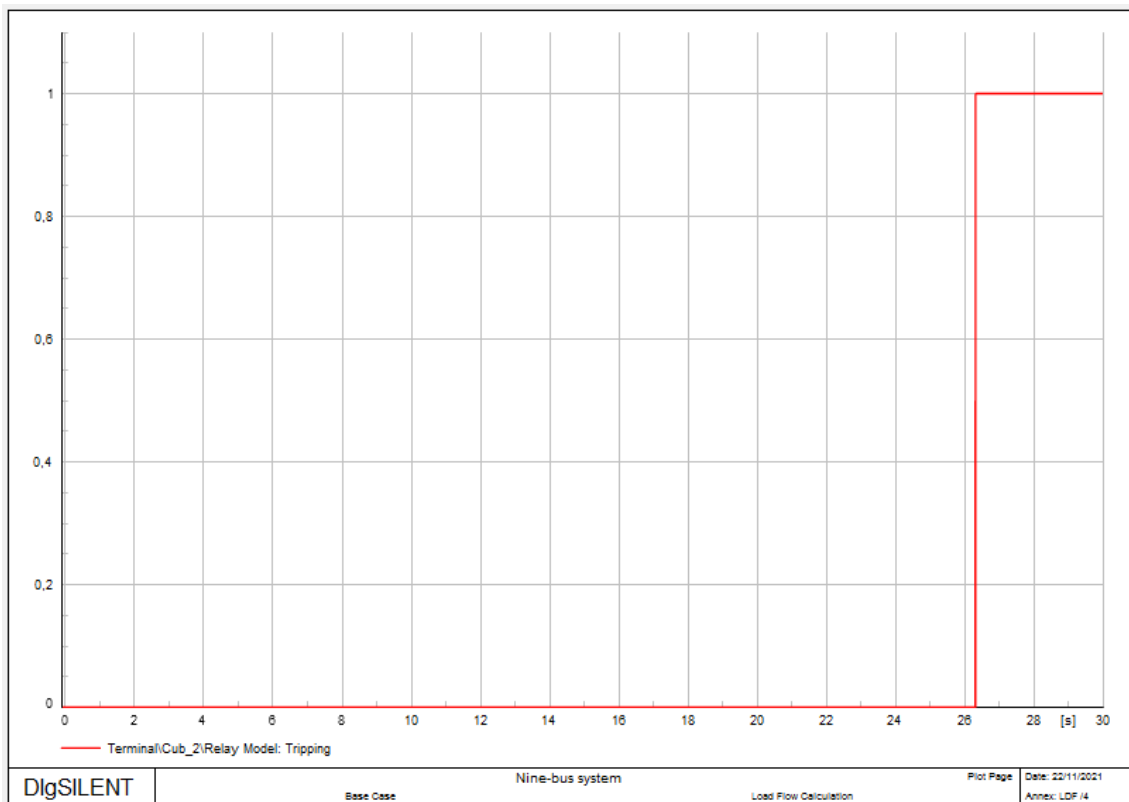


Figura 38. Voltaje y corriente.

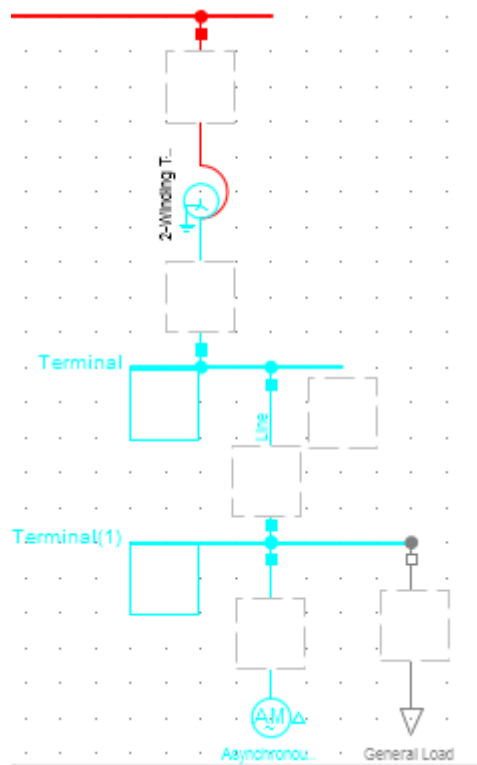


**Figura 39.** Disparo del relé.

Se puede observar en las gráficas 37-39 que la protección está configurada y operando correctamente, el motor tiene un arranque exitoso sin actuación de la protección a pesar de la corriente elevada en el arranque, posteriormente cuando ocurre la perturbación simulada para el aumento de corriente, la protección opera.

#### 4.1.1.1.3 Prueba de protección contra desbalance de corriente (46)

Para realizar la prueba de esta función de protección, se realizaron cambios en el diagrama para generar un evento que produzca un desbalance de corriente; se conectó una carga monofásica en paralelo con el motor produciendo un desbalance de corriente en la línea que alimenta el motor. Se parametrizó la protección según los resultados obtenidos de la herramienta computacional: tipo de curva, corriente de pick up y tiempo de actuación.



**Figura 40.** Unifilar modificado.

Time Overcurrent - Nine-bus System\Terminal\Cub\_2\Relay Model\Unbalance\MNSPTOC1.RelToc

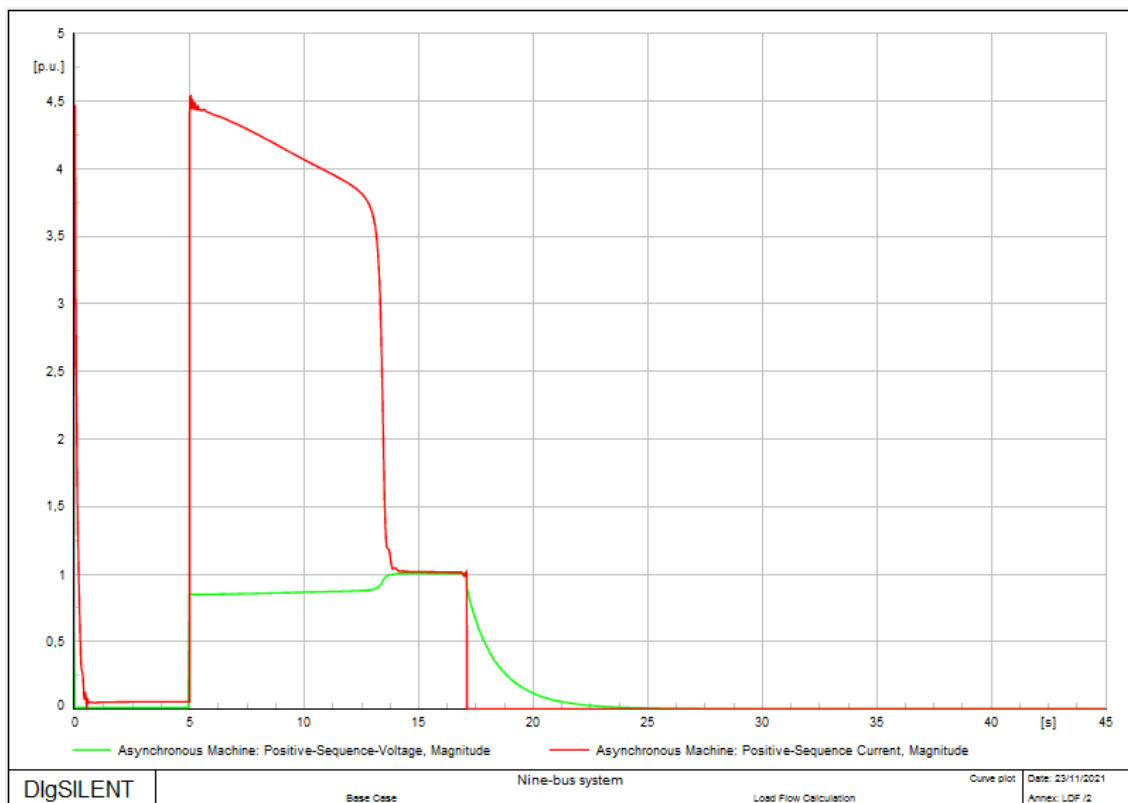
Basic Data	IEC Symbol:	I2>t	ANSI Symbol:	46	OK
Tripping Times	Measure Type:	Negative Sequence Current (I2)			Cancel
Blocking	Name	MNSPTOC1			Relay
Description	Type	→ ...ABB\REM 630\REM 630\Unbalance\MNSPTOC1			Calculate
	<input type="checkbox"/> Out of Service				
	Tripping Direction	None			
	Characteristic	→ IEC Def. Time (46)			
	Current Setting	0,11	p.u.	0,11 sec.A	55, pri.A
	Time Dial	0,10		Reset Delay	0,000 s

**Figura 41.** Configuración del relé.

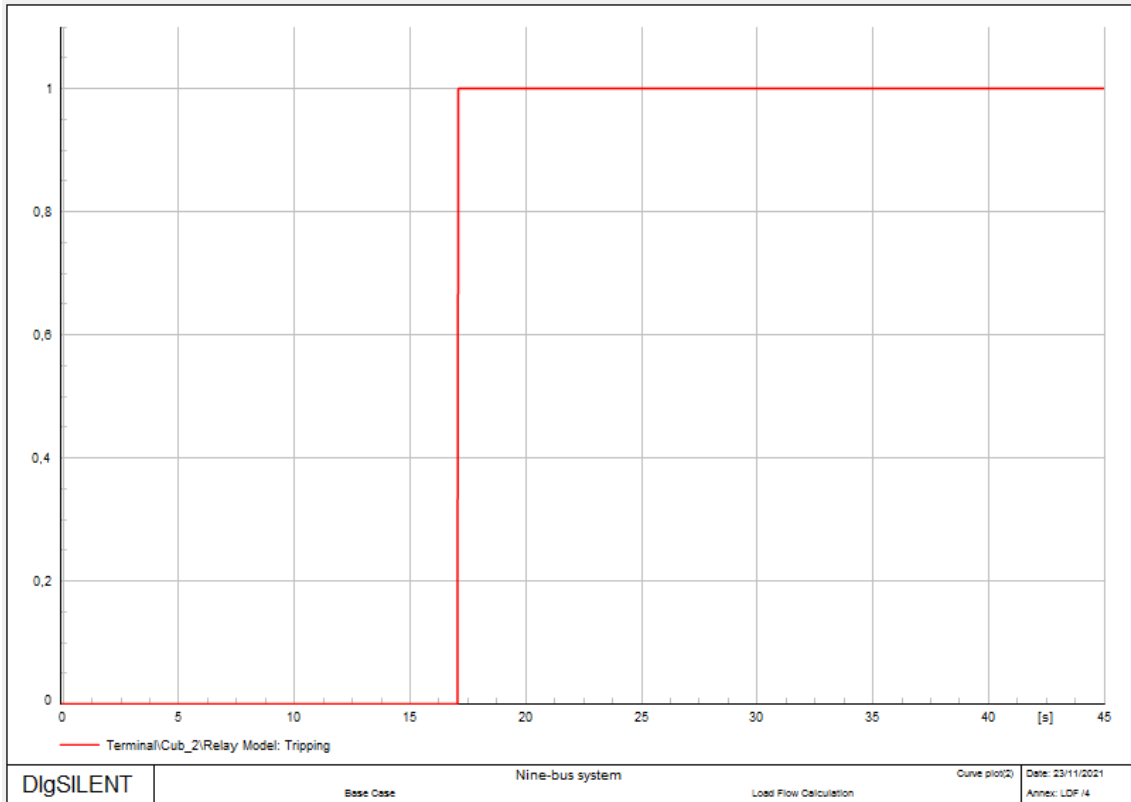
La Tabla 14 indica los eventos programados para probar la protección 46.

**Tabla 14.** Eventos de prueba para protección 46.

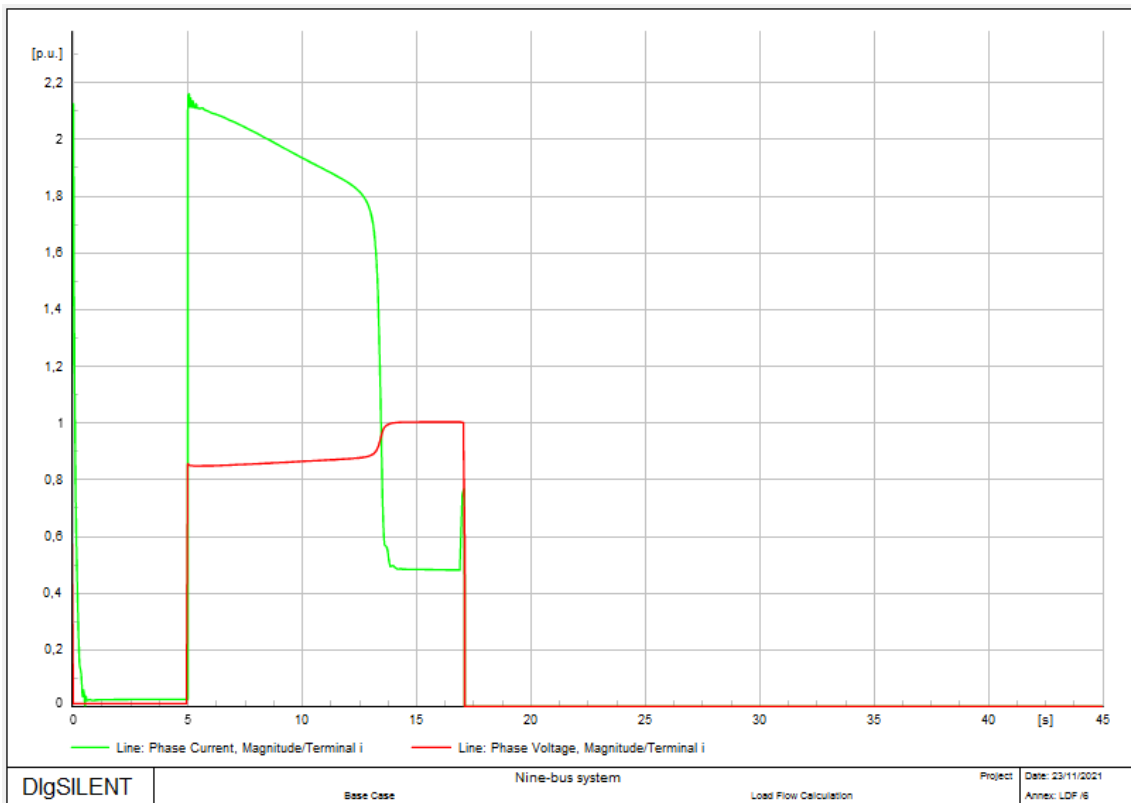
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado	17



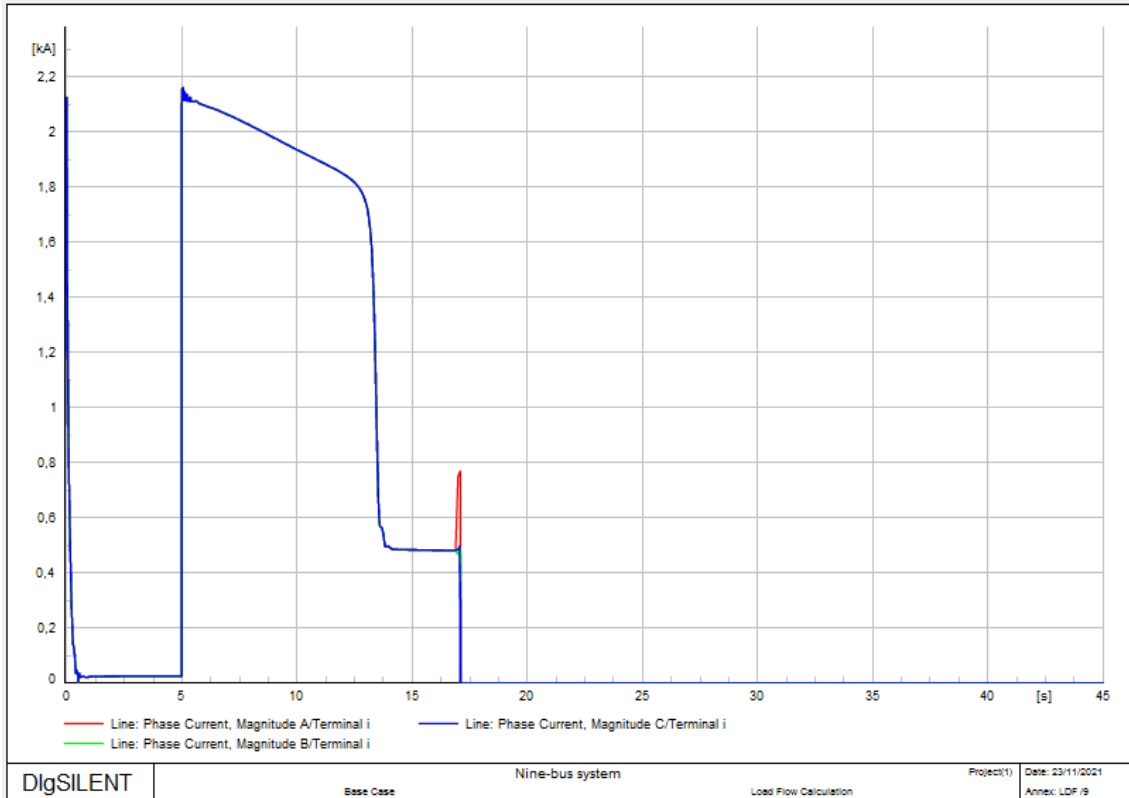
**Figura 42.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 43.** Disparo del relé.



**Figura 44.** Voltaje y corriente en pu de la línea al motor

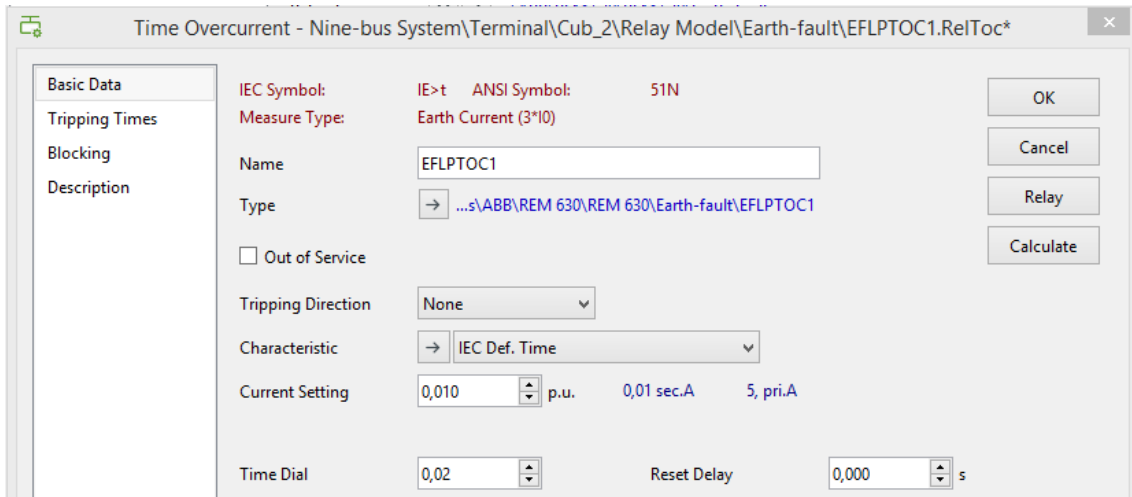


**Figura 45.** Corrientes de fase de la línea al motor.

Como se puede apreciar en las Figuras 42-45, la actuación de la protección es correcta al momento de sentir un desbalance de corriente producido por la conexión de la carga monofásica en la fase A de la línea que alimenta el motor. La Figura 42 muestra las corrientes de cada fase que circula por esta línea donde se puede observar claramente el aumento de corriente en una sola fase.

#### 4.1.1.1.4 Prueba de protección contra fallas a tierra temporizada (51N)

Para realizar la prueba de protección contra fallas a tierra temporizada, se utilizó el mismo procedimiento y eventos que se utilizaron en las pruebas de la protección 46 ya que por el desbalance de corriente se generan corrientes de secuencia cero, parámetro con el cual trabaja esta protección. Para las pruebas de esta protección se parametrizó las funciones con los valores obtenidos de la herramienta: el tipo de curva, corriente de pick up y tiempo de actuación.

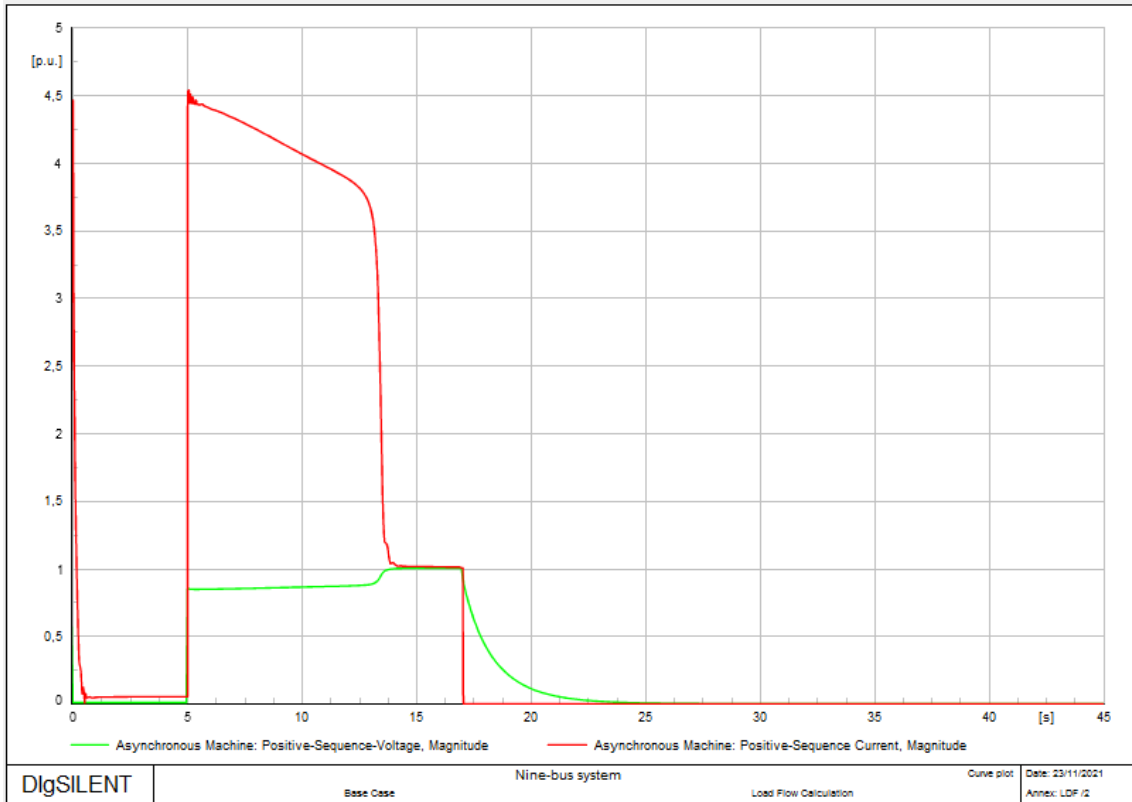


**Figura 46.** Configuración.

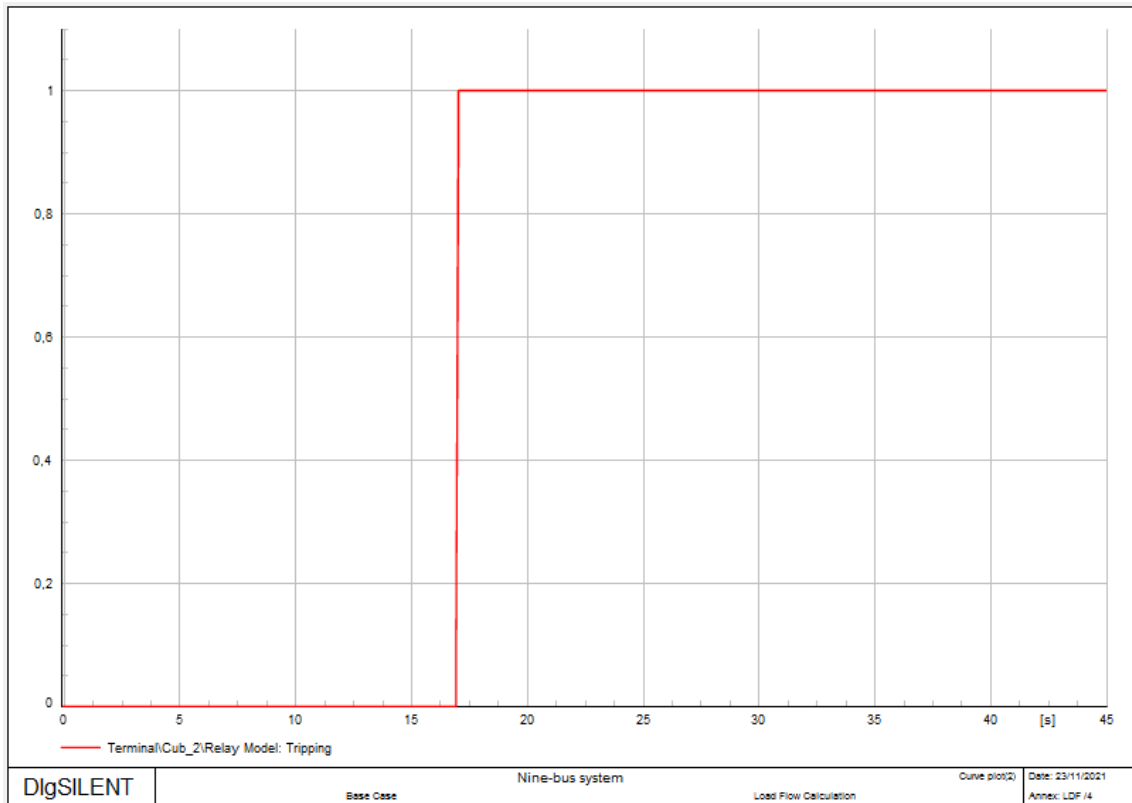
La Tabla 15 indica los eventos y tiempos de ocurrencia para la prueba de la protección 51N.

**Tabla 15.** Eventos para prueba de protección 51N.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado	17

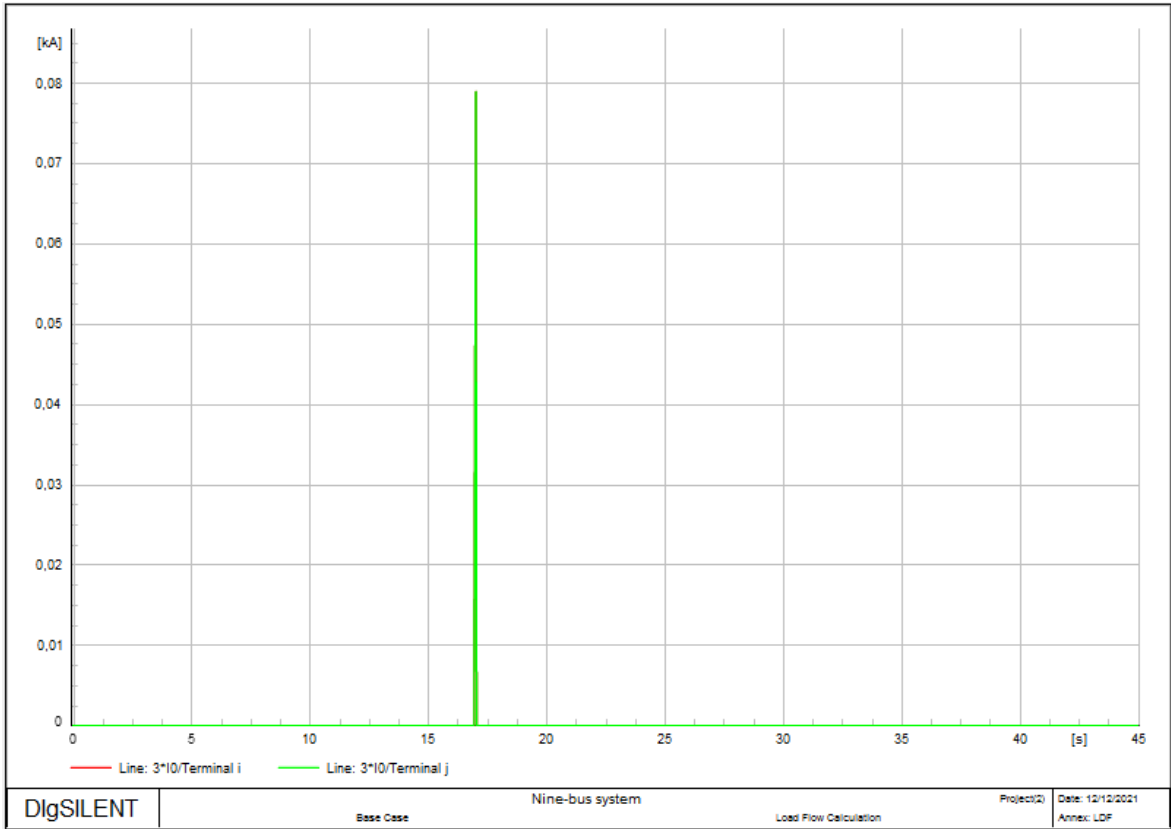


**Figura 47.** Voltaje y corriente en pu del motor.

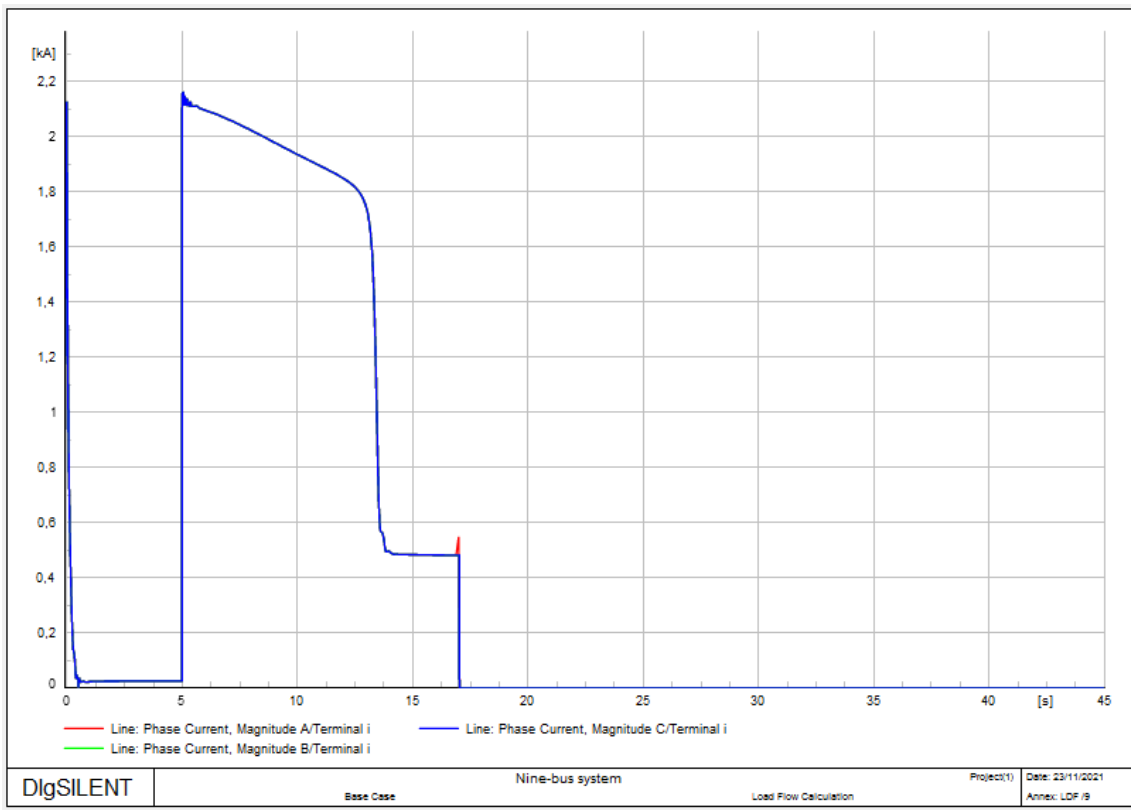


**Figura 48.** Disparo del relé.





**Figura 49.** Corriente 3x10 de la línea al motor.



**Figura 50.** Corrientes de fase de la línea al motor.

Las figuras 47-50 muestran los resultados de la operación correcta de la protección que se probó, al conectar una carga monofásica en paralelo con el motor, las corrientes que circulan por la línea, ya que no son simétricas y se genera corrientes de secuencia cero que son percibidas por la protección, lo que produce que este actúe de forma instantánea.

#### 4.1.1.2 RELÉ GENÉRICO

Para esta sección de pruebas se optó por utilizar el relé genérico para motores disponible en la librería de protecciones de PowerFactory, ya que no se encuentran disponibles marcas de relés comerciales exclusivas para motores, ya sea los expuestos en la sección 2.4.3 o equivalentes.

##### 4.1.1.2.1 Pruebas para la protección térmica (49)

Para la prueba de la protección 49, se configuró la parametrización que se indica en la sección 2.4.2.1.4 que es de 115% de la corriente a plena carga [16]. Al configurar esta protección, el valor mínimo de corriente es de 1.5 pu, por lo que se realizarán las pruebas con este valor, solo tiene una opción de curva y se configuró el time dial como se muestra en la figura 49, recordando que los valores están en por unidad del TC para que el relé opere con normalidad.

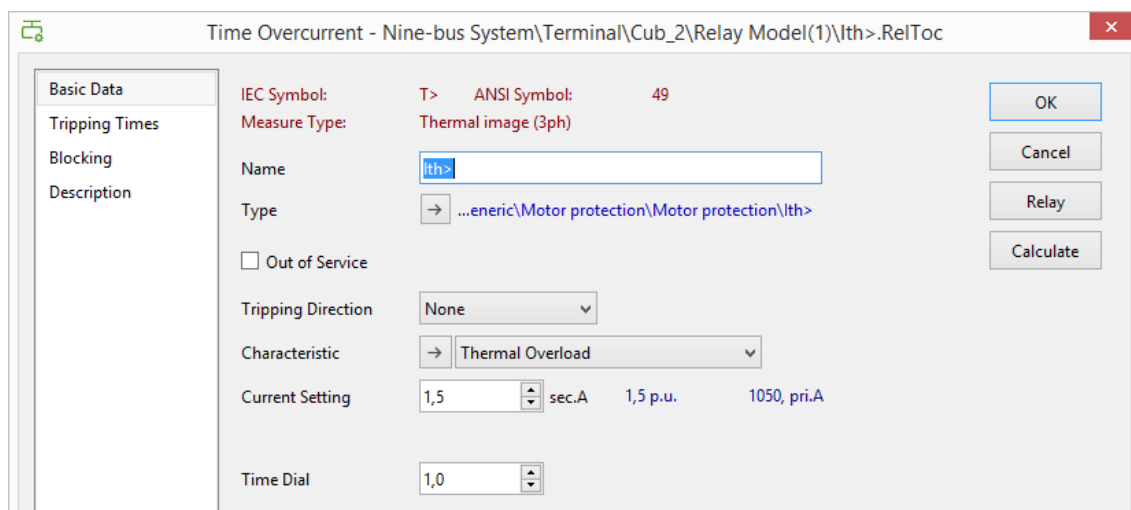
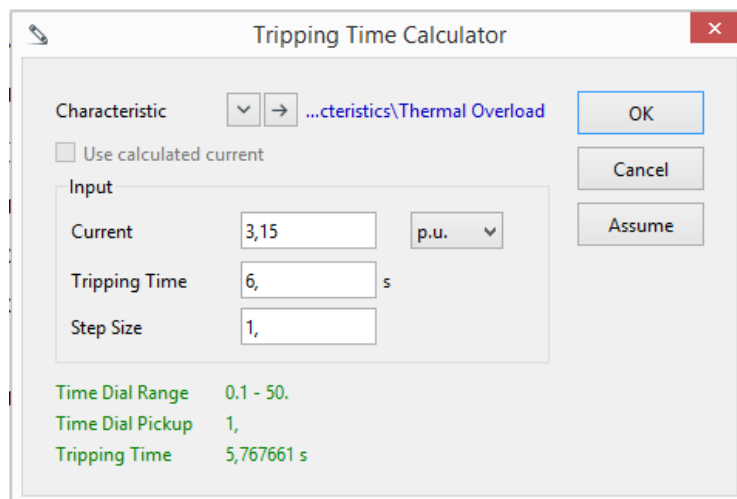


Figura 51. Configuración relé.



**Figura 52.** Cálculo de time dial para protección 49.

La Tabla 16 muestra los eventos y tiempos de ocurrencia para la prueba de la protección 49.

**Tabla 16.** Eventos para prueba de protección 49.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 1,75 [pu]	17

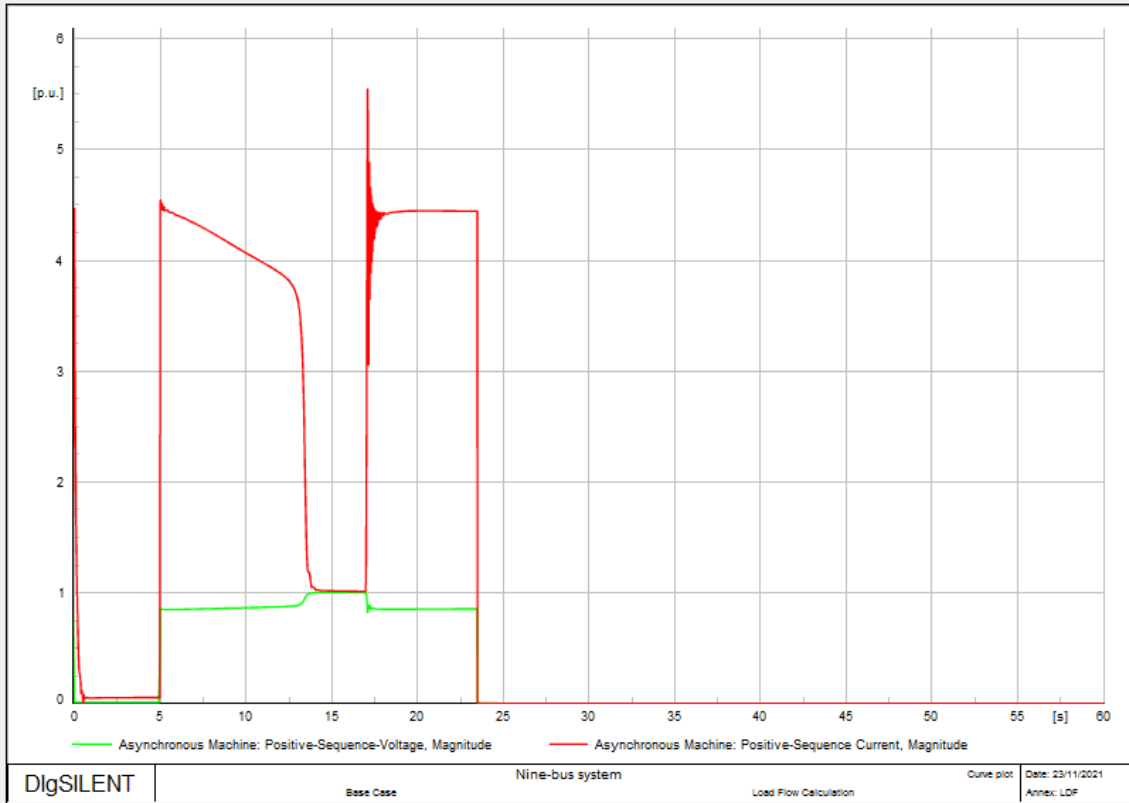


Figura 53. Voltaje y corriente en pu.

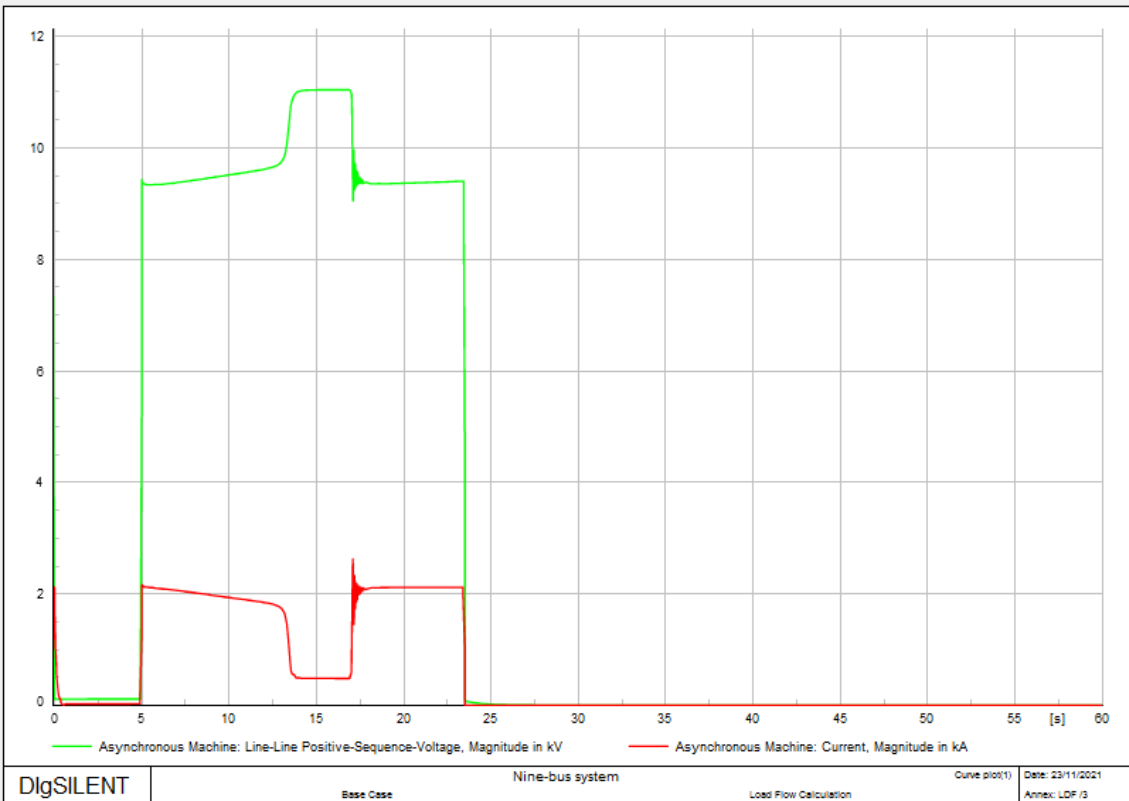
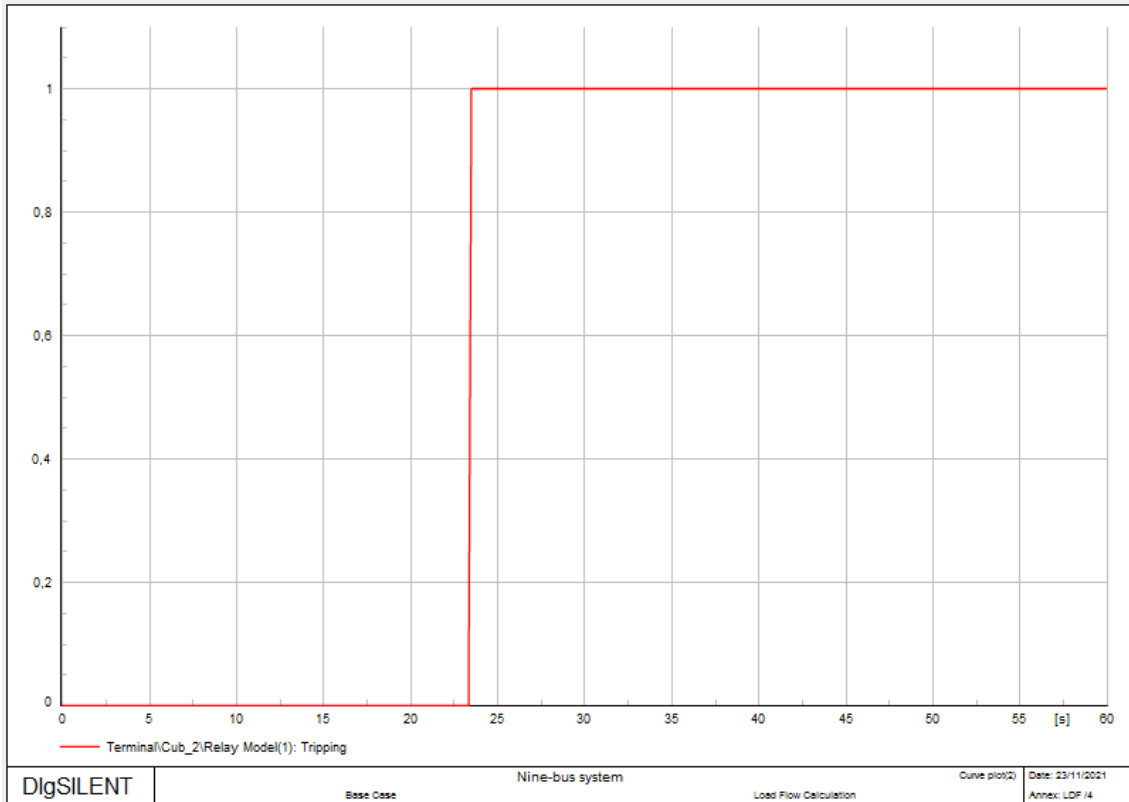


Figura 54. Voltaje y corriente.

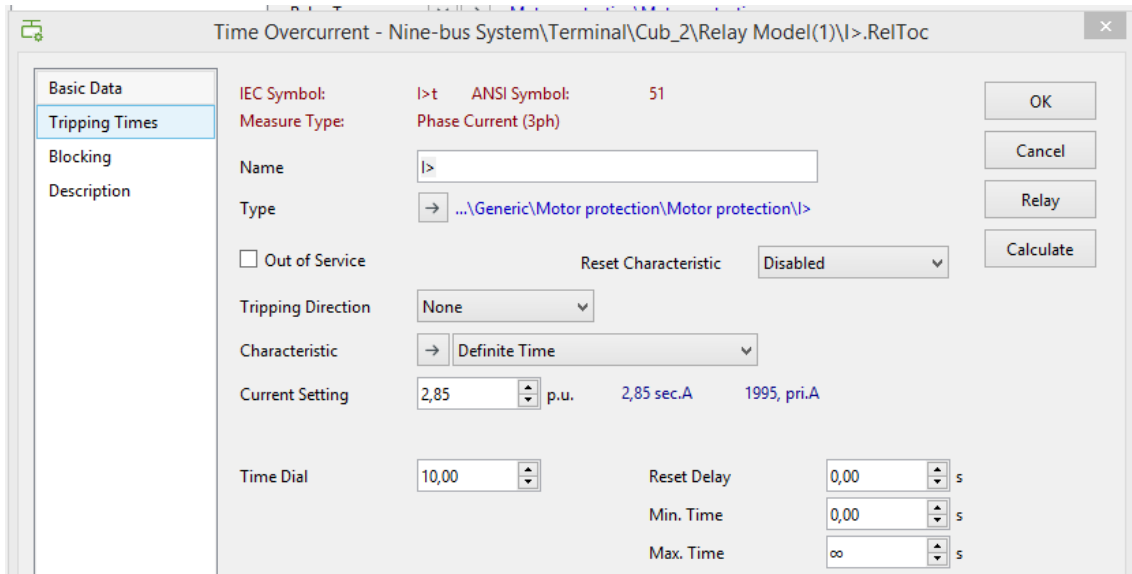


**Figura 55.** Disparo del relé.

Las figuras 53-55 muestran el proceso de prueba para la protección 49, como se puede observar el relé opera bajo los parámetros configurados, permitiendo un arranque exitoso y una posterior operación de la protección cuando ocurre la perturbación.

#### 4.1.1.2.2 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la parametrización de esta protección se colocó la configuración típica expuesta en el punto 3.2, se seleccionó el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de actuación del relé.

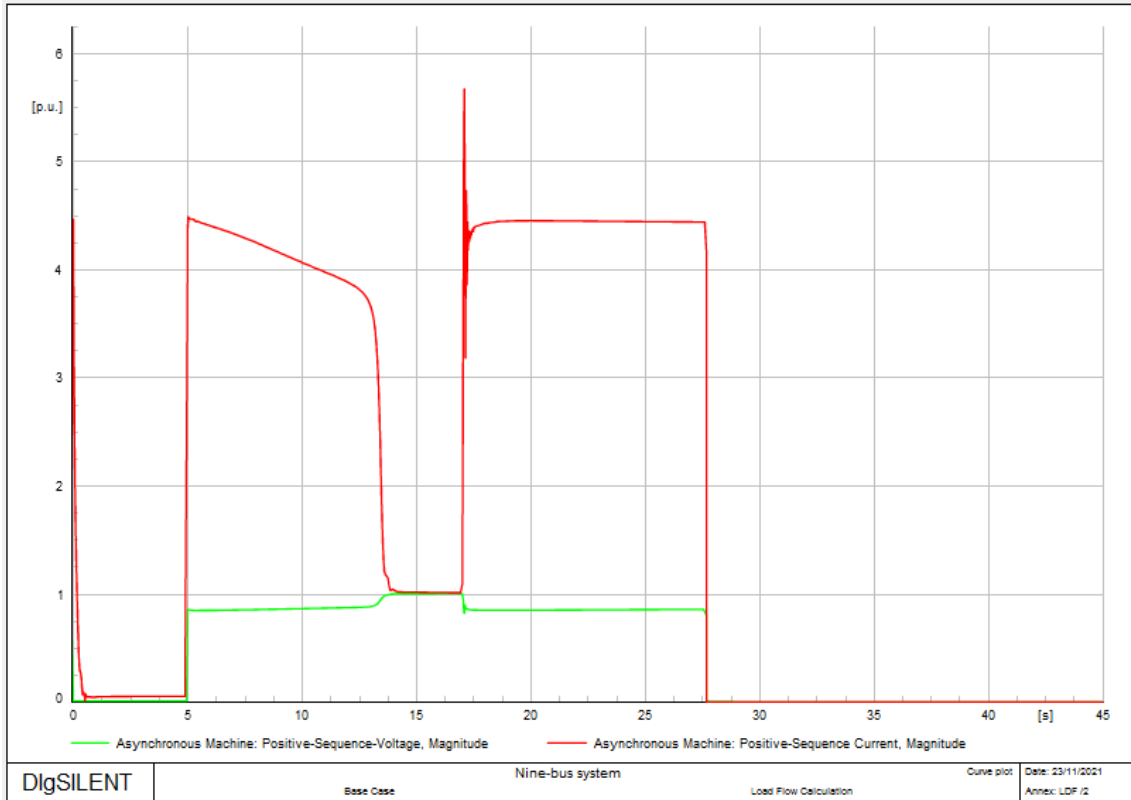


**Figura 56.** Configuración.

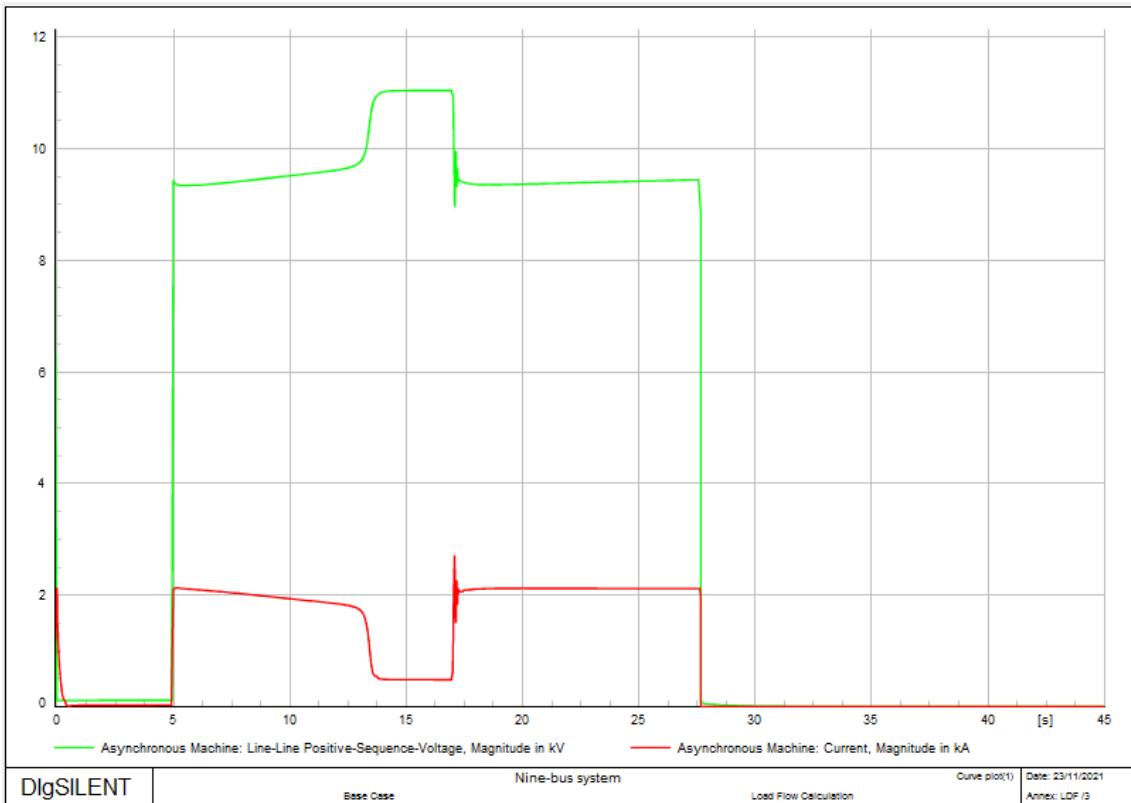
La Tabla 17 muestra los eventos de simulación para probar la protección 51.

**Tabla 17.** Eventos para probar la protección 51.

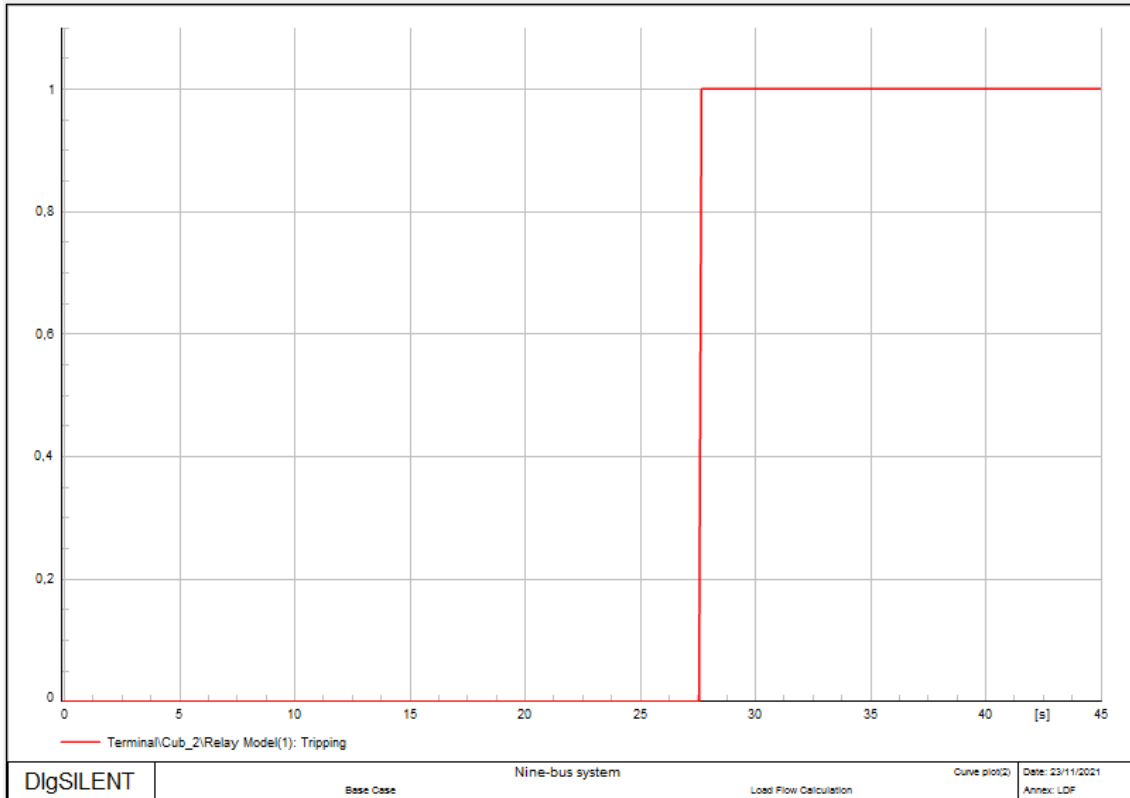
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	17



**Figura 57.** Voltaje y corriente en pu.



**Figura 58.** Voltaje y corriente.



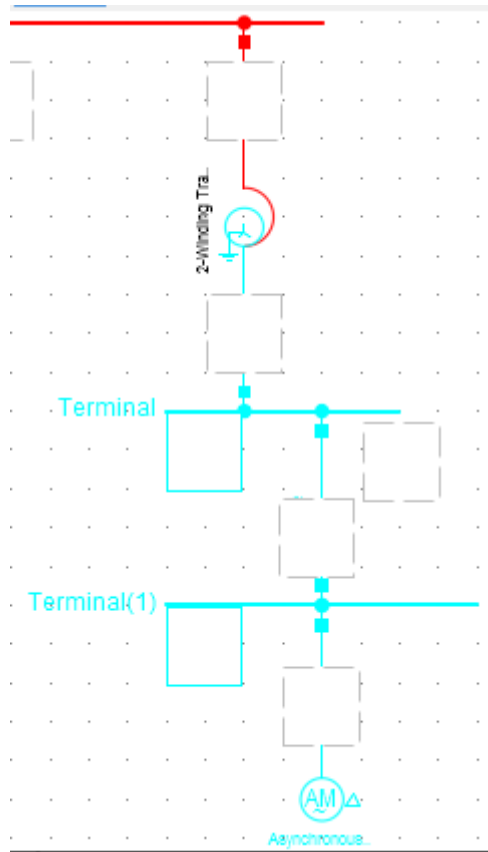
**Figura 59.** Disparo del relé.

Observando las figuras 57-59 se puede decir que la prueba de la protección fue exitosa debido a que el motor tuvo un arranque exitoso y el relé solo operó cuando sintió la perturbación simulada para probar su correcta aplicación.

#### 4.1.1.2.3 Prueba de la protección de sobrecorriente instantánea (50)

Para la prueba de la protección 50, el esquema se modificó para poder simular un cortocircuito, luego se configuró con los parámetros expuestos en el punto 3.2, se colocó la corriente de pick up y el tiempo de actuación que en este caso es instantáneo.





**Figura 60.** Unifilar modificado.

Instantaneous Overcurrent - Nine-bus System\Terminal\Cub\_2\Relay Model(1)\I>>.Relloc

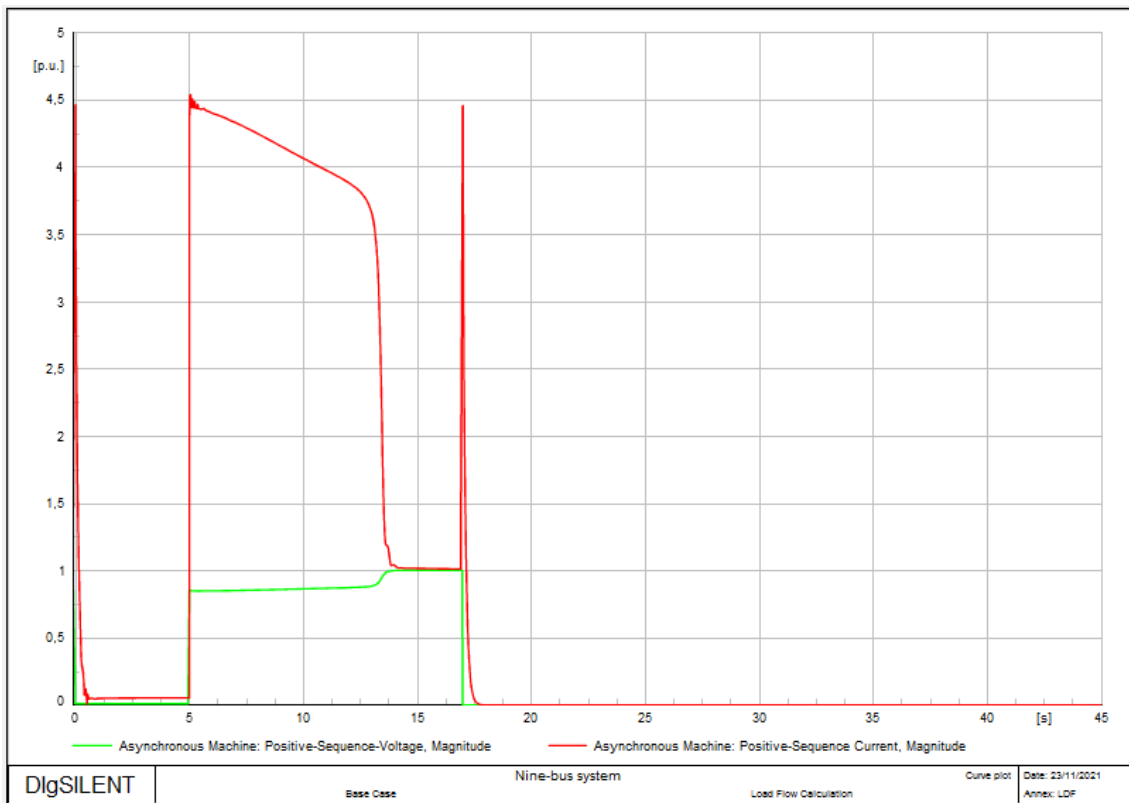
Basic Data	IEC Symbol: I>>	ANSI Symbol: 50	OK
Tripping Times	Measure Type: Phase Current (3ph)		Cancel
Blocking	Name: I>>		Relay
Description	Type: ...eneric\Motor protection\Motor protection\I>>		
	<input checked="" type="checkbox"/> Out of Service		
	Tripping Direction: None		
	Pickup Current: 3,80 p.u. 3,8 sec.A 2660, pri.A		
	Time Setting: 0,00 s		
	Total Time: 0,01 s		

**Figura 61.** Configuración.

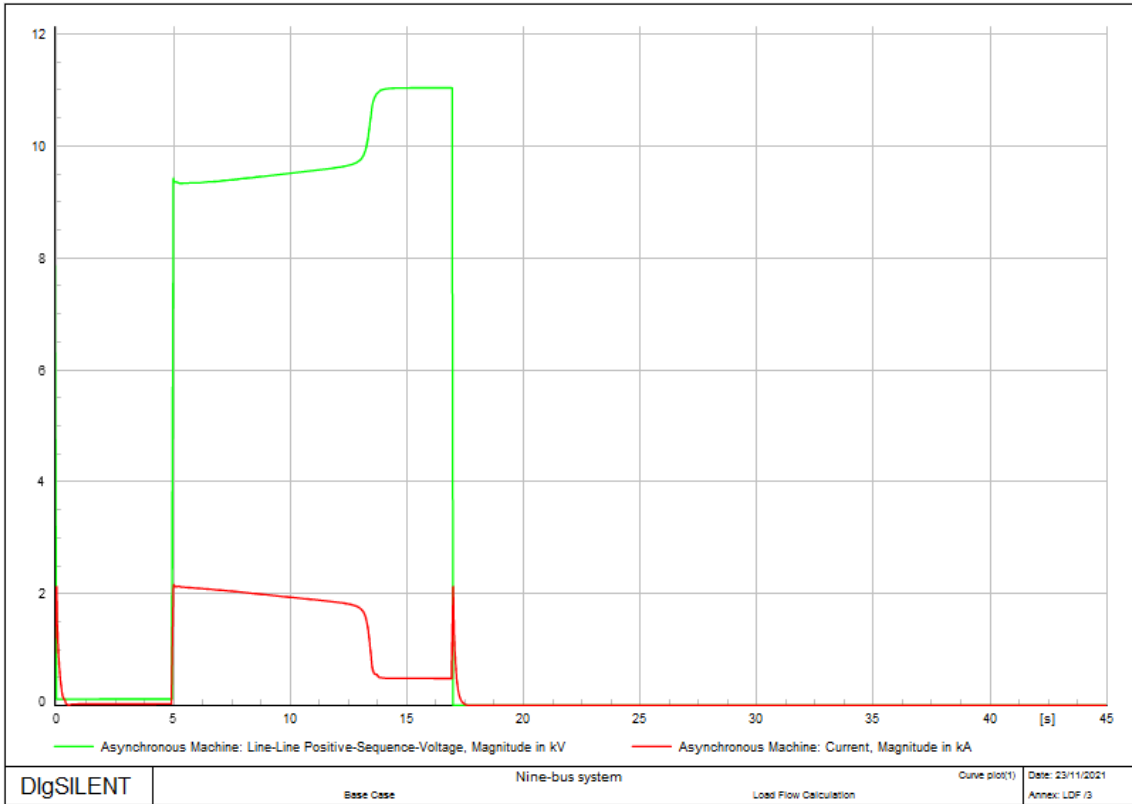
La Tabla 18 muestra los eventos simulados para probar la correcta parametrización de la protección 50, destacando el evento de cortocircuito que deberá activar la operación del relé.

**Tabla 18.** Eventos para la prueba de la protección 50.

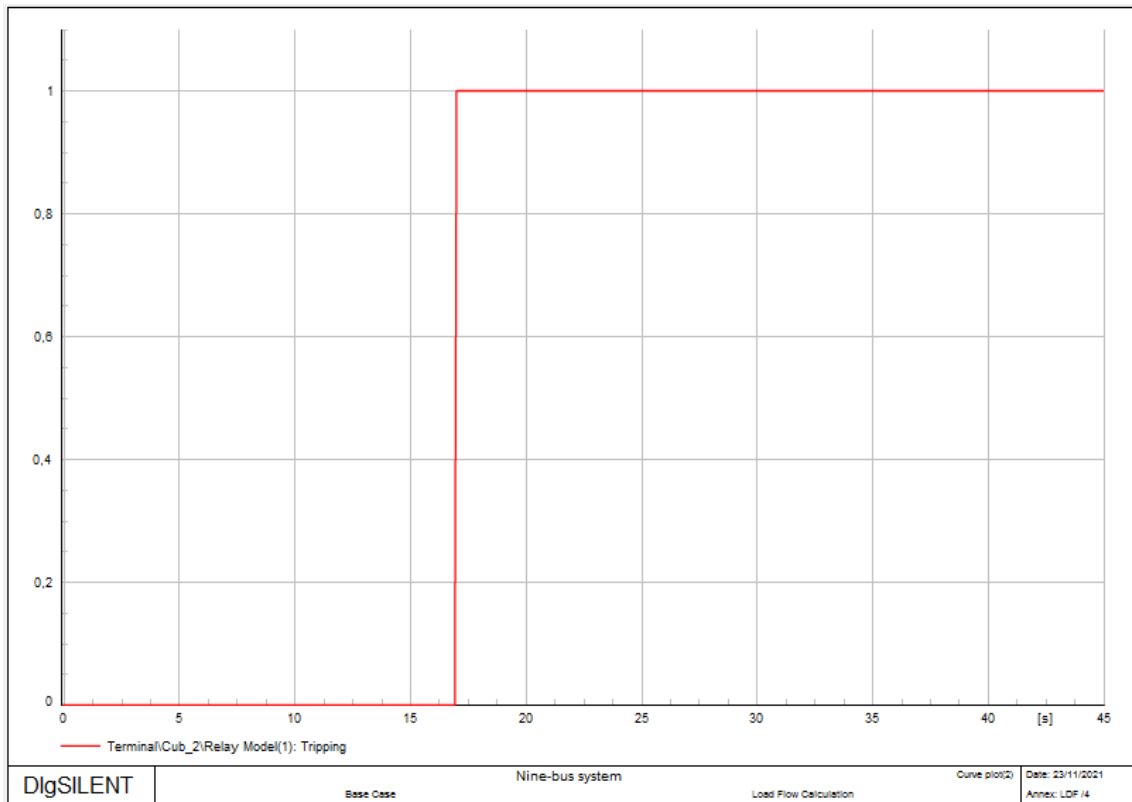
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Cortocircuito en la barra del motor	17



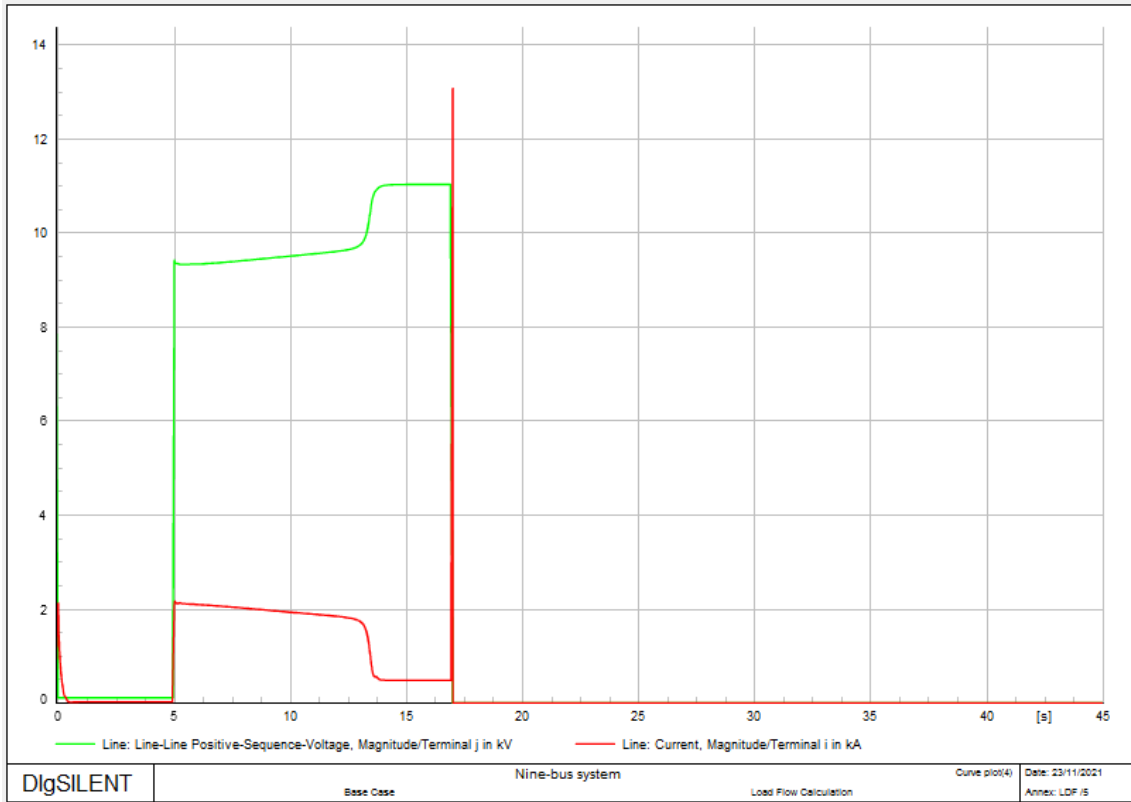
**Figura 62.** Voltaje y corriente en pu del motor.



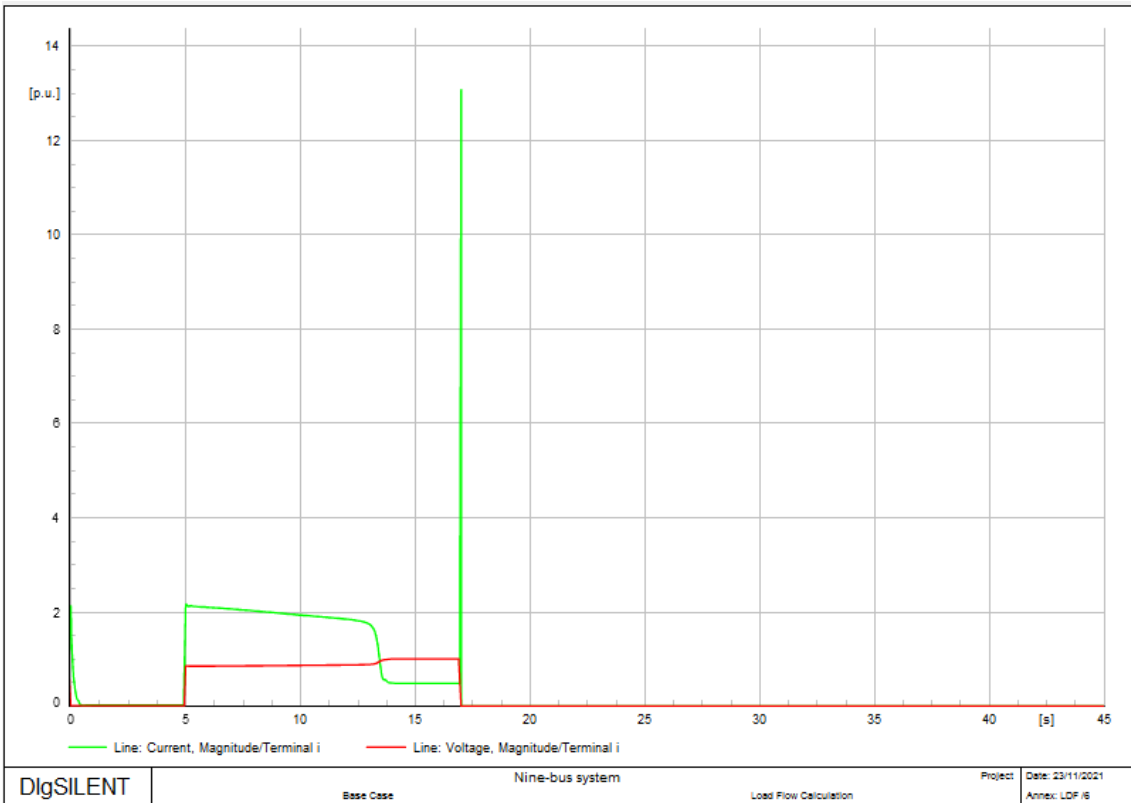
**Figura 63.** Voltaje y corriente del motor.



**Figura 64.** Disparo del relé.



**Figura 65.** Voltaje y corriente de la línea al motor.

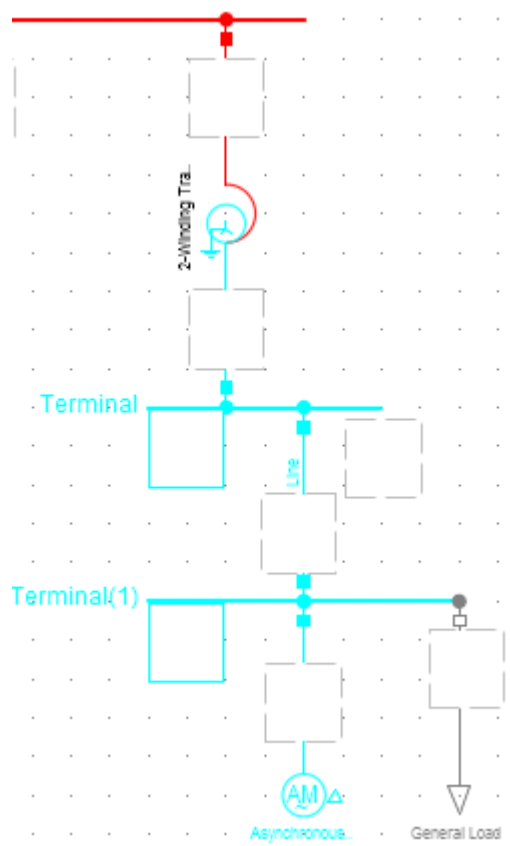


**Figura 66.** Voltaje y corriente en pu de la línea al motor.

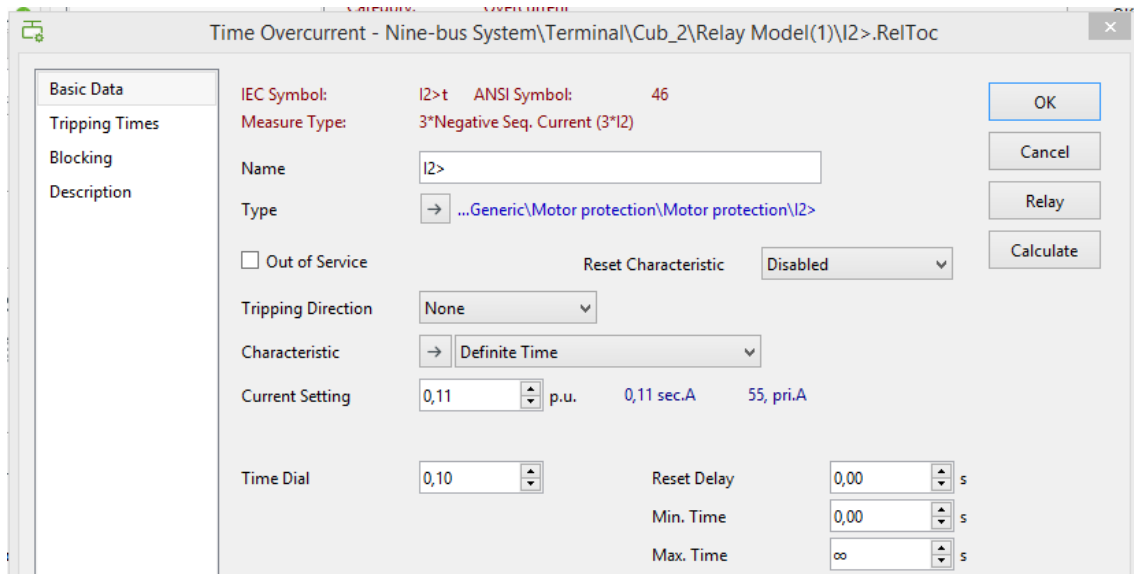
Las figuras 62-66 muestran la exitosa simulación de prueba de la protección 50, teniendo un correcto arranqué del motor y una correcta operación instantánea de la protección cuando ocurre la perturbación simulada.

#### 4.1.1.2.4 Prueba de la protección de desbalance de corriente (46)

Para la prueba de la protección 46, se modificó el esquema de prueba al igual que la prueba para el relé de ABB, se procedió con la parametrización según se expone en el punto 3.2 y se configuró la protección, con el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de operación.



**Figura 67.** Unifilar modificado.

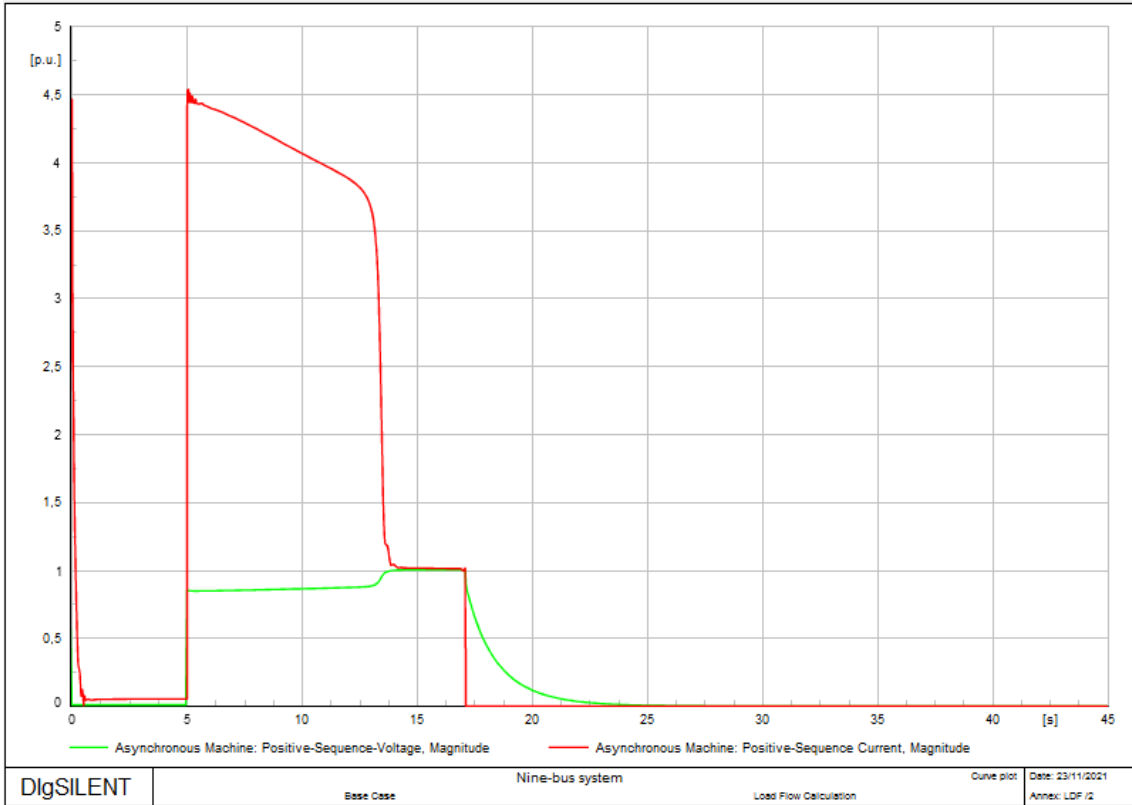


**Figura 68.** Configuración.

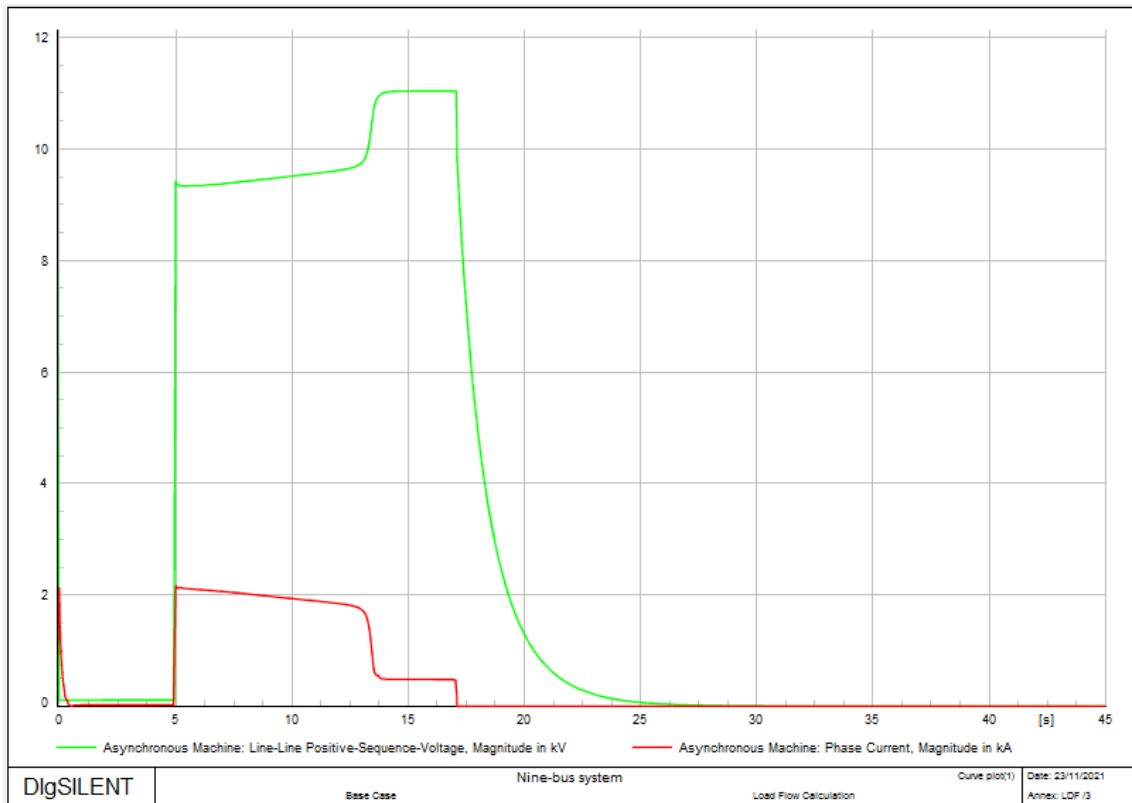
En la Tabla 19, se muestran los eventos para probar la protección 46.

**Tabla 19.** Eventos para la prueba de la protección 46.

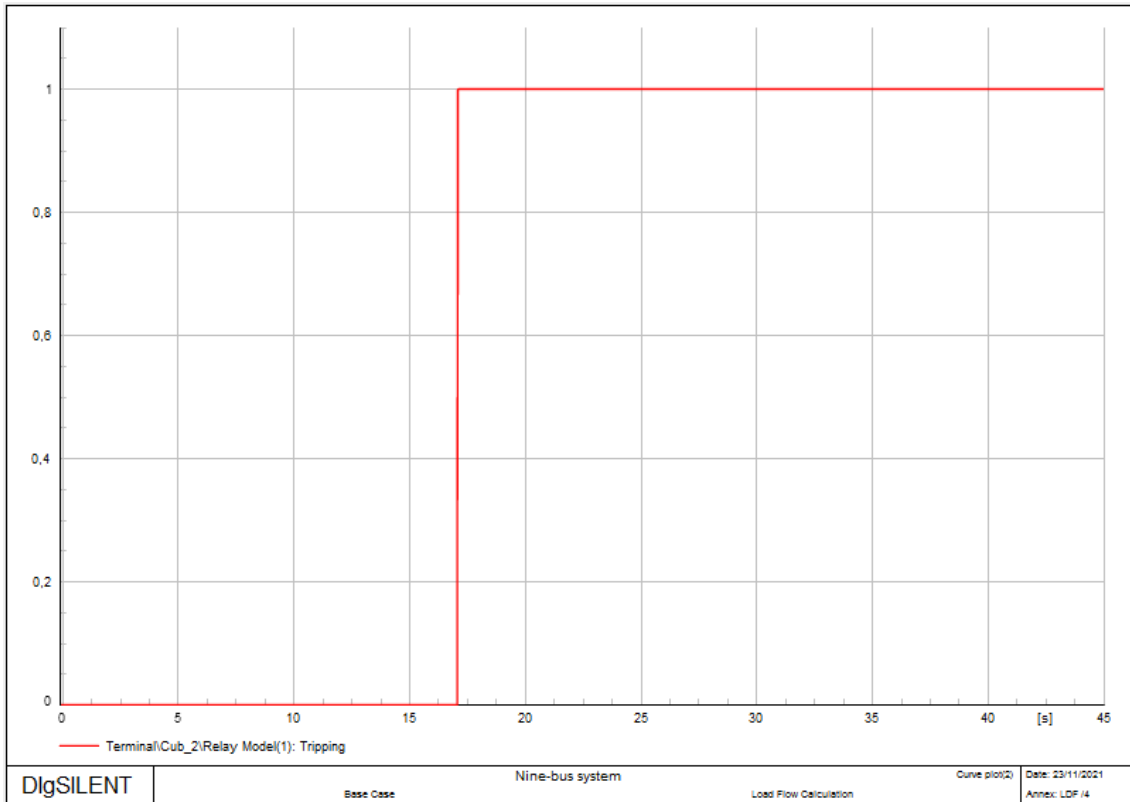
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado.	17



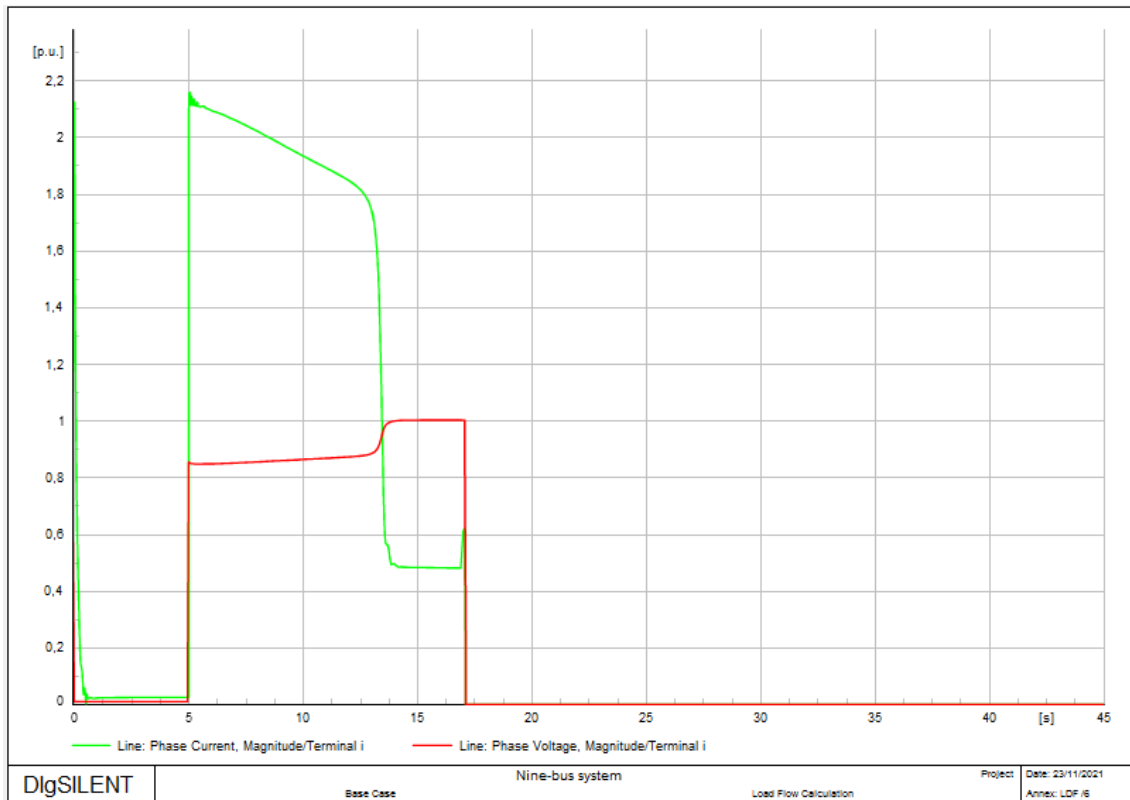
**Figura 69.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 70.** Voltaje y corriente del motor.

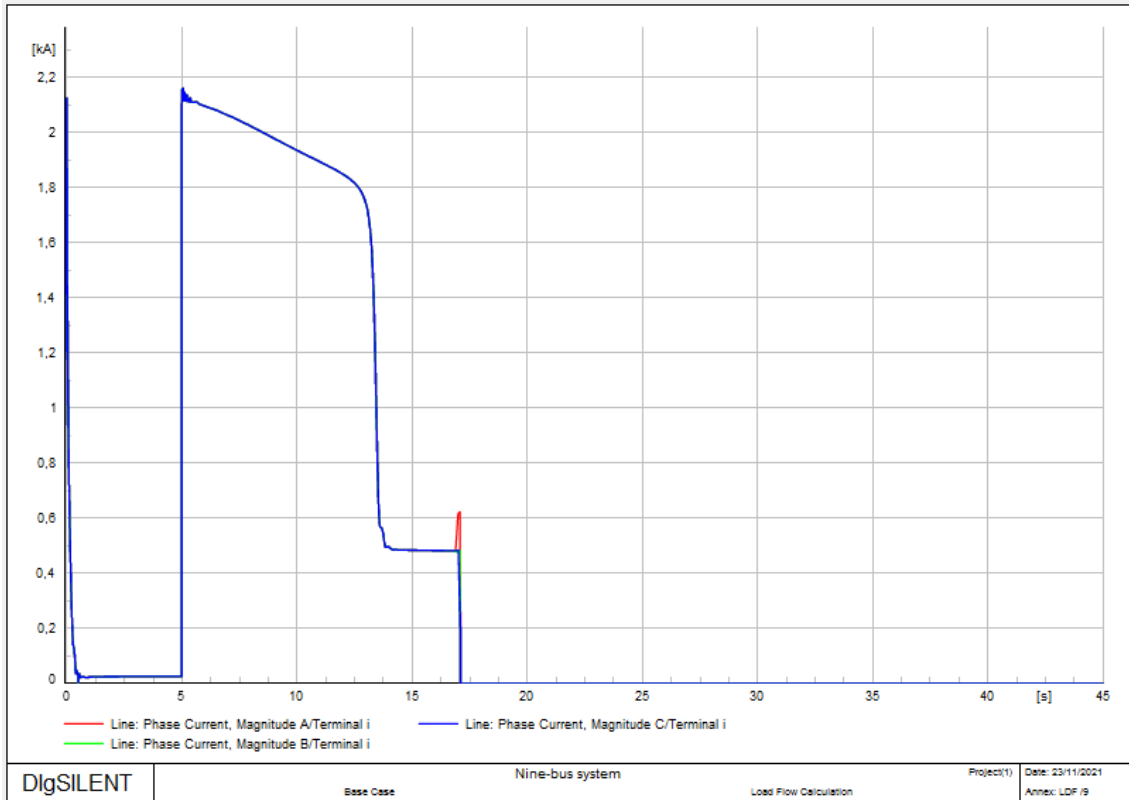


**Figura 71.** Disparo del relé.



**Figura 72.** Voltaje y corriente en pu de la línea al motor.





**Figura 73.** Corrientes de fase en la línea al motor.

Los resultados mostrados en las figuras 69-73, comprueban la correcta aplicación de la protección 46, permitiendo un arranque del motor exitoso y una operación del relé instantánea al momento de ocurrir la perturbación, confirmando que la parametrización y aplicación de la protección es la adecuada.

#### 4.1.1.2.5 Prueba de protección contra fallas a tierra temporizada (51N)

para realizar la prueba de la protección 51N, se procedió a la configuración de la protección bajo los parámetros indicados en la sección 3.2, indicando el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de actuación de la protección.

Time Overcurrent - Nine-bus System\Terminal\Cub\_2\Relay Model(1)\I0>.RelToc

Basic Data  
 Tripping Times  
 Blocking  
 Description

IEC Symbol: IE>t ANSI Symbol: 51N  
 Measure Type: Earth Current (3\*I0)

Name: I0>  
 Type: ...Generic\Motor protection\Motor protection\I0>

Out of Service  
 Reset Characteristic: Current Dependent

Tripping Direction: None  
 Characteristic: Definite Time

Current Setting: 0,10 p.u. 0,1 sec.A 50, pri.A

Time Dial: 1,00  
 Reset Delay: 0,00 s  
 Min. Time: 0,00 s  
 Max. Time: ∞ s

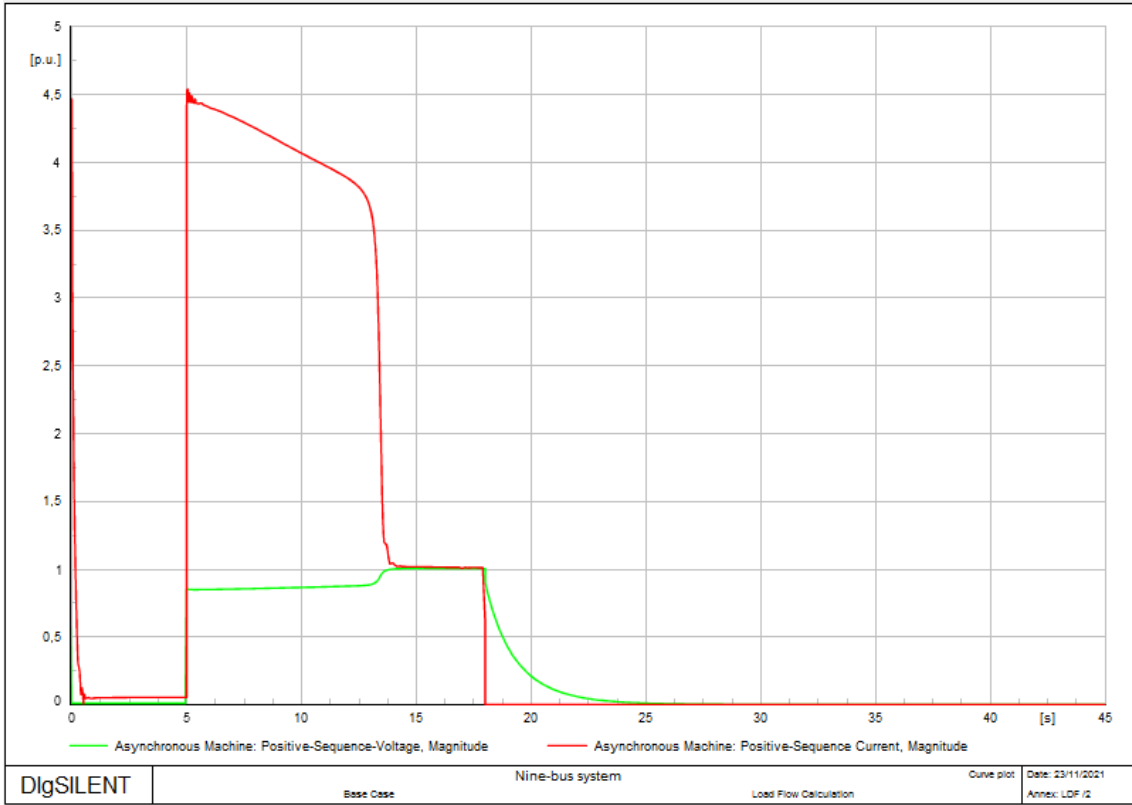
OK  
 Cancel  
 Relay  
 Calculate

**Figura 74.** Configuración.

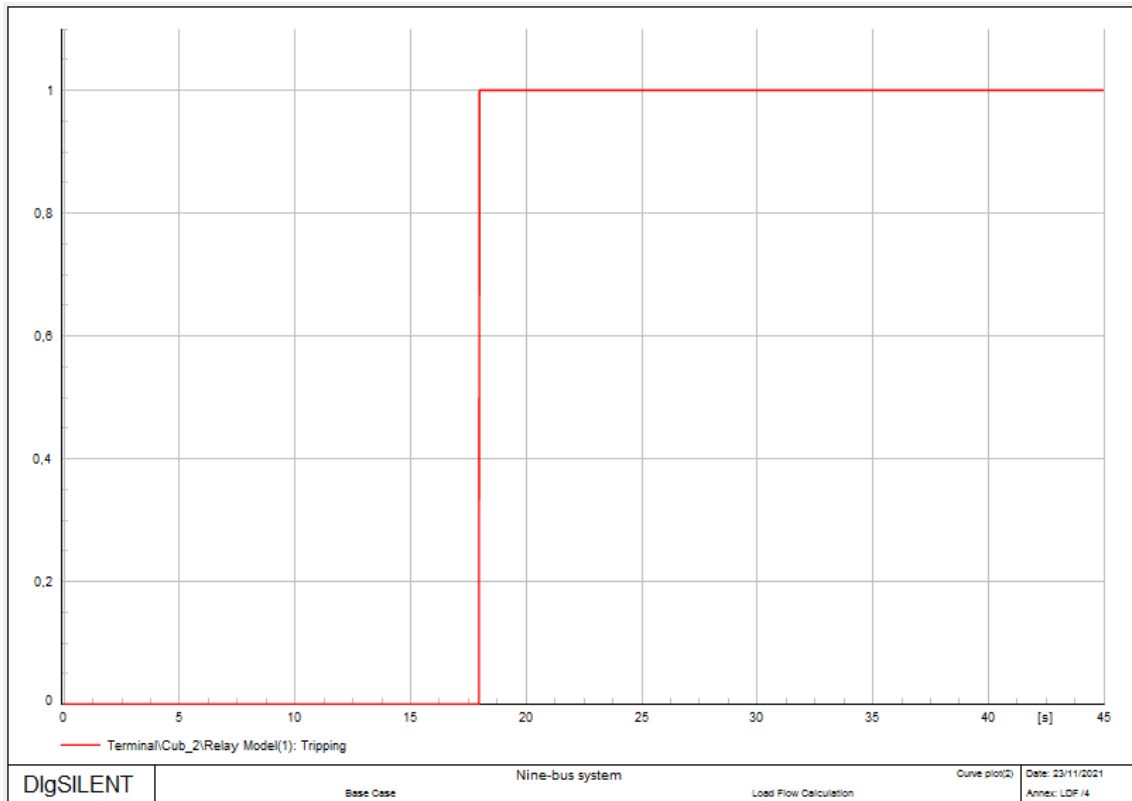
En la Tabla 20 se muestra los eventos para probar la protección 51N.

**Tabla 20.** Eventos para prueba de protección 51N.

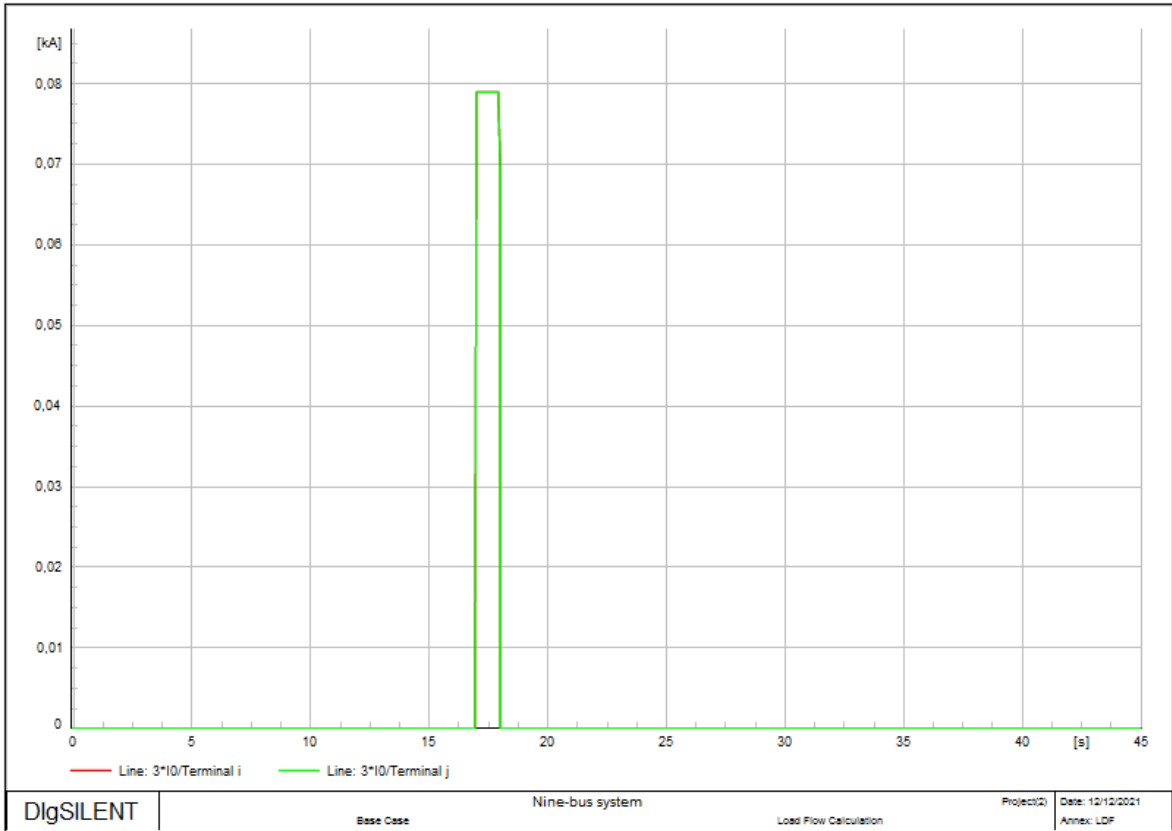
	Eventos	Tiempo [s]
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado.	17



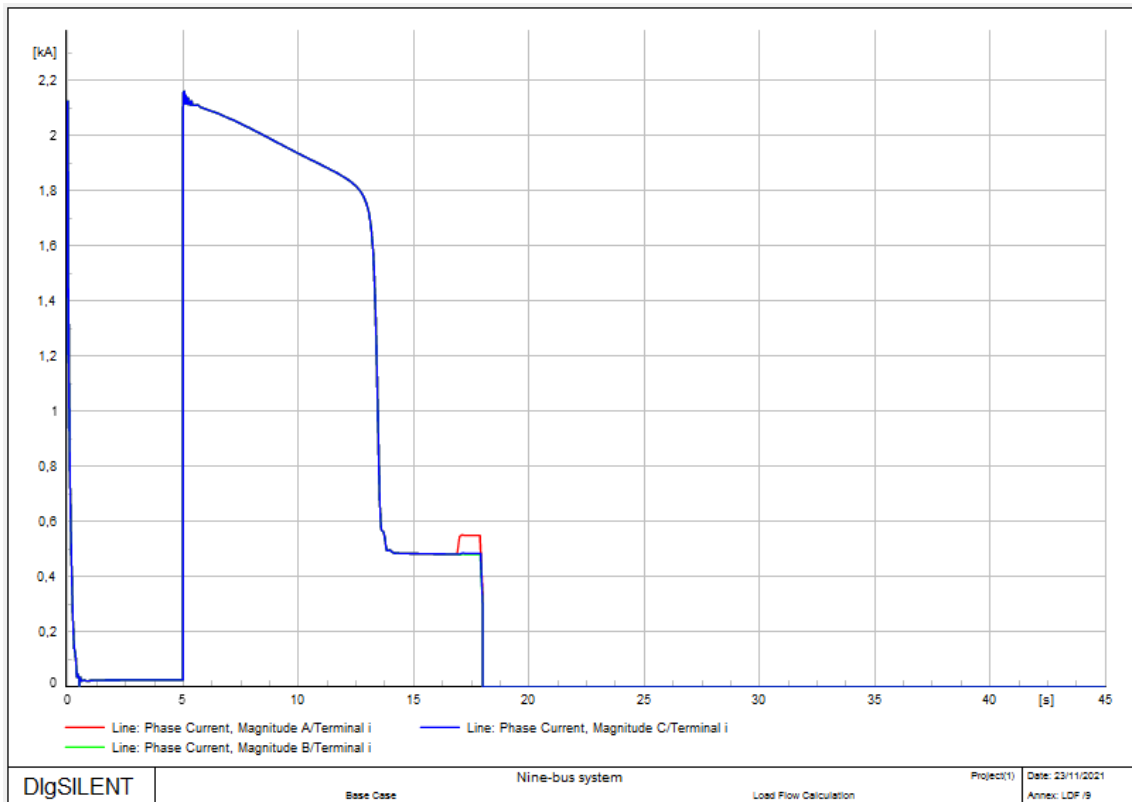
**Figura 75.** Voltaje y corriente del motor en pu.



**Figura 76.** Disparo del relé.



**Figura 77.** Corriente de secuencia cero de la línea al motor.

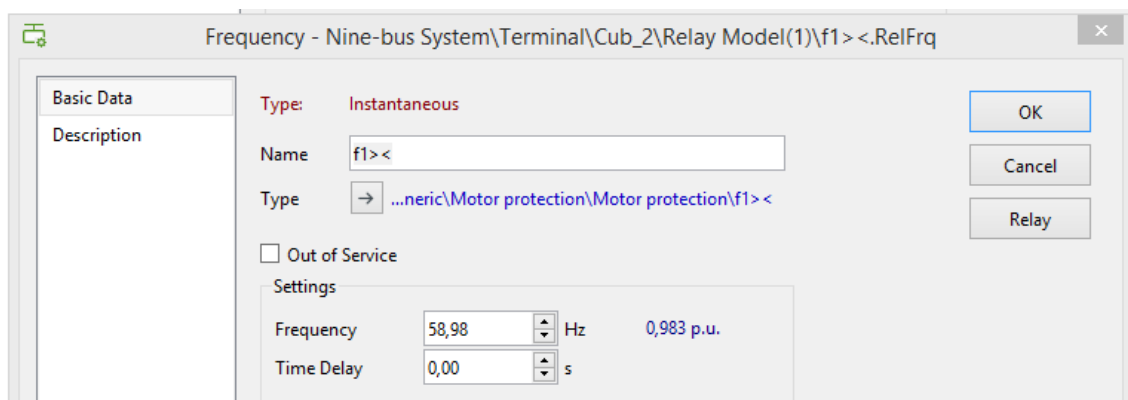


**Figura 78.** Corrientes de fase de la línea al motor.

En las Figuras 75-78 se muestran los resultados de la prueba realizada a la protección 51N, donde se puede observar un exitoso arranque del motor, posteriormente se observa la perturbación simulada y la operación adecuada de la protección, verificando su correcta parametrización.

#### 4.1.1.2.6 Prueba de la protección de baja frecuencia (81)

Para la prueba de la protección 81, se configuró bajo la parametrización propuesta en el punto 3.2, ingresando la frecuencia mínima de operación del relé y el tiempo, que para este caso debe ser instantáneo. Para la prueba de esta protección, una vez la frecuencia de sistema se encuentre estable, se simuló la conexión de una carga reactiva grande en paralelo con el motor para poder simular una caída de frecuencia.

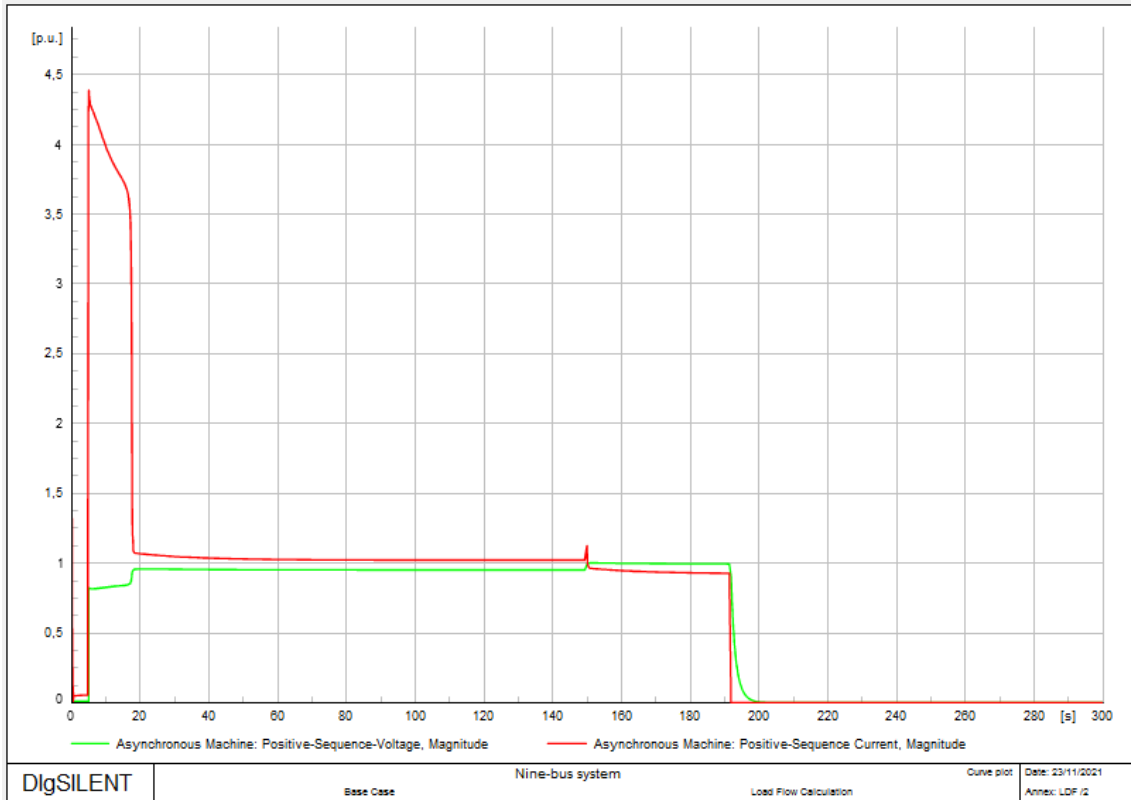


**Figura 79.** Configuración.

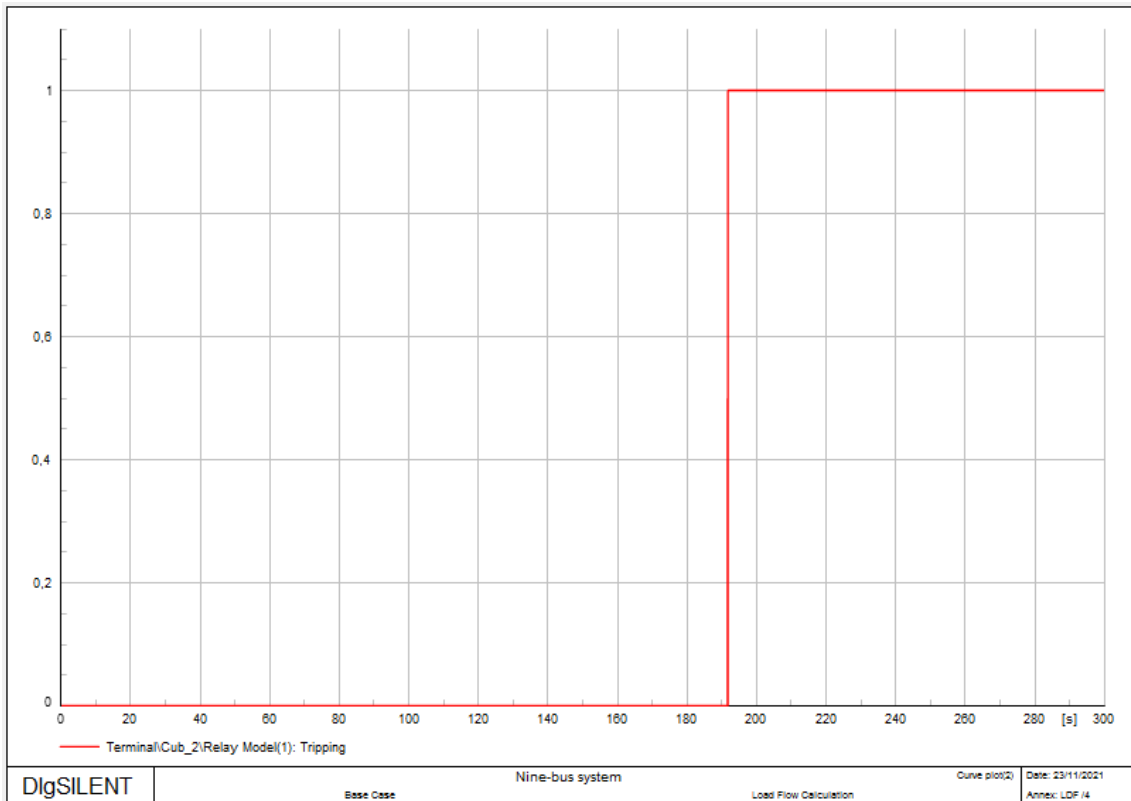
La Tabla 21 muestra los eventos para simular la prueba de la protección 81.

**Tabla 21.** Eventos para la prueba de la protección 81.

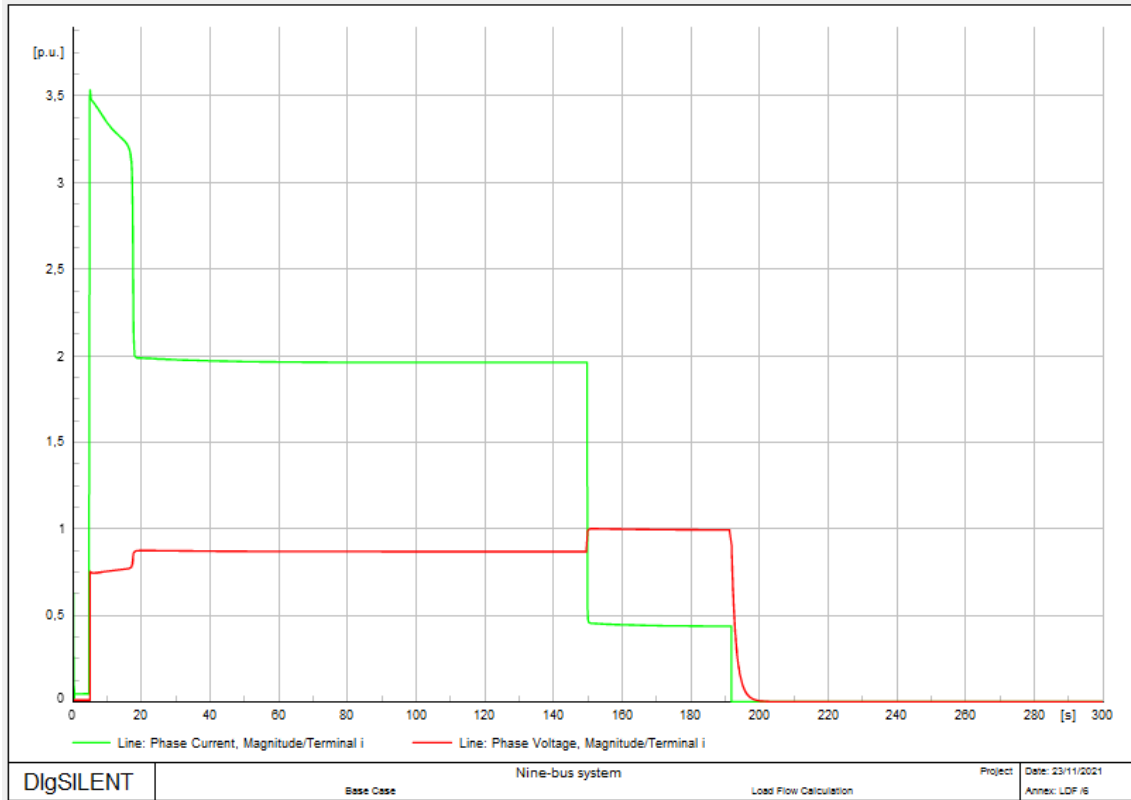
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -99	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a 0	5
Parámetro de cambio	Switch de la carga a abierto.	150



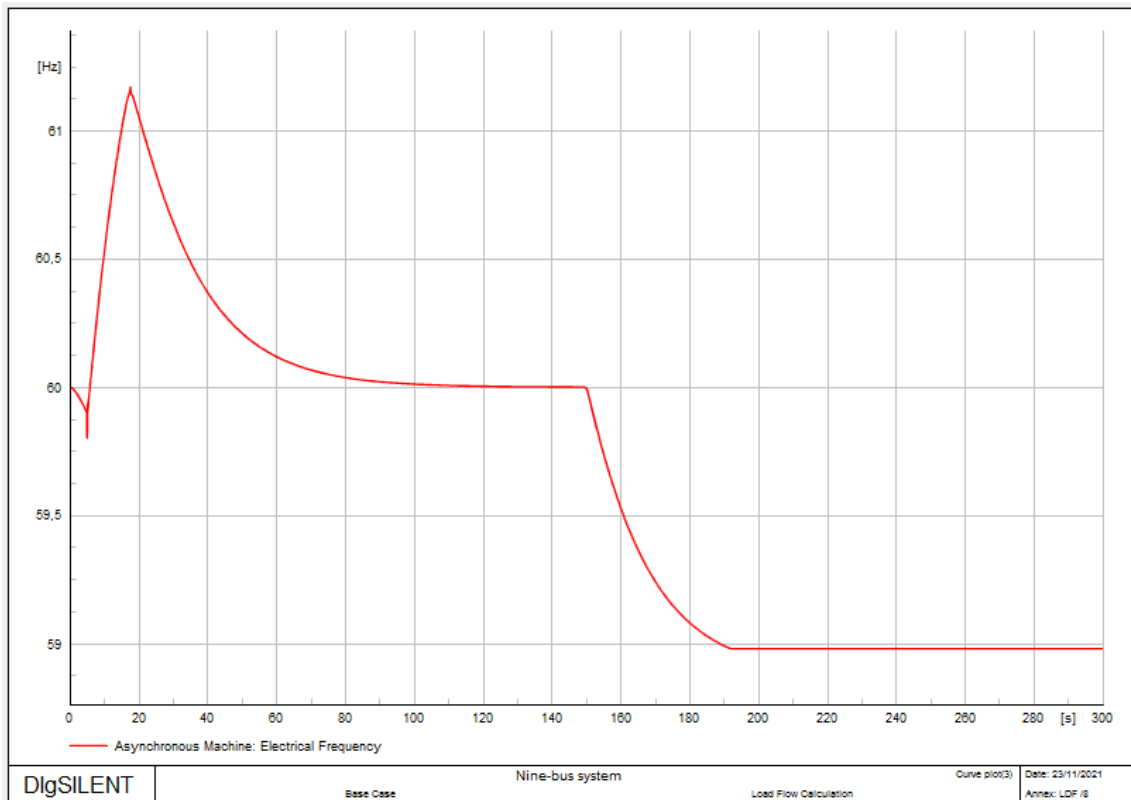
**Figura 80.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 81.** Disparo del relé.



**Figura 82.** Voltaje y corriente en pu de la línea al motor.



**Figura 83.** Frecuencia del motor en Hz.

Las Figuras 80-83 muestran los resultados éxitos de la prueba de la protección 81, donde se puede observar el voltaje, la corriente y la frecuencia del motor, donde el arranque es exitoso y cuando ocurre la perturbación, la protección actúa de forma instantánea tal como se configuró al inicio.

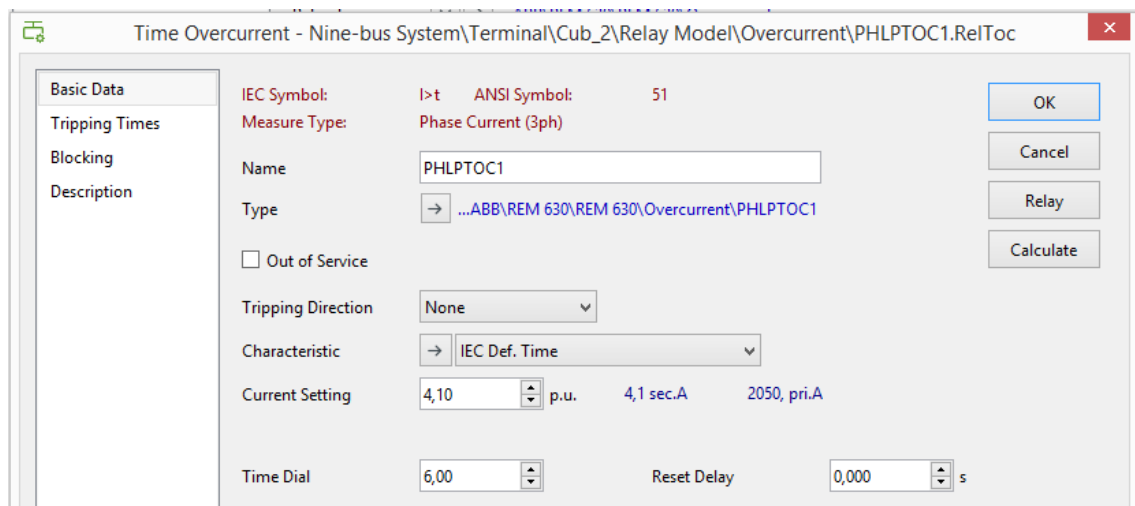
#### 4.1.2 ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR

Para el arranque por autotransformador se probaron las protecciones: térmica (49), sobrecorriente instantánea (50) y sobrecorriente temporizada (51).

##### 4.1.2.1 ABB

###### 4.1.2.1.1 Prueba de protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de sobrecorriente temporizada, se procedió con la misma configuración mostrada en el punto 4.1.1.1.2 y se obtuvo lo siguiente:

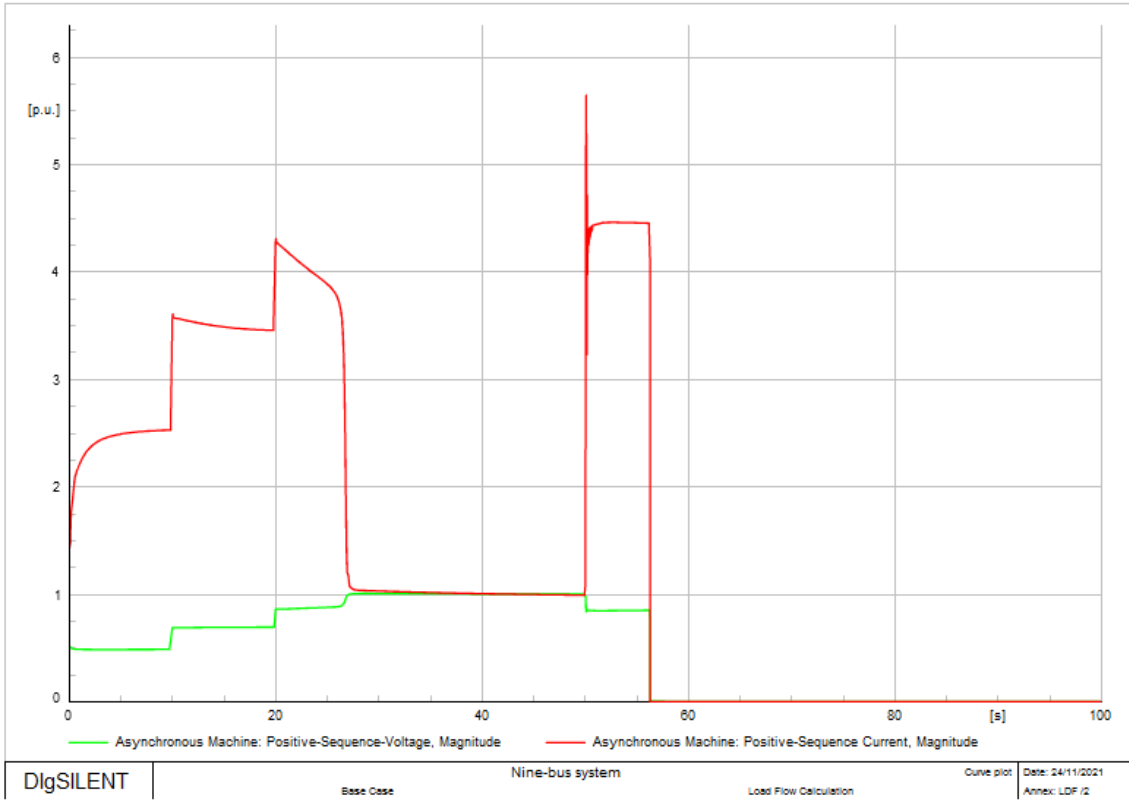


**Figura 84.** Configuración.

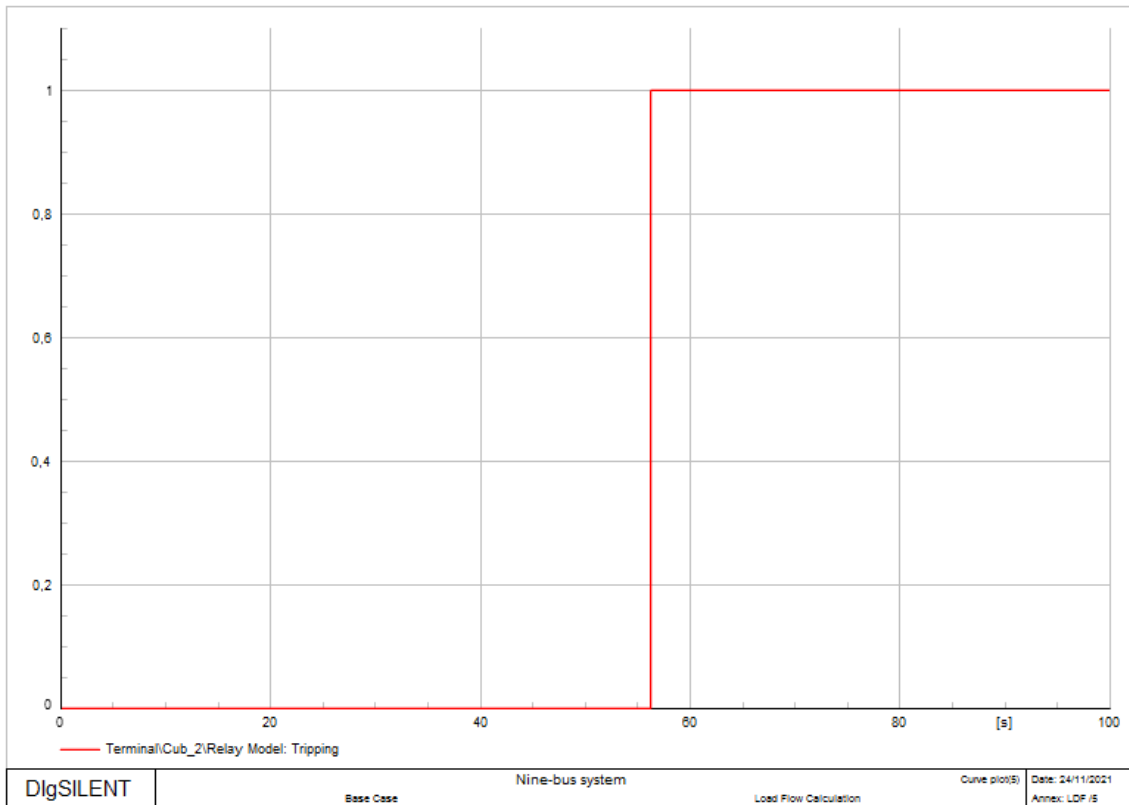
**Tabla 22.** Eventos para prueba de protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -50	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a -25	10
	Posición del tap a 0	20
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdm1p a 6 [pu]	50





**Figura 85.** Voltaje y corriente en pu del motor.



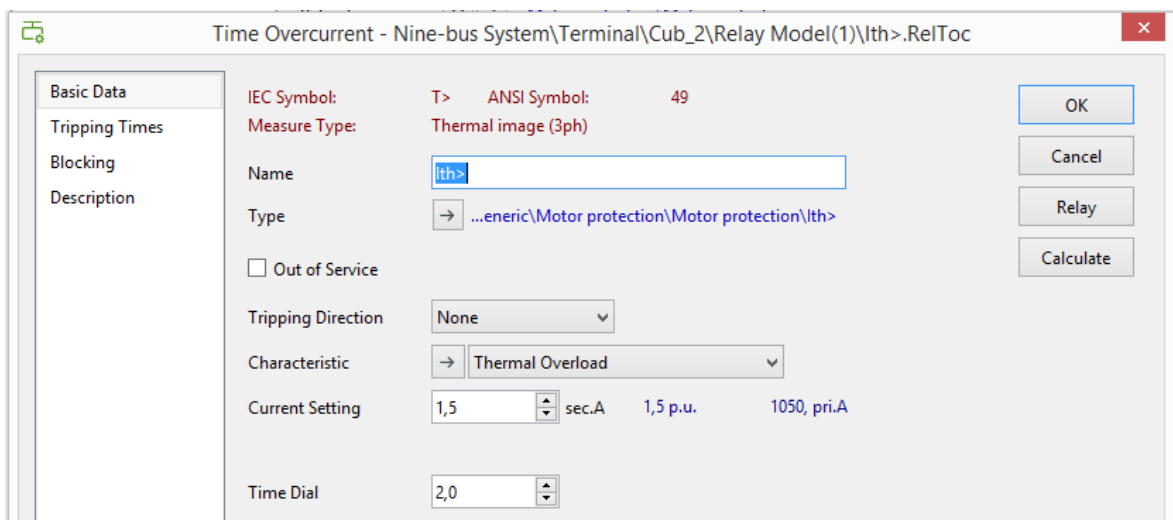
**Figura 86.** Disparo del relé.

Las Figuras 85 y 86 muestran la correcta operación de la protección 51 del relé ABB considerando el arranque de autotransformador exitoso y la operación de la protección cuando ocurre la perturbación.

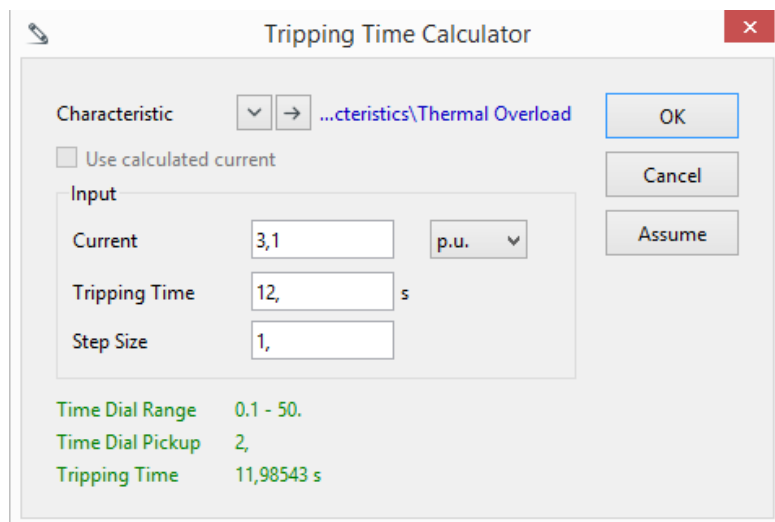
#### 4.1.2.2 GENÉRICO

##### 4.1.2.2.1 Prueba de la protección térmica (49)

La parametrización de esta protección se configuro según lo expuesto en el punto 4.1.1.2.1, teniendo en cuenta el cálculo del dial obtenido directamente del software PowerFactory así como el tiempo de arranque y los valores de la corriente del motor en el arranque.



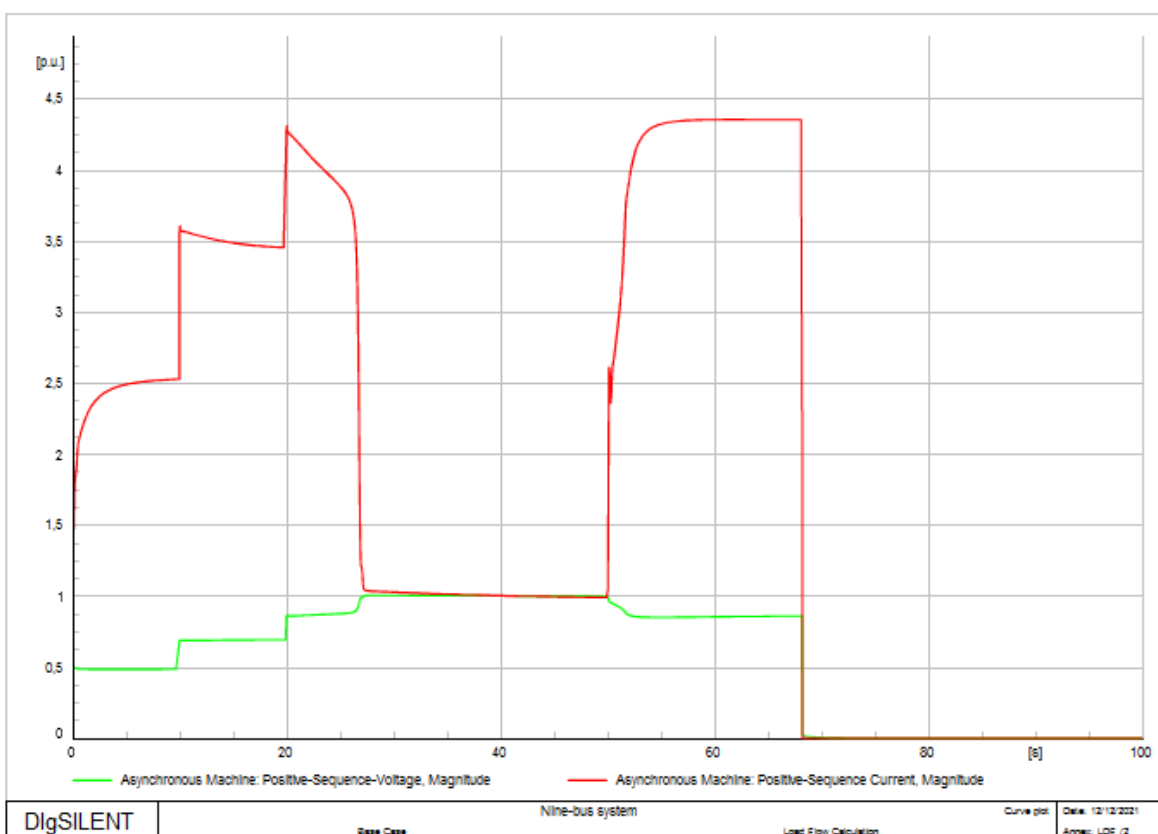
**Figura 87.** Configuración.



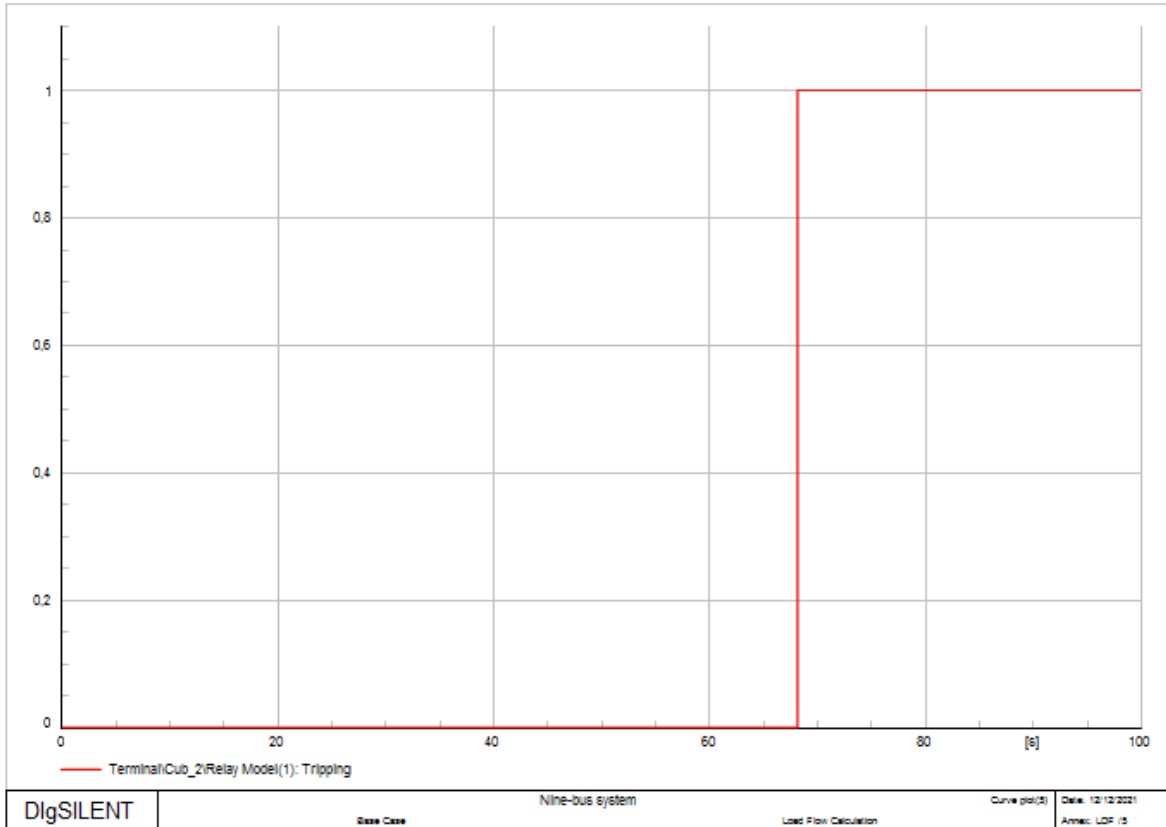
**Figura 88.** Cálculo de Time dial protección 49.

**Tabla 23.** Eventos para prueba de protección 49.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -50	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a -25	10
	Posición del tap a 0	20
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 1,75 [pu]	50



**Figura 89.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 90.** Disparo del relé.

Las Figuras 89 y 90 muestran los resultados de la prueba para la protección 49 con arranque de autotransformador exitosa, y una correcta actuación del relé al momento de ocurrir la perturbación.

#### 4.1.2.2.2 Prueba de protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de la protección 51 se configuró los parámetros según lo indicado en el punto 3.2 y se obtuvo lo siguiente.

Time Overcurrent - Nine-bus System\Terminal\Cub\_2\Relay Model(1)\I>.RelToc

Basic Data  
 Tripping Times  
 Blocking  
 Description

IEC Symbol: I>t ANSI Symbol: 51  
 Measure Type: Phase Current (3ph)

Name: <>  
 Type: ...\\Generic\Motor protection\Motor protection\I>

Out of Service  
 Reset Characteristic: Disabled

Tripping Direction: None

Characteristic: Definite Time

Current Setting: 2,80 p.u. 2,8 sec.A 1960, pri.A

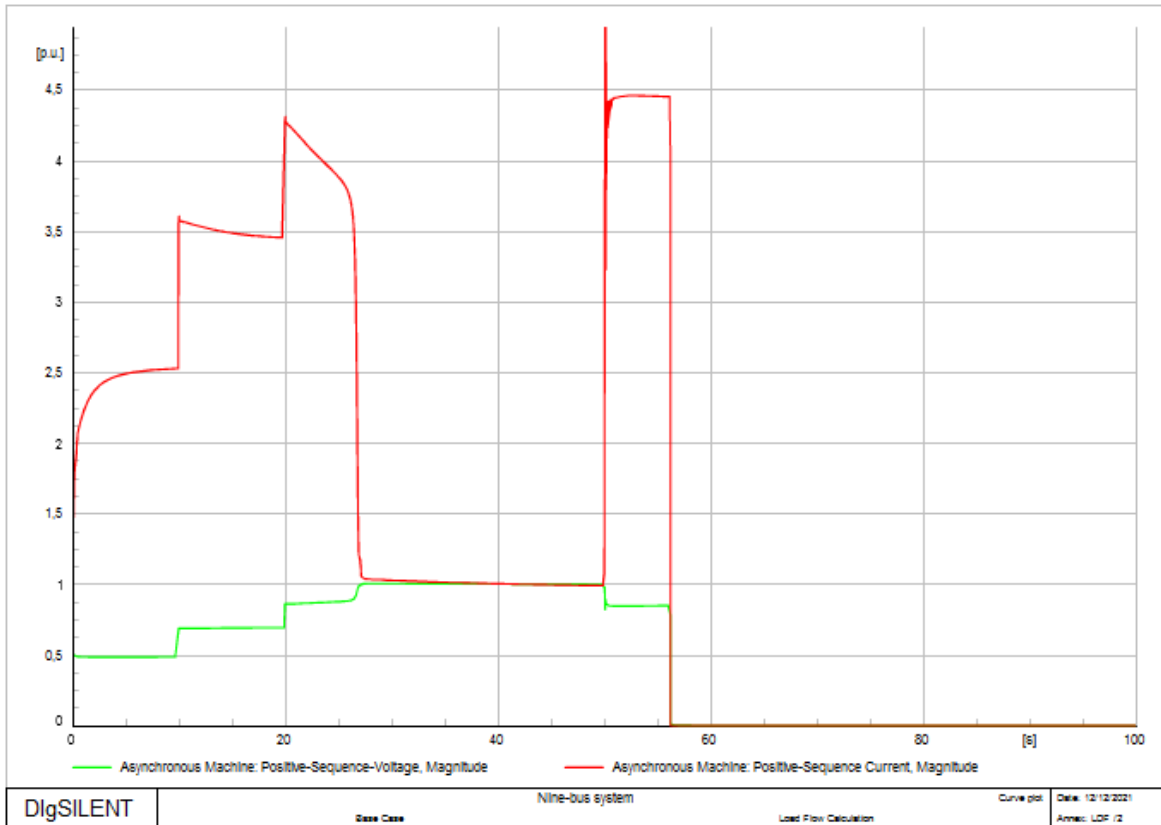
Time Dial: 6,00  
 Reset Delay: 0,00 s  
 Min. Time: 0,00 s  
 Max. Time: ∞ s

OK  
 Cancel  
 Relay  
 Calculate

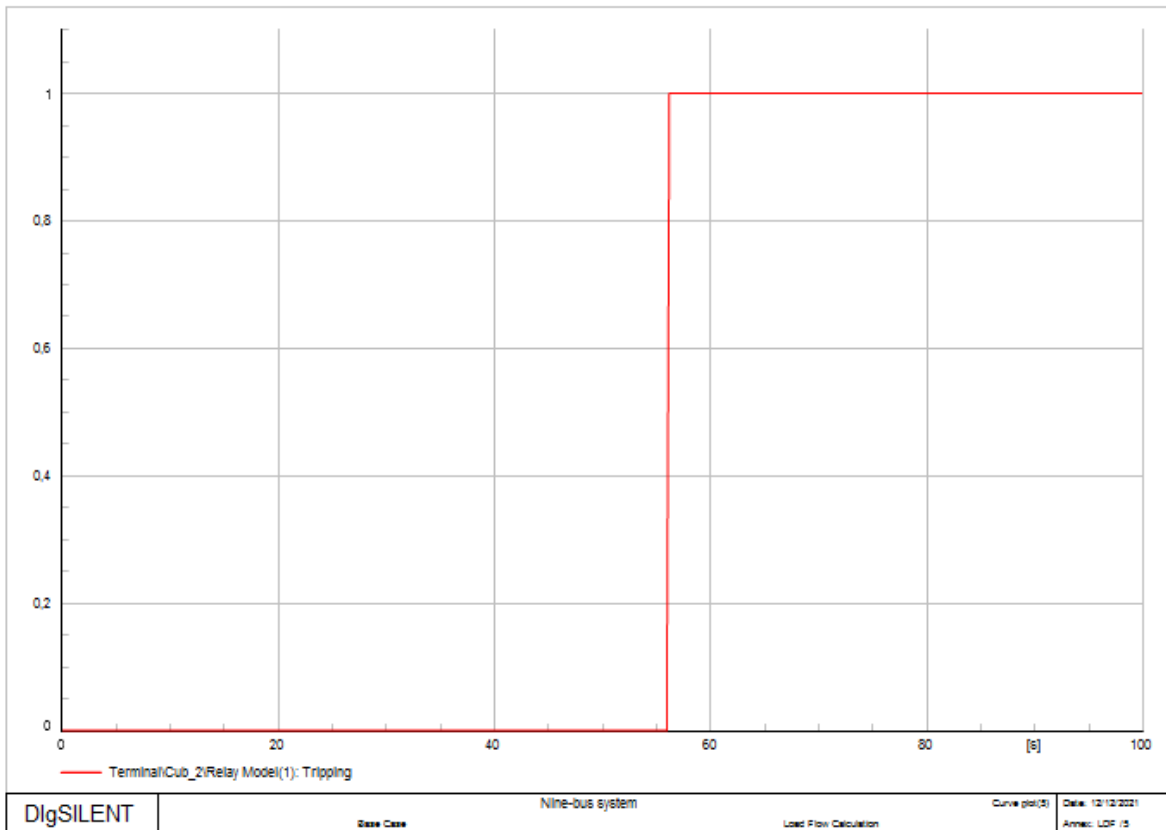
**Figura 91.** Configuración.

**Tabla 24.** Eventos para prueba de protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -50	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a -25	10
	Posición del tap a 0	20
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	50



**Figura 92.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 93.** Disparo del relé.

Las Figuras 92 y 93 muestran los resultados de la prueba exitosa de la protección 51, teniendo un arranque con autotransformador y una operación de la protección al momento de sentir la perturbación simulada.

#### 4.1.2.2.3 Prueba de protección de sobrecorriente instantánea (50).

Para la prueba de la protección 50 se parametrizó la protección con los valores sugeridos en el punto 3.2 obteniendo la siguiente configuración.

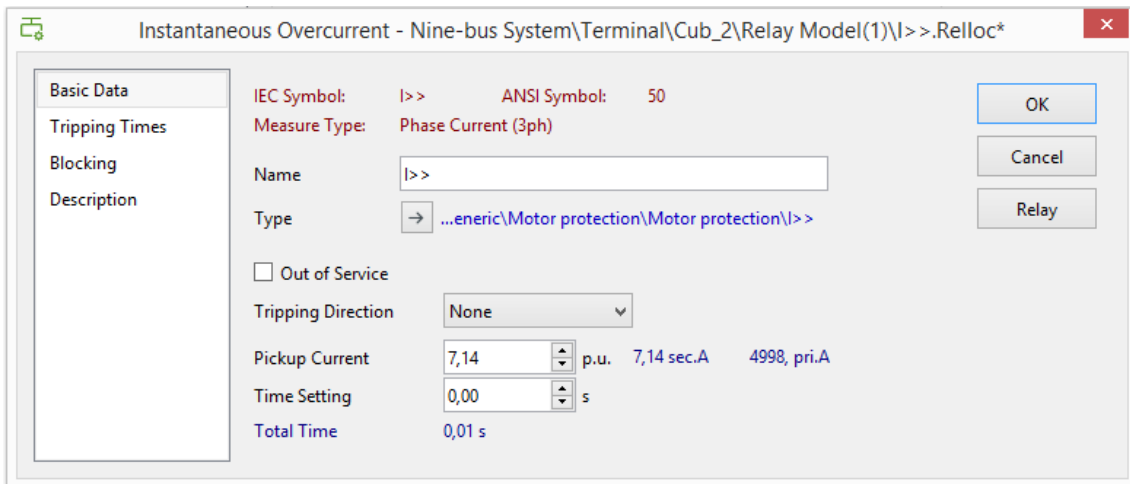
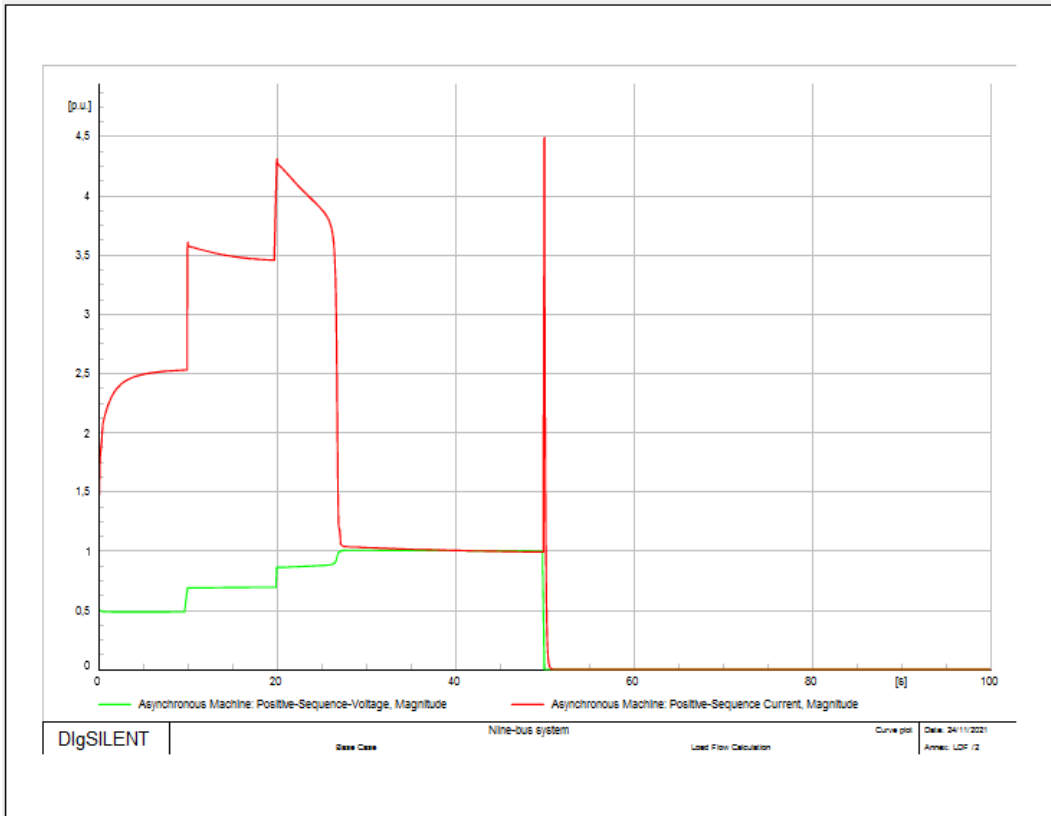


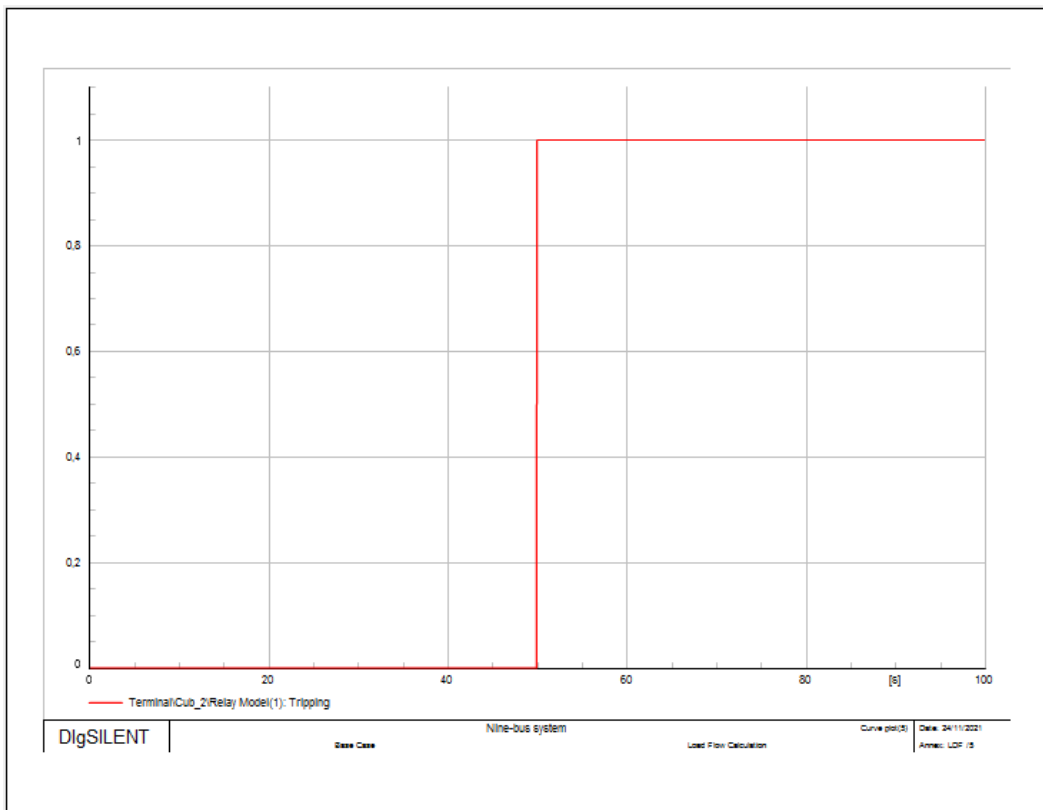
Figura 94. Configuración.

**Tabla 25.** Eventos para prueba de protección 50.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Posición del tap a -50	0
	Switch del motor a cerrado	1
	Posición del tap a -25	10
	Posición del tap a 0	20
Parámetro de cambio	Cortocircuito en barra del motor.	50



**Figura 95.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 96.** Disparo del relé.



Las Figuras 95 y 96 indican la correcta operación de la protección en prueba, teniendo un arranque por autotransformador exitosa y una operación del relé instantánea cuando ocurre la perturbación.

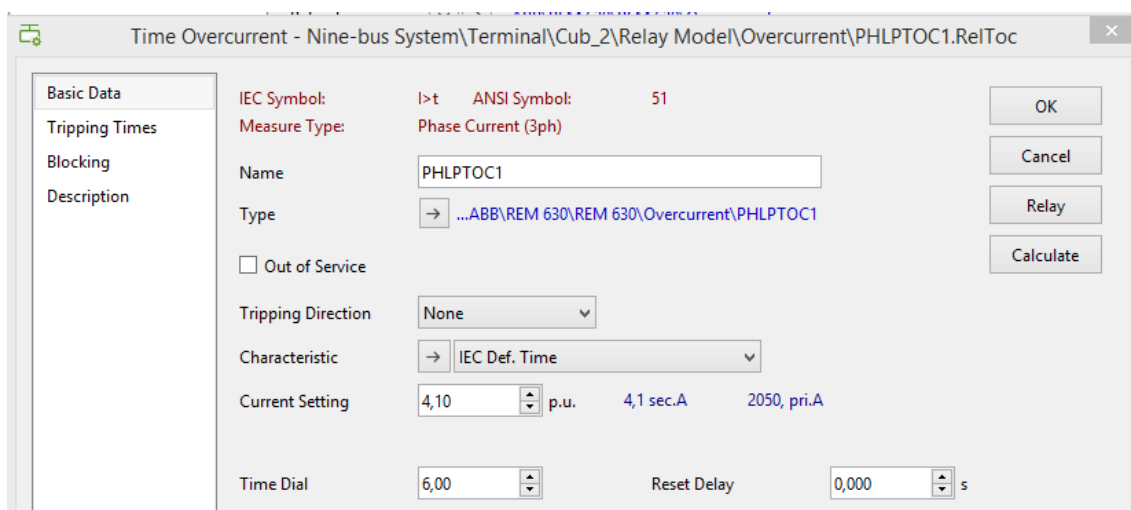
### 4.1.3 ARRANQUE CON REACTOR.

Para el arranque por reactor se probaron las protecciones: térmica (49), sobrecorriente instantánea (50) y sobrecorriente temporizada (51).

#### 4.1.3.1 ABB

##### 4.1.3.1.1 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de sobrecorriente temporizada, se procedió con la misma configuración mostrada en el punto 4.1.1.1.2 y se obtuvo lo siguiente:



**Figura 97.** Configuración.

**Tabla 26.** Eventos de prueba para protección 51

	Eventos	Tiempo [s]
Arranque de motor.	xstadd a 1	0
	Switch del motor a cerrado	1
	xstadd a 0,75	2
	xstadd a 0,5	6
	xstadd a 0,25	8
	xstadd a 0	11
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	20

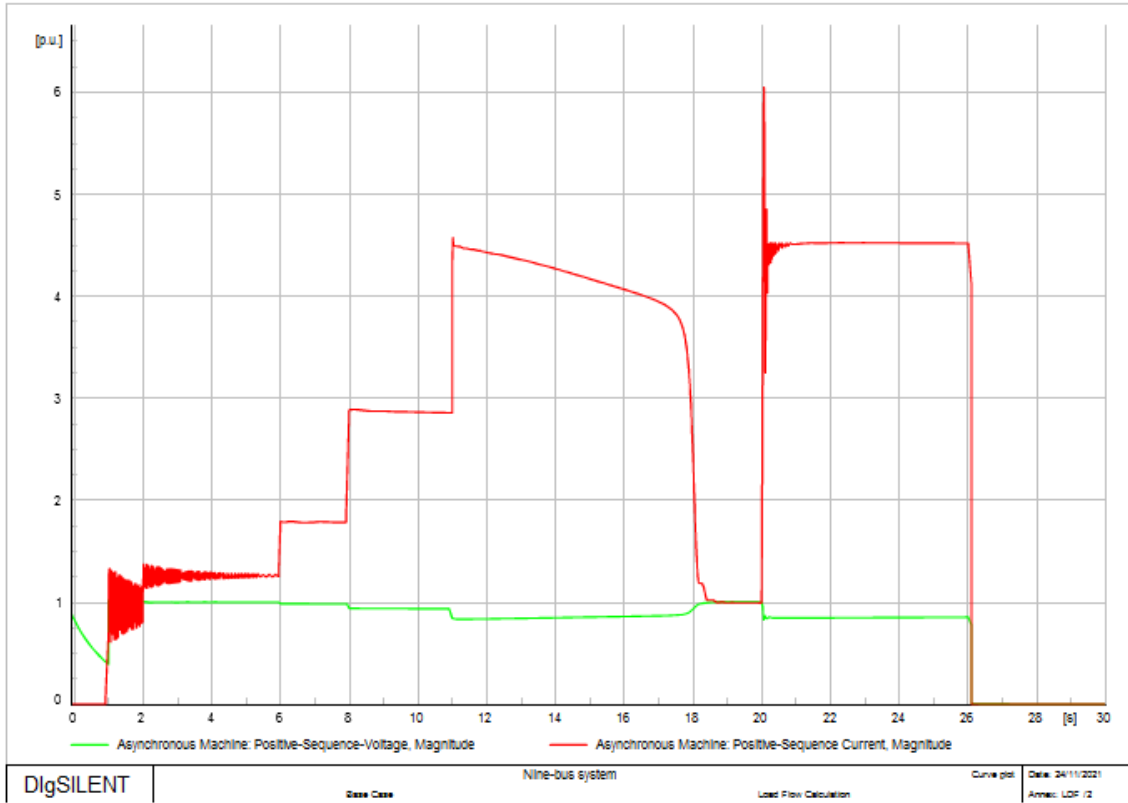


Figura 98. Voltaje y corriente en pu del motor.

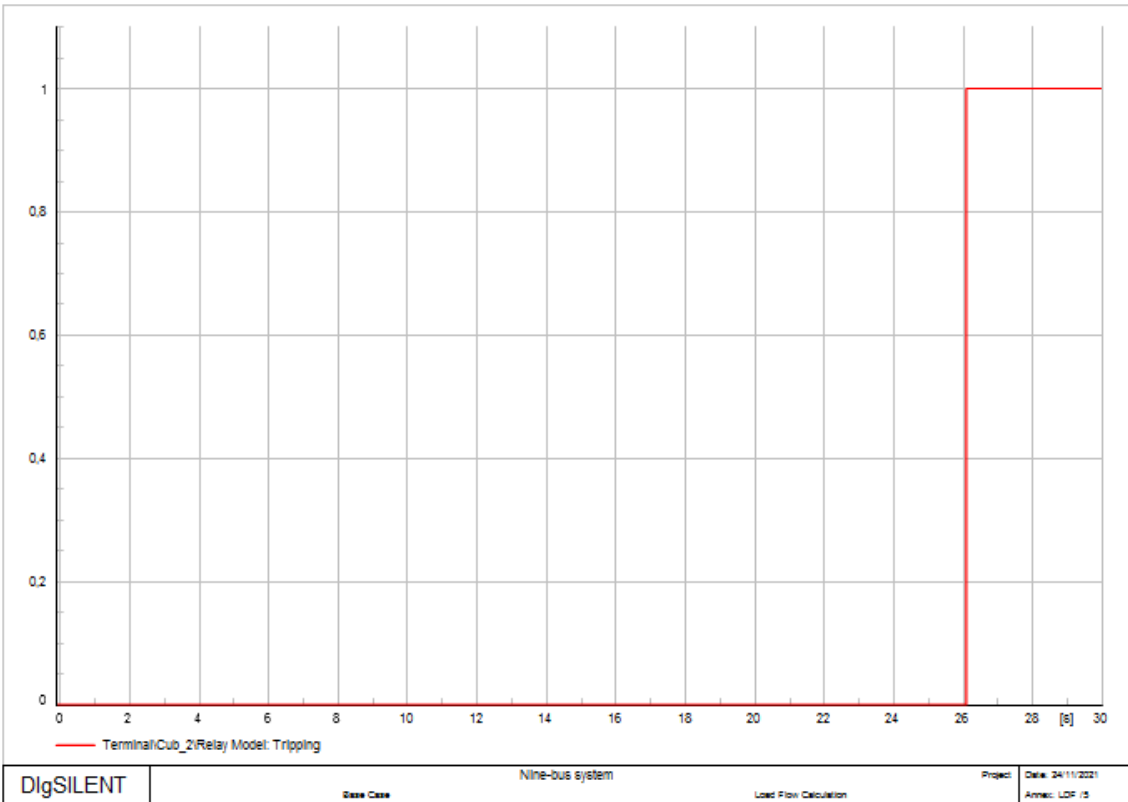


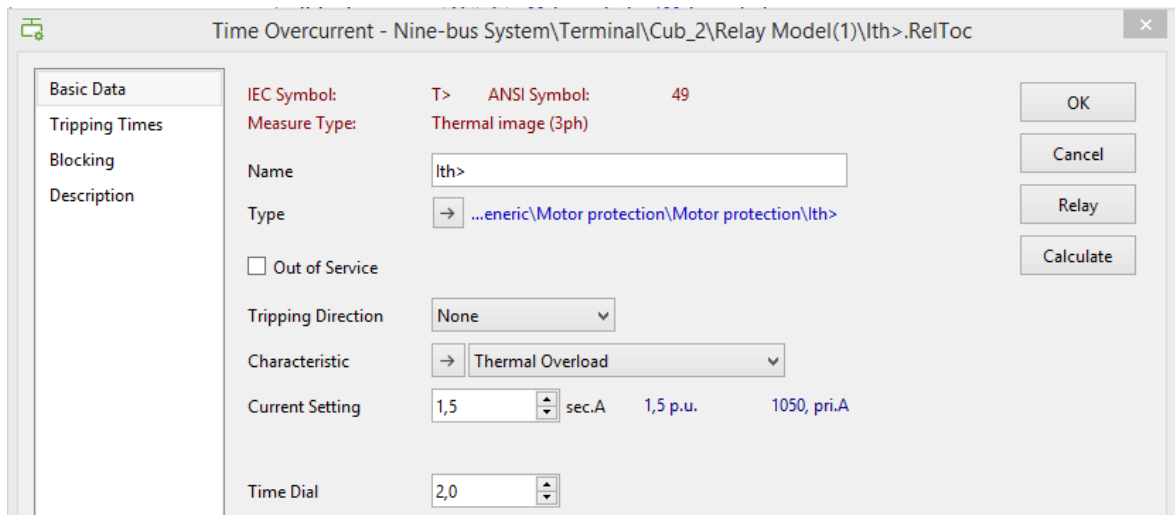
Figura 99. Disparo del relé.

Las Figuras 98 y 99 muestran los resultados de la prueba aplicada a la protección 51, obteniendo una correcta parametrización ya que se obtuvo un arranque por reactor conectado al estator exitoso y una actuación correcta del relé cuando ocurre la perturbación.

### 4.1.3.2 RELÉ GENÉRICO.

#### 4.1.3.2.1 Prueba de la protección térmica (49)

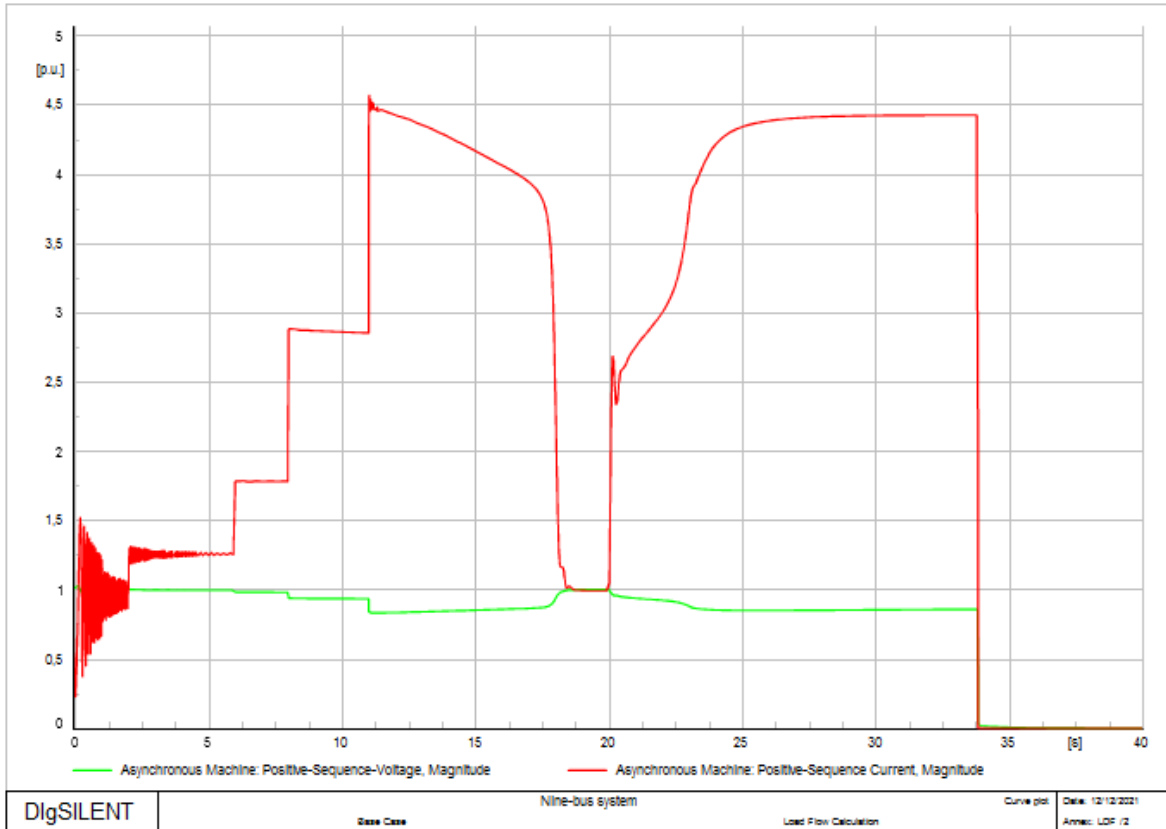
La parametrización de esta protección se configuró como lo expuesto en el punto 4.1.1.2.1, teniendo en cuenta el cálculo del dial obtenido directamente del software PowerFactory así como el tiempo de arranque y los valores de la corriente del motor en el arranque.



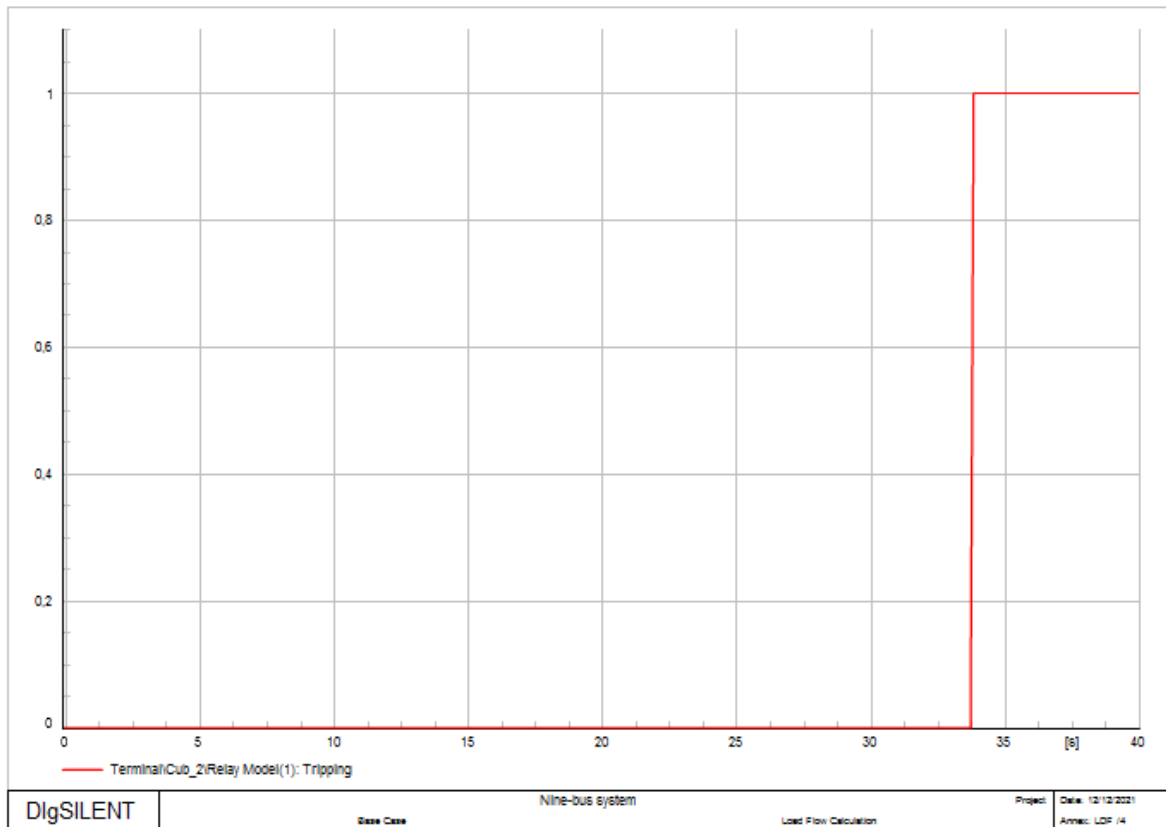
**Figura 100.** Configuración.

**Tabla 27.** Eventos para prueba de protección 49.

	Eventos	Tiempo [s]
Arranque de motor.	xstadd a 1	0
	Switch del motor a cerrado	1
	xstadd a 0,75	2
	xstadd a 0,5	6
	xstadd a 0,25	8
	xstadd a 0	11
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 1,75 [pu]	20



**Figura 101.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 102.** Disparo del relé.

Las Figuras 101 y 102 muestran el resultado de la prueba aplicada a la protección 49, obteniendo una respuesta satisfactoria, tanto en el arranque del motor como en la operación de la protección al ocurrir la perturbación simulada.

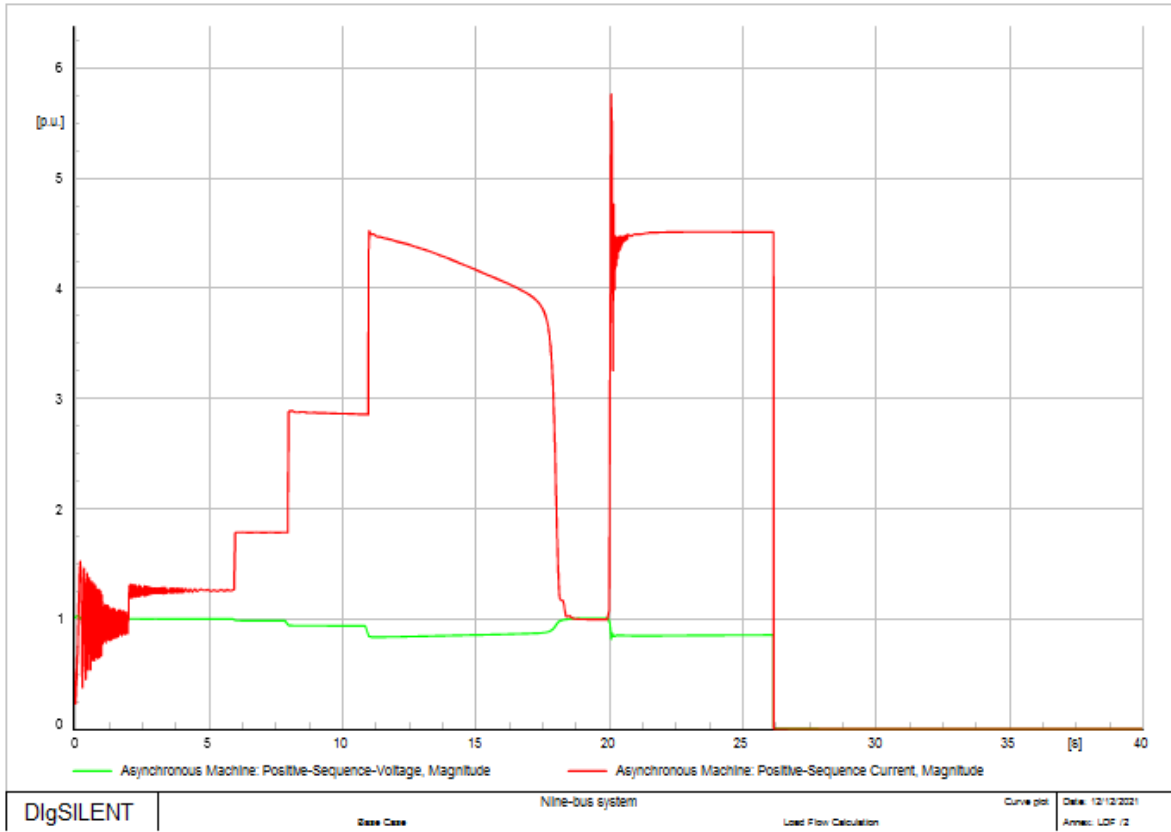
#### 4.1.3.2.2 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de la protección 51 se configuró los parámetros según lo indicado en el punto 3.2 y se obtuvo lo siguiente.

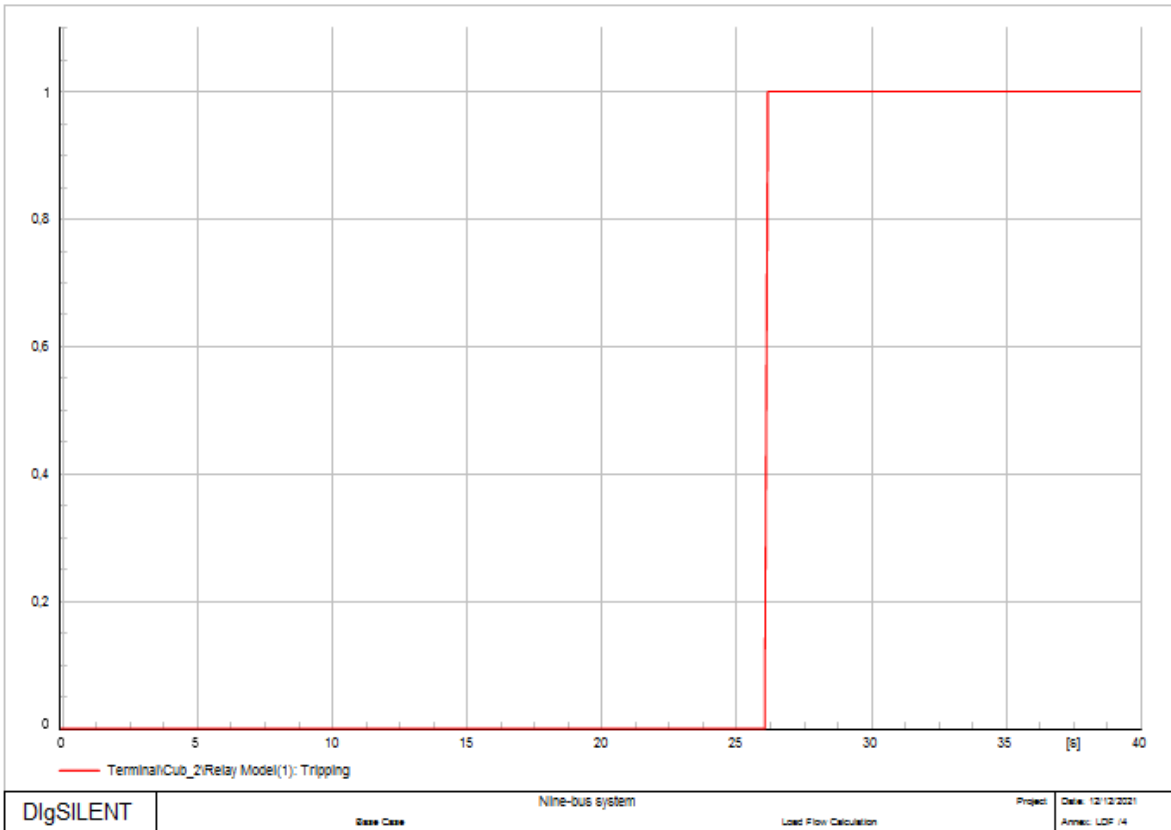
**Figura 103.** Configuración.

**Tabla 28.** Eventos para prueba de protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	xstadd a 1	0
	Switch del motor a cerrado	1
	xstadd a 0,75	2
	xstadd a 0,5	6
	xstadd a 0,25	8
	xstadd a 0	11
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6[pu]	25



**Figura 104.** Voltaje y corriente en pu del motor.

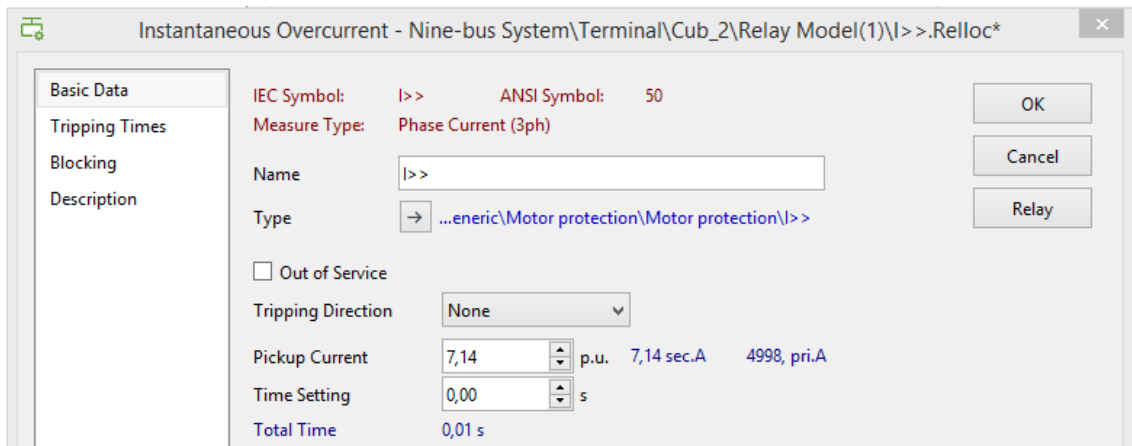


**Figura 105.** Disparo del relé.

Las Figuras 104 y 105 muestran el resultado exitoso de la prueba a la protección 51, donde se puede observar un exitoso arranque del motor y una operación correcta de la protección al momento de ocurrir la perturbación.

#### 4.1.3.2.3 Prueba de protección de sobrecorriente instantánea (50)

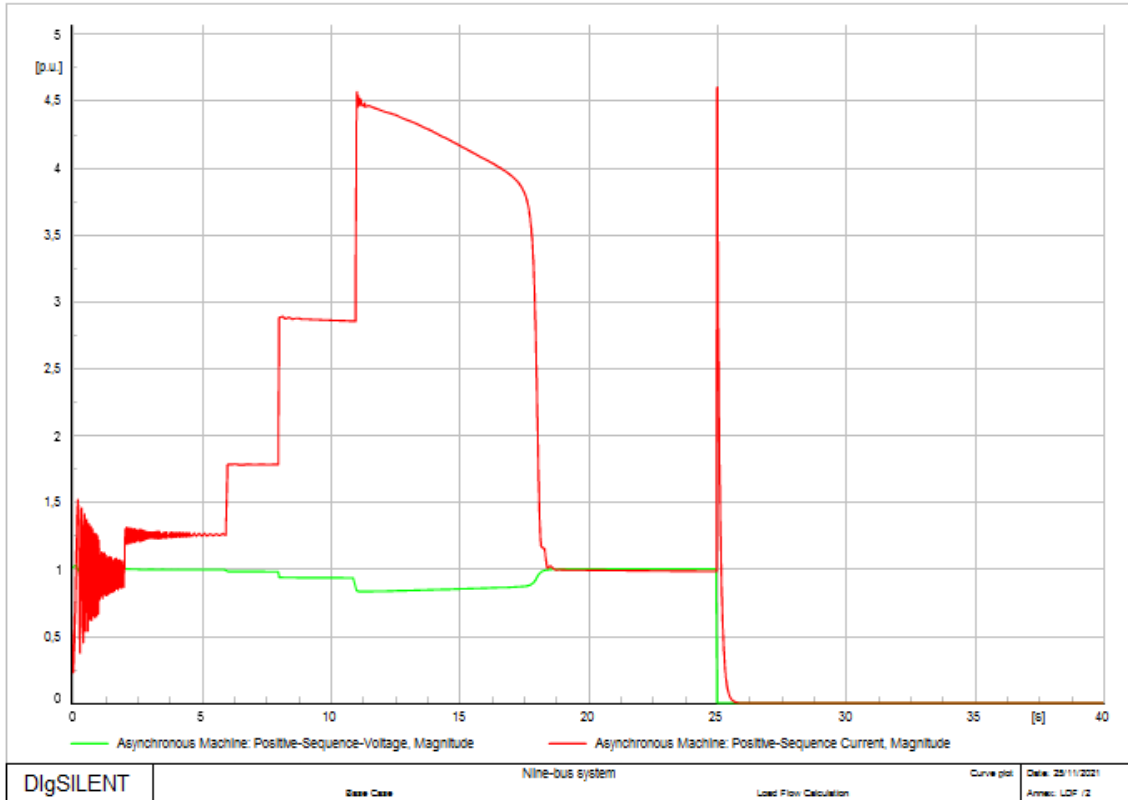
Para la prueba de la protección 50 se parametrizó la protección con los valores sugeridos en el punto 3.2 obteniendo la siguiente configuración.



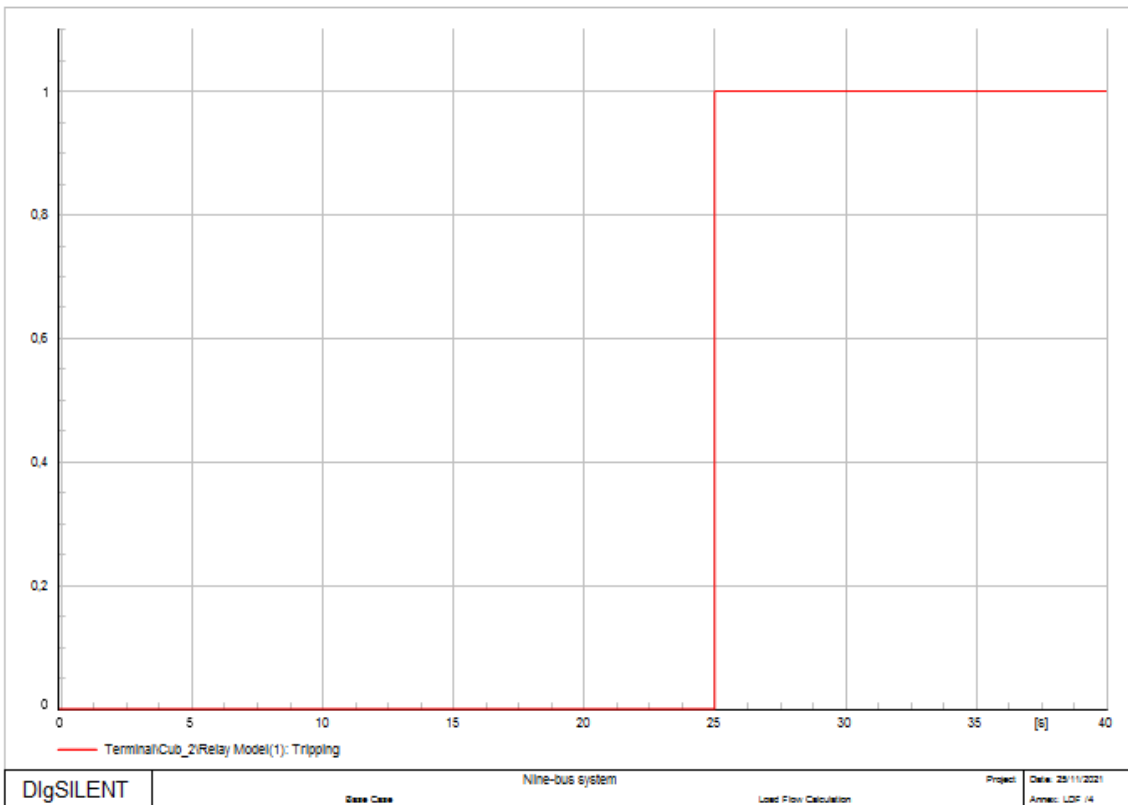
**Figura 106.** Configuración.

**Tabla 29.** Eventos de prueba para protección 50.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	xstadd a 1	0
	Switch del motor a cerrado	1
	xstadd a 0,75	2
	xstadd a 0,5	6
	xstadd a 0,25	8
	xstadd a 0	11
Parámetro de cambio	Cortocircuito en barra del motor.	25



**Figura 107.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 108.** Disparo del relé.



Las figuras 107 y 108 muestran los resultados obtenidos al realizar la prueba de la protección 50, obteniendo un arranque exitoso y una operación instantánea de la protección al simular la perturbación de prueba, en este caso un cortocircuito.

#### 4.1.4 ARRANQUE ESTRELLA DELTA.

Para el arranque estrella delta se probaron las protecciones: térmica (49), sobrecorriente instantánea (50) sobrecorriente temporizada (51).

##### 4.1.4.1 ABB

###### 4.1.4.1.1 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de sobrecorriente temporizada, se procedió con la misma configuración mostrada en el punto 4.1.1.1.2 y se obtuvo lo siguiente:

**Figura 109.** Configuración.

**Tabla 30.** Eventos de prueba para protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Parámetro de motor $i_{star}$ a 1	0
	Switch del motor a cerrado	5
	Parámetro de motor $i_{star}$ a 0	10
Parámetro de cambio	Parámetro de motor $mdmlp$ a 6 [pu]	30

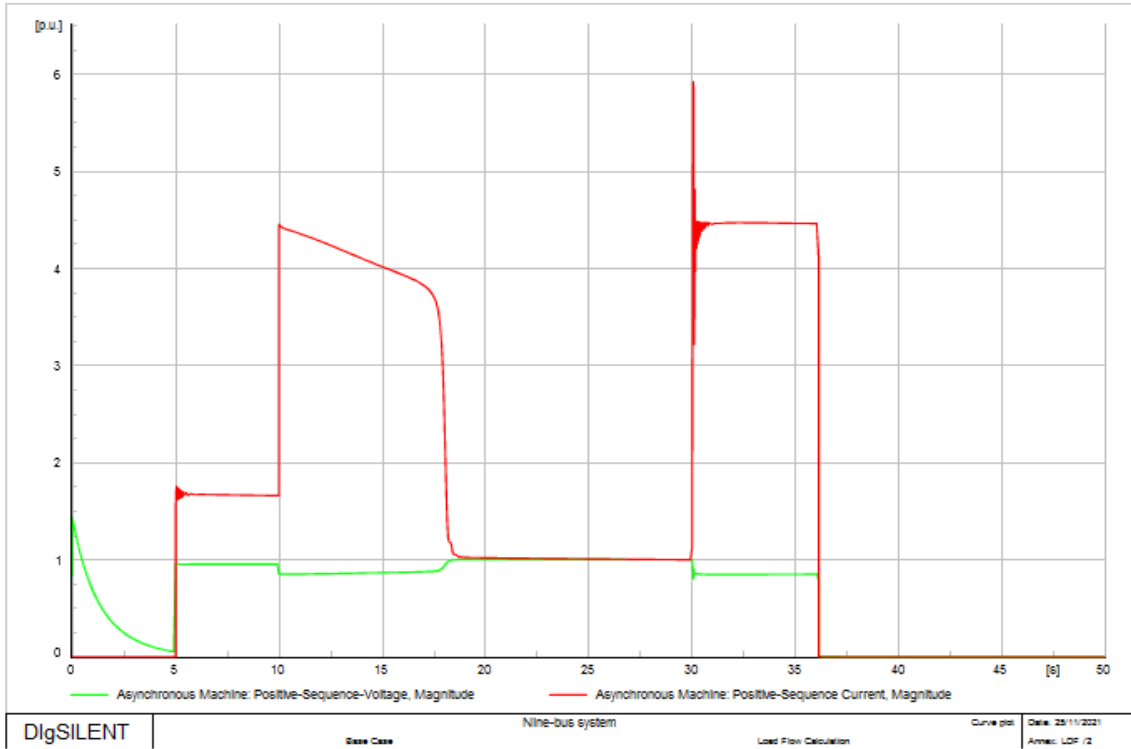


Figura 110. Voltaje y corriente en pu del motor.

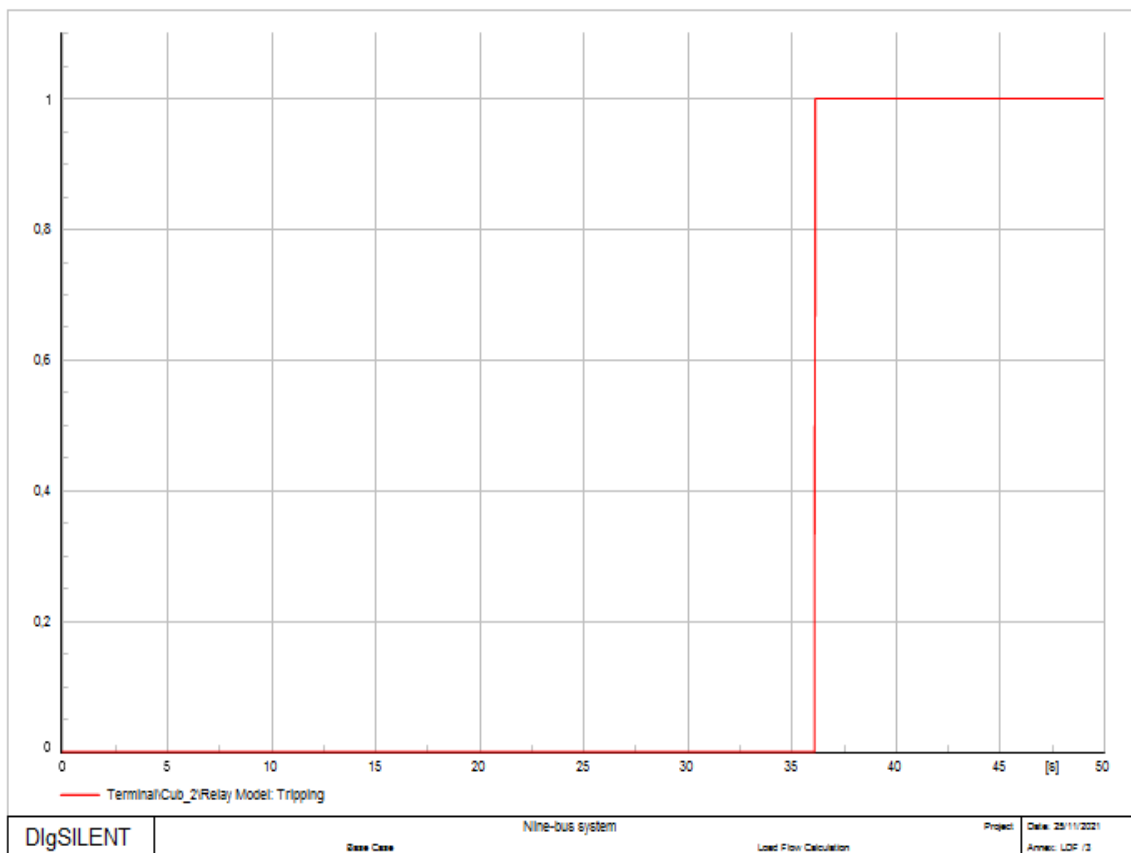


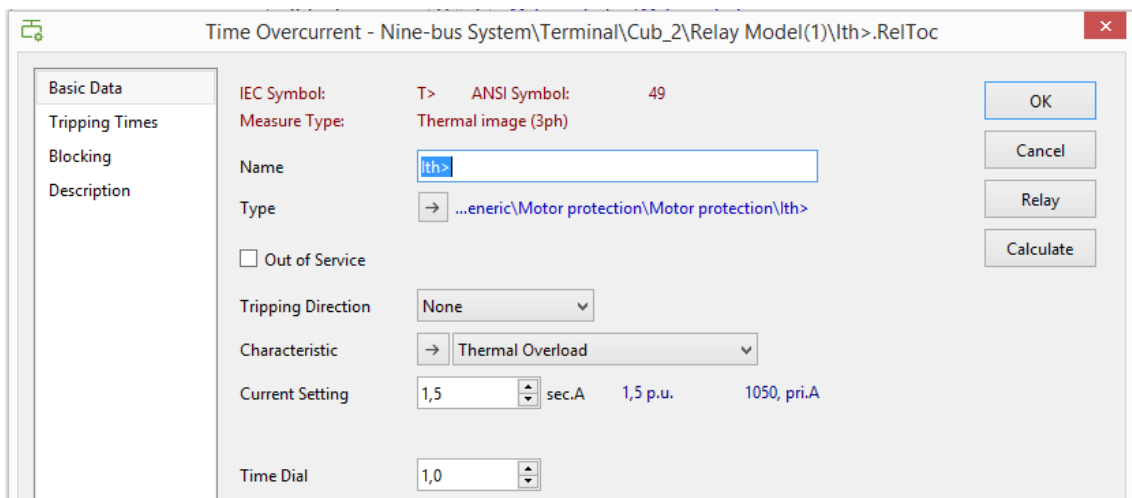
Figura 111. Disparo del relé.

Las Figuras 110 y 111 muestran los resultados de la prueba aplicada a la protección 51, obteniendo una correcta parametrización ya que se obtuvo un arranque exitoso y una actuación adecuada del relé cuando ocurre la perturbación.

#### 4.1.4.2 GENÉRICO

##### 4.1.4.2.1 Prueba de la protección térmica (49)

La parametrización de esta protección se configuró según lo expuesto en el punto 4.1.1.2.1, teniendo en cuenta el cálculo del dial obtenido directamente del software PowerFactory así como el tiempo de arranque y los valores de la corriente del motor en el arranque.



**Figura 112.** Configuración.

**Tabla 31.** Eventos par prueba de protección 49.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Parámetro de motor $i_{star}$ a 1	0
	Switch del motor a cerrado	5
	Parámetro de motor $i_{star}$ a 0	10
Parámetro de cambio	Parámetro de motor $mdmlp$ a 1,75 [pu]	30

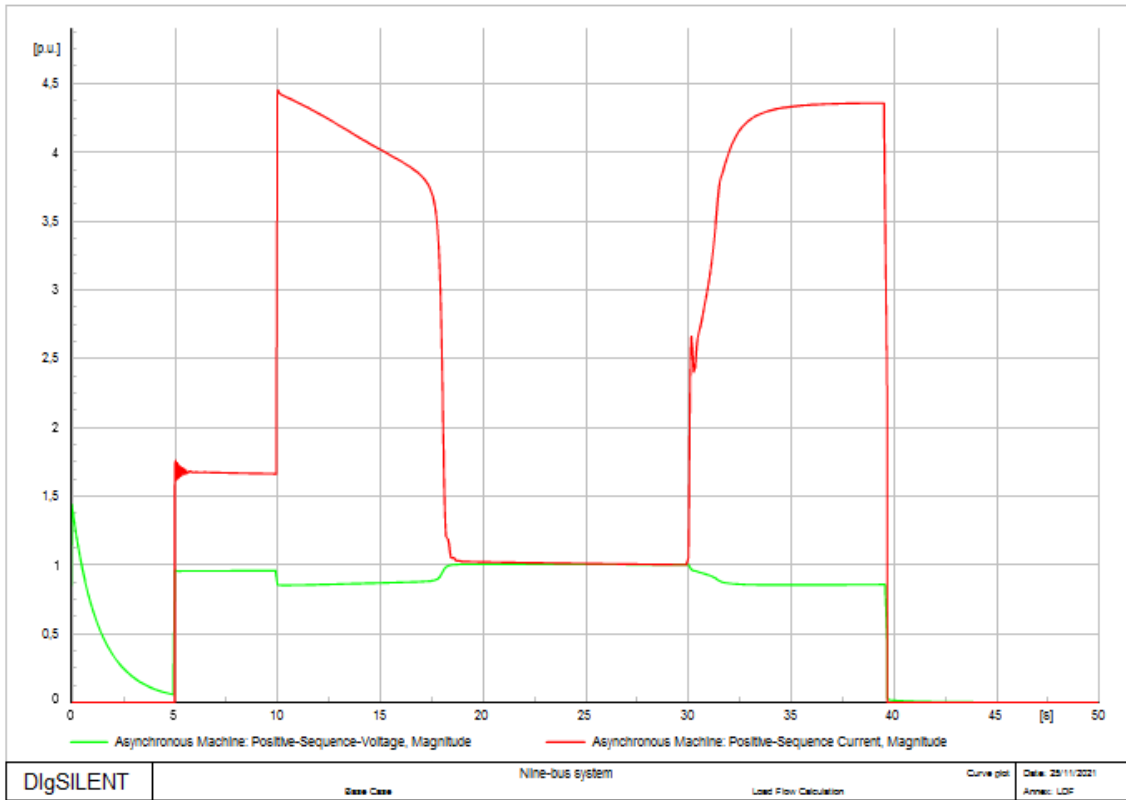


Figura 113. Voltaje y corriente en pu del motor.

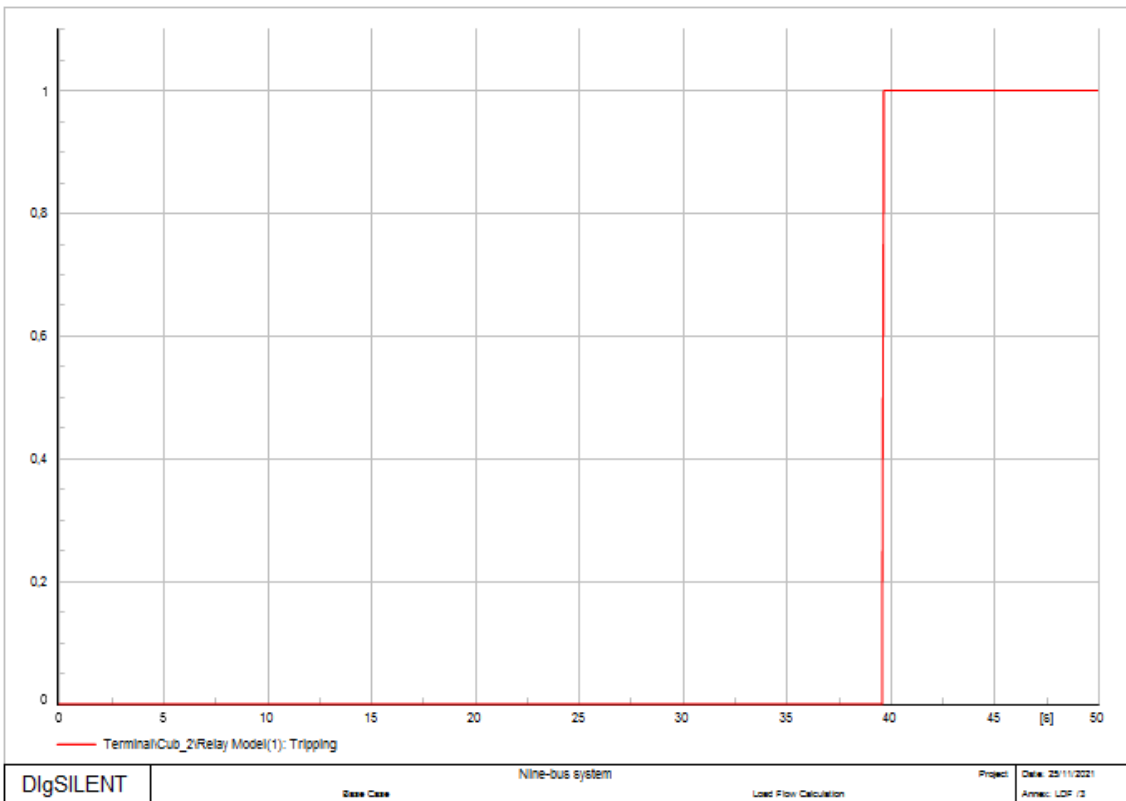
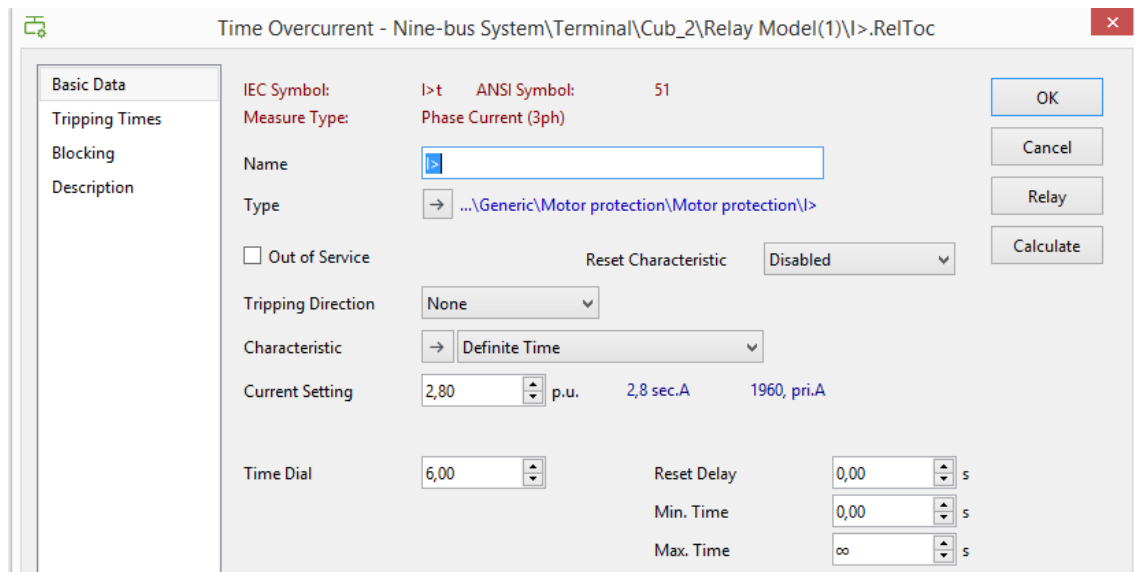


Figura 114. Disparo del relé.

Las Figuras 113 y 114 muestran el resultado de la prueba aplicada a la protección 49, obteniendo una respuesta satisfactoria, tanto en el arranque del motor como en la operación de la protección al ocurrir la perturbación simulada.

#### 4.1.4.2.2 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de la protección 51 se configuró con los parámetros según lo indicado en el punto 3.2 y se obtuvo lo siguiente.



**Figura 115.** Configuración.

**Tabla 32.** Eventos para prueba de protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Parámetro de motor $i_{star}$ a 1	0
	Switch del motor a cerrado	5
	Parámetro de motor $i_{star}$ a 0	10
Parámetro de cambio	Parámetro de motor $mdmlp$ a 6 [pu]	30

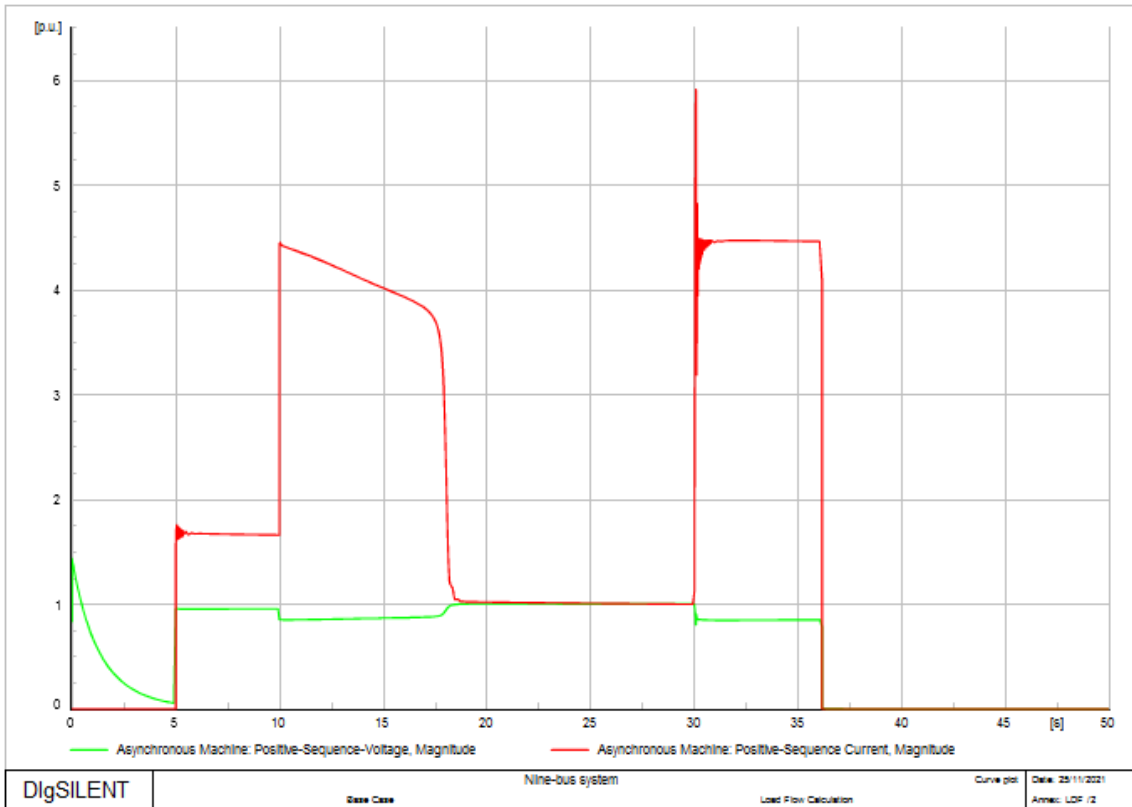


Figura 116. Voltaje y corriente en pu del motor.

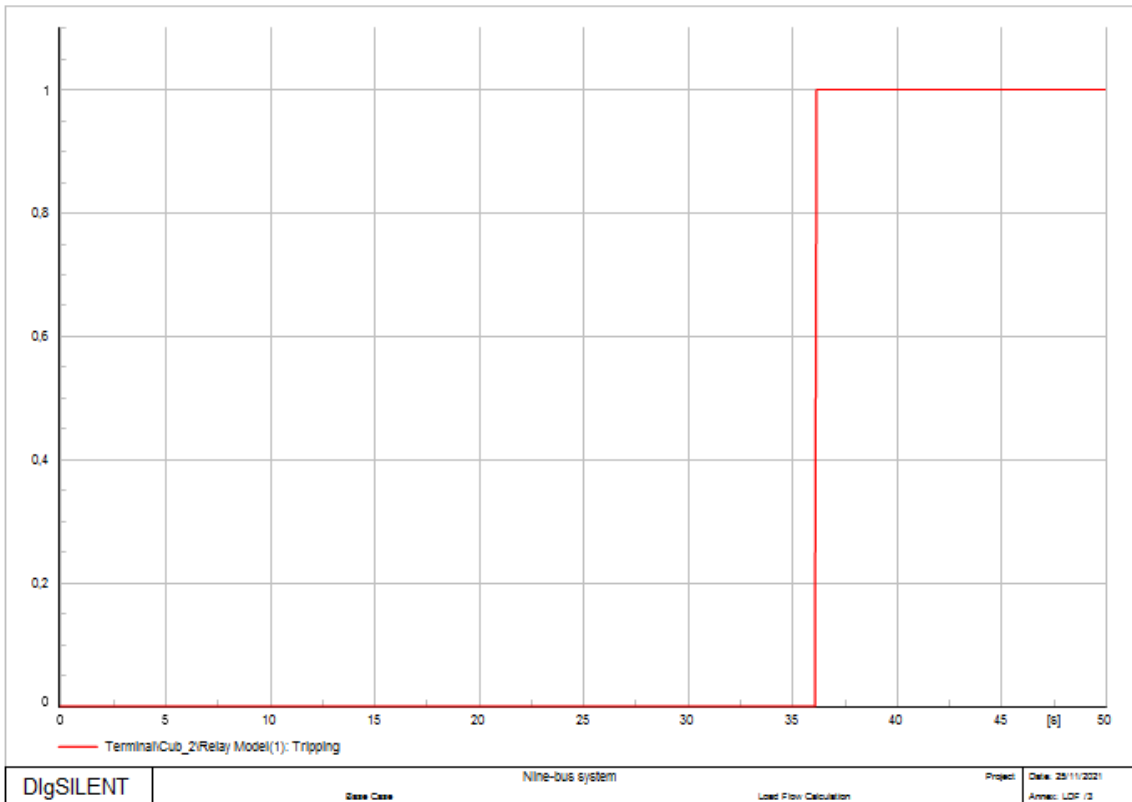
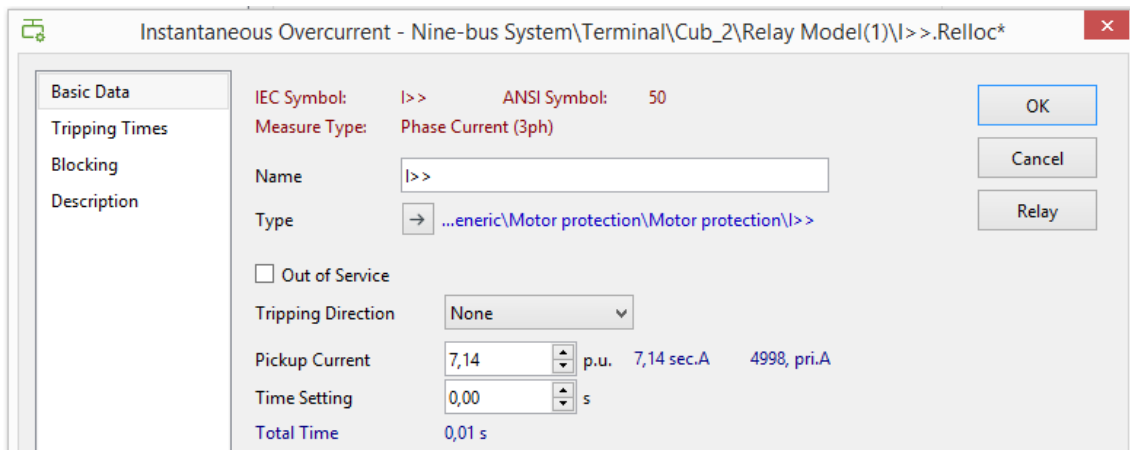


Figura 117. Disparo del relé.

Las Figuras 116 y 117 muestran el resultado exitoso de la prueba a la protección 51, donde se puede observar un exitoso arranque del motor y una operación correcta de la protección al momento de ocurrir la perturbación.

#### 4.1.4.2.3 Prueba de protección de sobrecorriente instantánea (50)

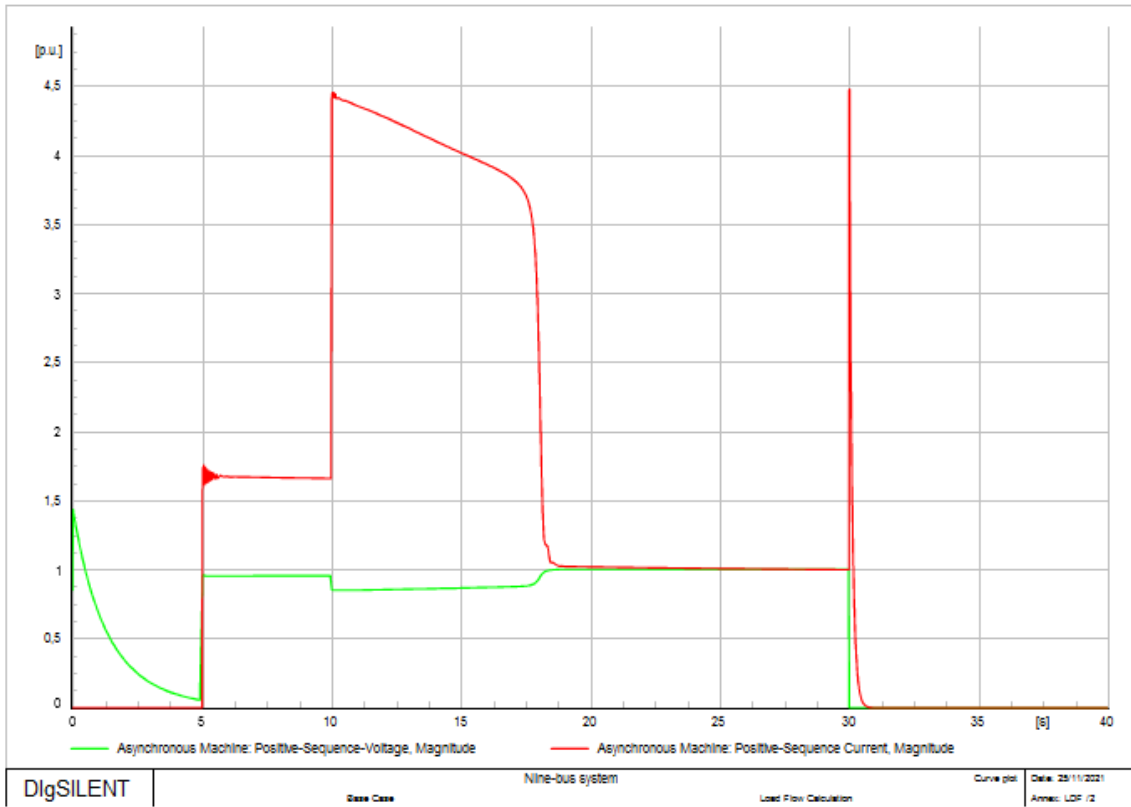
Para la prueba de la protección 50 se parametrizó la protección con los valores sugeridos en el punto 3.2 obteniendo la siguiente configuración.



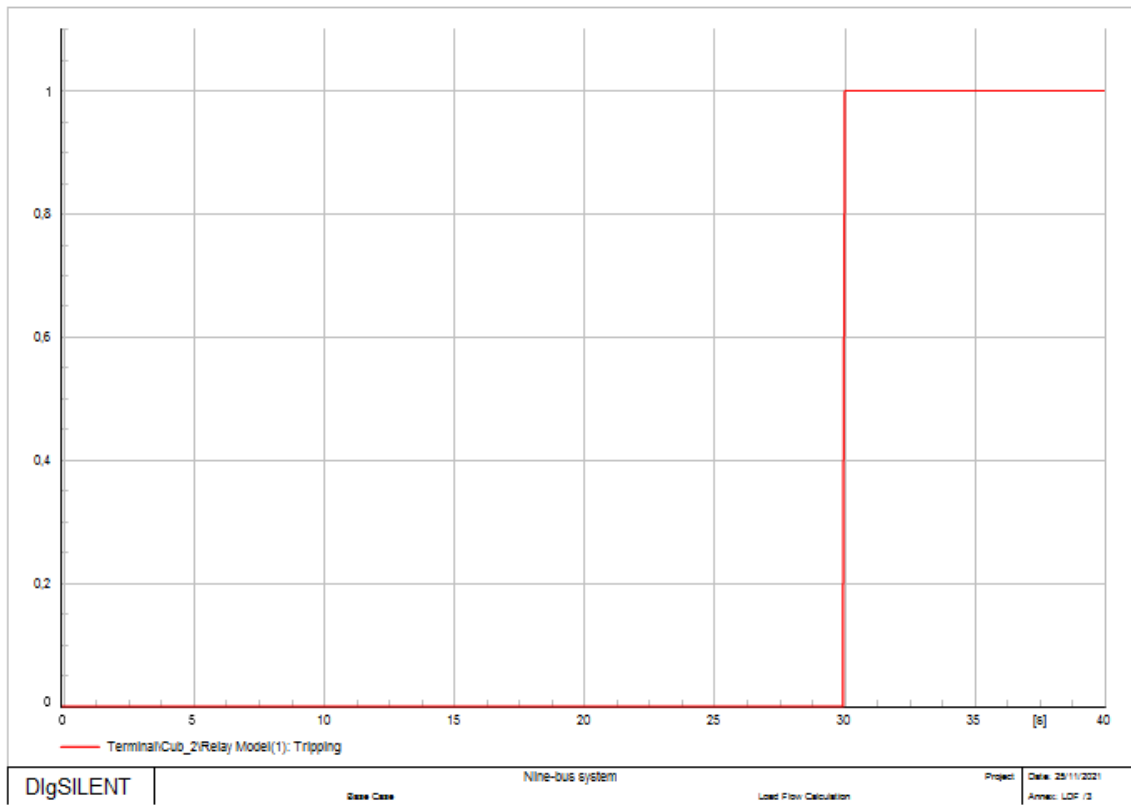
**Figura 118.** Configuración.

**Tabla 33.** Eventos para prueba de protección 50.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Parámetro de motor $i_{star}$ a 1	0
	Switch del motor a cerrado	5
	Parámetro de motor $i_{star}$ a 0	10
Parámetro de cambio	Cortocircuito en la barra del motor.	30



**Figura 119.** Voltaje y corriente en pu del motor.



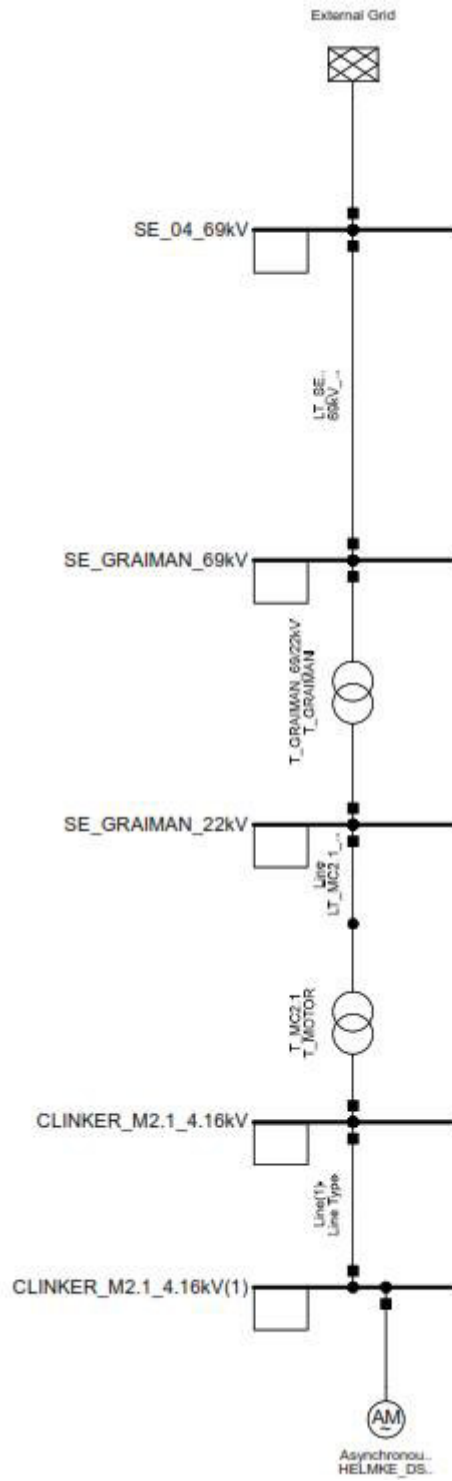
**Figura 120.** Disparo del relé.



Las Figuras 119 y 120 muestran los resultados obtenidos al realizar la prueba de la protección 50, obteniendo un arranque exitoso y una operación instantánea de la protección al simular el cortocircuito.

## **4.2 SISTEMA INDUSTRIAL**

Para este caso de estudio, se implementó un sistema de distribución industrial real en el cual se aplicó tanto la herramienta computacional como las pruebas de desempeño a los relés.



**Figura 121.** Sistema de distribución para pruebas.

**Tabla 34.** Datos técnicos del motor sistema industrial.

Datos técnicos del motor	
Tc	128/1 [A]
Tp	4160/110 [V]
VN	4,16[kV]
P	0,92[MW]
fp	0,843
f	60 [Hz]
lrb	4,8 [pu]
Stall time hot	10 [s]

Las pruebas al relé se realizaron considerando solamente el arranque directo.

#### 4.2.1 ARRANQUE DIRECTO.

##### 4.2.1.1 ABB

La parametrización de las protecciones para el motor obtenida de la herramienta computacional es:

**PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIONES PARA MOTORES**

MARCA:

TIPO DE ARRANQUE:

TIEMPO DE ARRANQUE:  s

CORRIENTE NOMINAL:  A.Prim

FRECUENCIA:  Hz

VOLTAJE:  V.Prim

CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO:  A.Prim

RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN

	PRIMARIO	SECUNDARIO
TC	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="5"/> A
TP	<input type="text" value="4160"/>	<input type="text" value="120"/> V
TIEMPO DE PARADA SEGURO EN CALIENTE	<input type="text" value="10"/> s	

SELECCIÓN DE PROTECCIONES

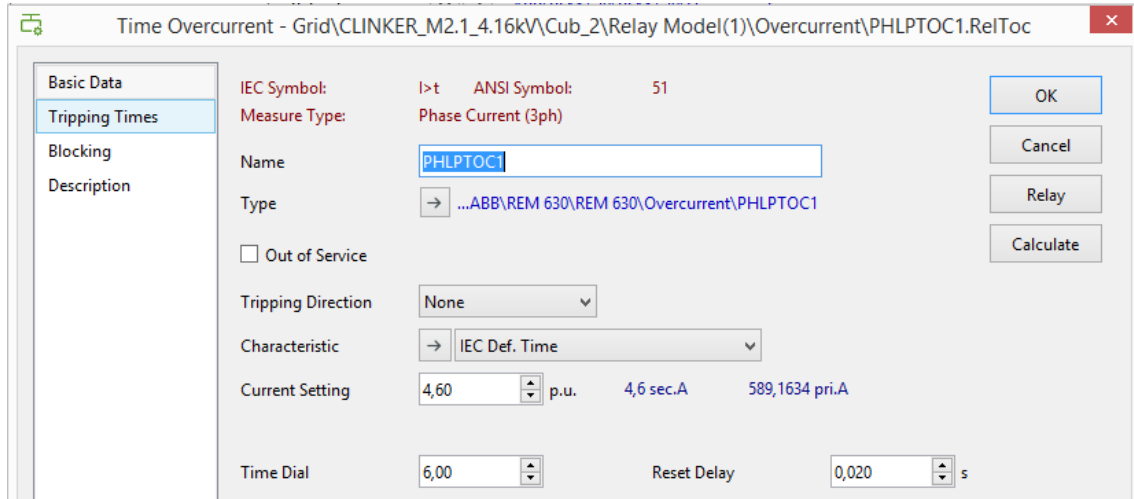
- 14
- 27 STAR VALUE: 0.75 pu; OPERATING CURVE TIME: IEC-Def time; OPERATE DELAY TIME: 6 s
- 46 START VALUE: 0.16 pu; TIME MULTIPLIER: 1; OPERATING CURVE TYPE: IEC-Def time; OPERATE DELAY TIME: 0.04 s
- 49
- 50
- 50G
- 50N
- 51 (PHLPTOC) START VALUE: 5.52 pu; TIME MULTIPLIER: 1; OPERATING CURVE TYPE: IEC Def time; OPERATE DELAY TIME: 6 s
- 51N START VALUE: 0.0039038 pu; TIME MULTIPLIER: 1; OPERATING CURVE TYPE: ANSI Def time; OPERATE DELAY TIME: 0.1 s
- 66
- 81
- 87
- RTD

**Figura 122.** Parametrización de la protección.

##### 4.2.1.1.1 Prueba de protección sobrecorriente temporizada (51)

Para la prueba de protección de sobrecorriente temporizada, al no tener un parámetro dentro del software PowerFactory para poder simular un evento de rotor bloqueado, se procedió a realizar un cambio en la carga mecánica del motor para poder aumentar la corriente del motor y probar esta protección, se seleccionó el tipo de curva, la corriente de

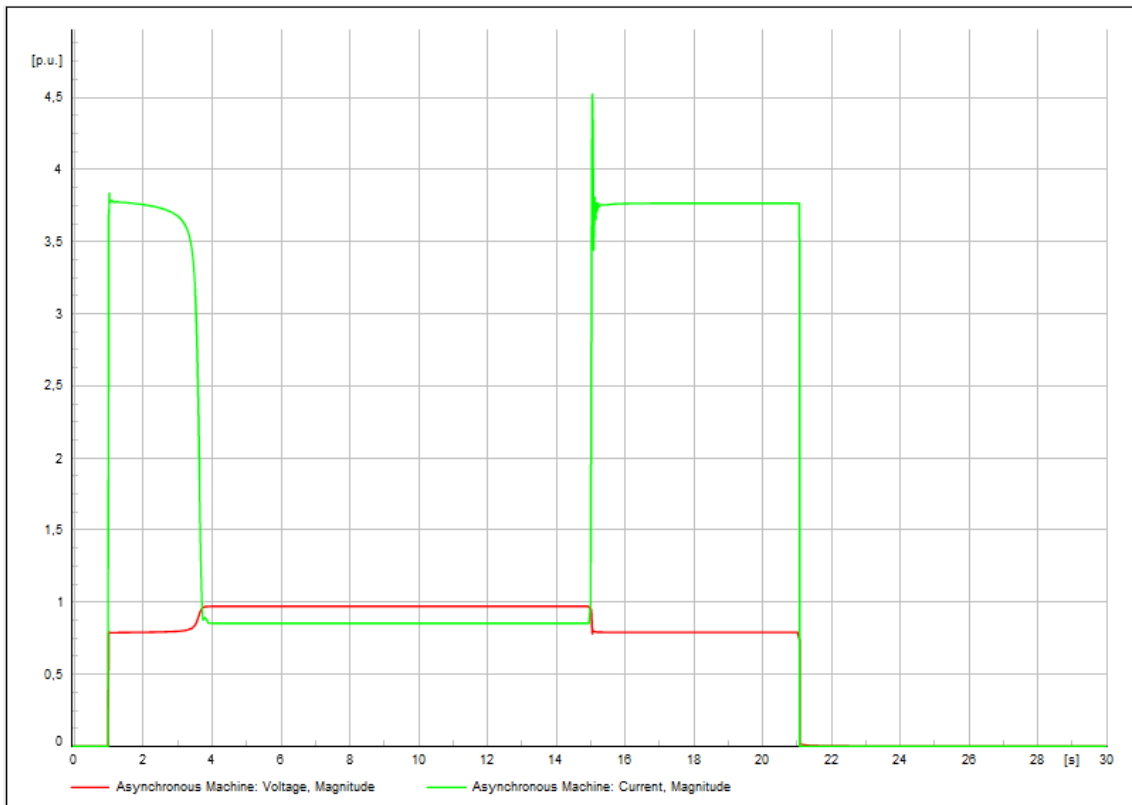
pick up que se modificó lo indicado por software a la corriente de rotor bloqueado por ser la máxima corriente obtenida al cambiar este parámetro y el tiempo de arranque del motor.



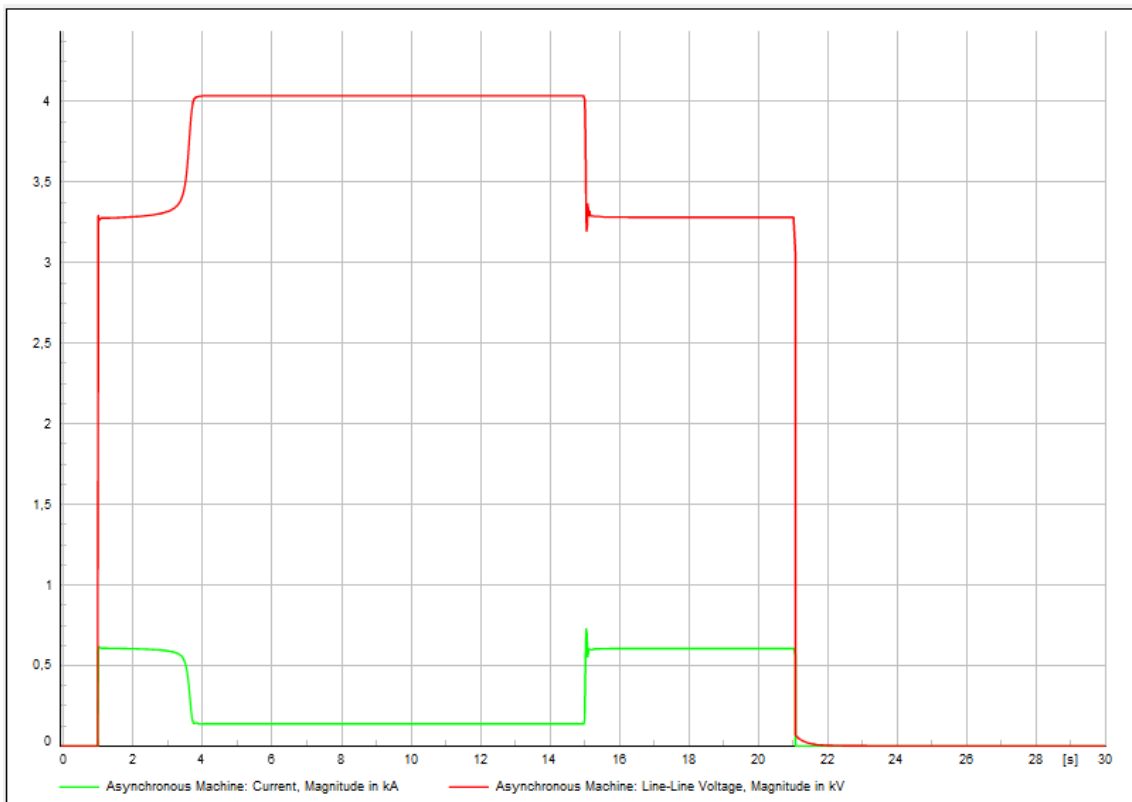
**Figura 123.** Configuración.

**Tabla 35.** Eventos para prueba de protección 51.

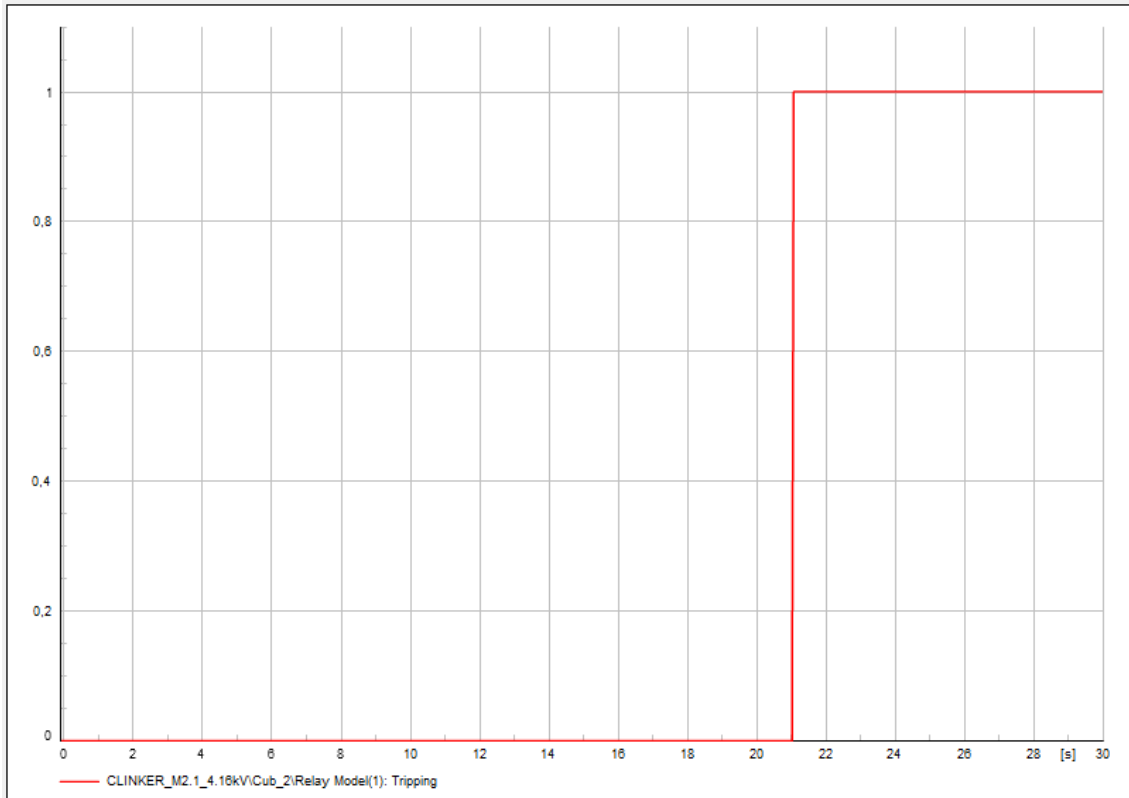
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	15



**Figura 124.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 125.** Voltaje y corriente del motor.

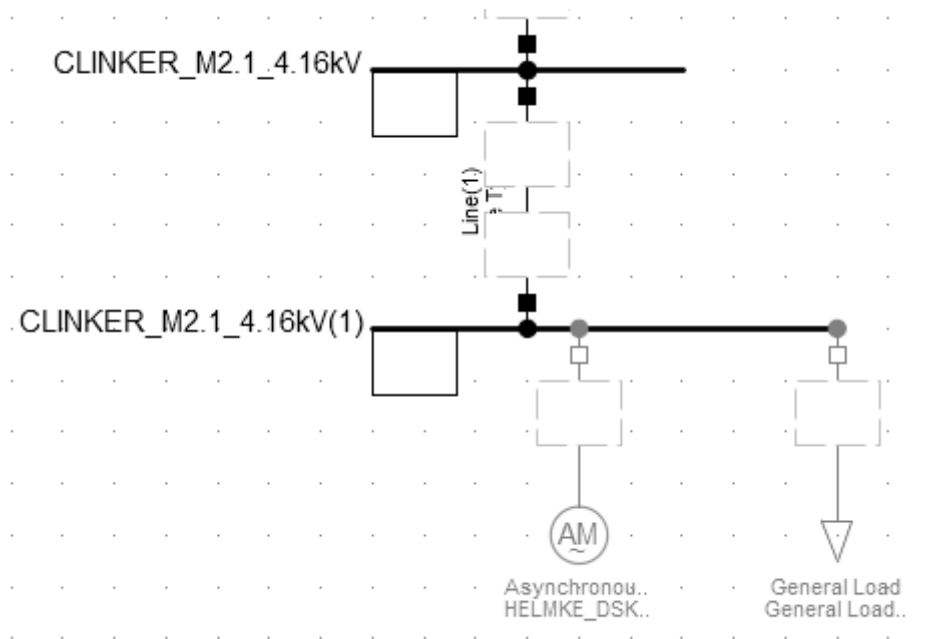


**Figura 126.** Disparo del relé.

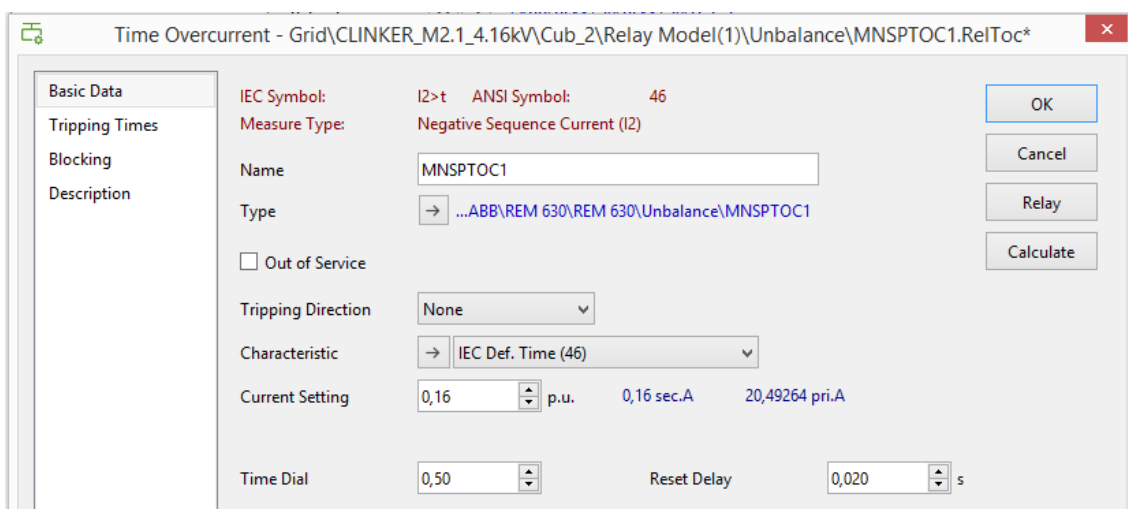
Las Figuras 124-126 muestran la correcta parametrización y operación de la protección, el motor tiene un arranque exitoso sin actuación de la protección a pesar de la corriente elevada en el arranque, posteriormente cuando ocurre la perturbación simulada para el aumento de corriente, la protección opera.

#### 4.2.1.1.2 Prueba de protección contra desbalance de corriente (46)

Para realizar la prueba de esta función de protección, se realizaron cambios en el diagrama para poder simular un evento que genere un desbalance de corriente, por lo que se procedió a conectar una carga monofásica en paralelo con el motor produciendo un desbalance de corriente en la línea que alimenta el motor. Se procedió con la configuración de la protección según la parametrización obtenida en la herramienta, tipo de curva, corriente de pick up y tiempo de actuación.



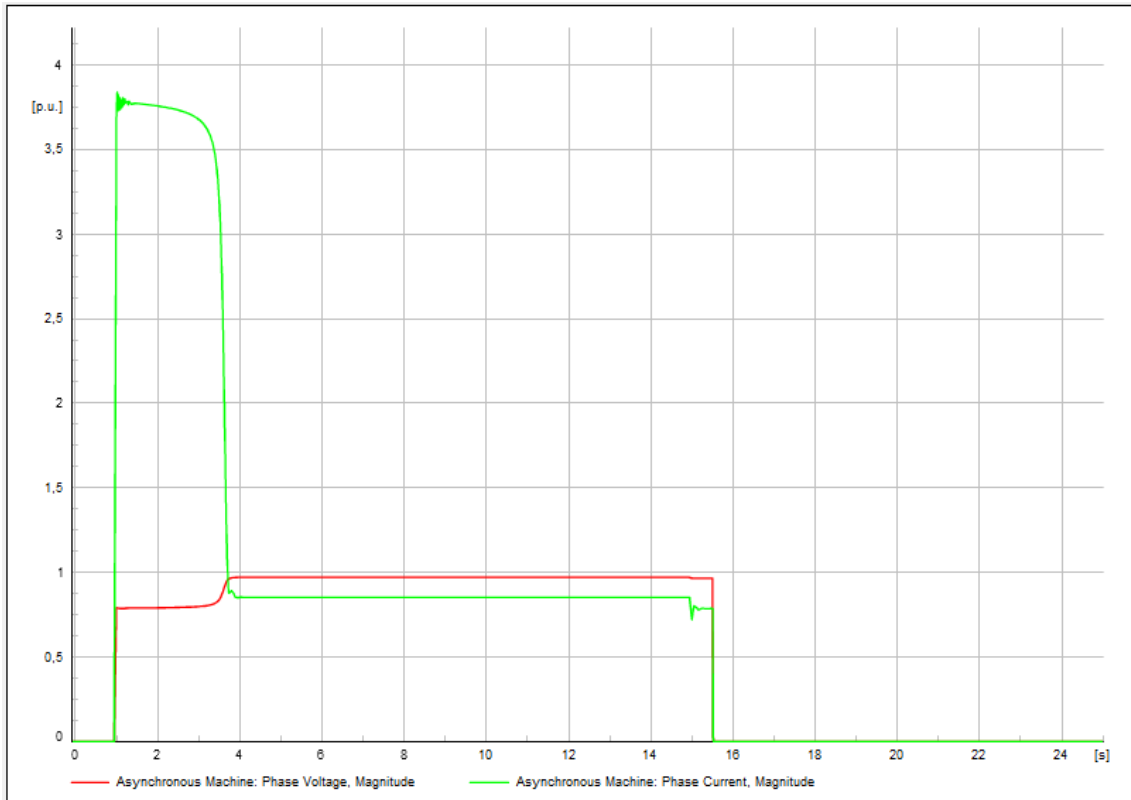
**Figura 127.** Unifilar modificado.



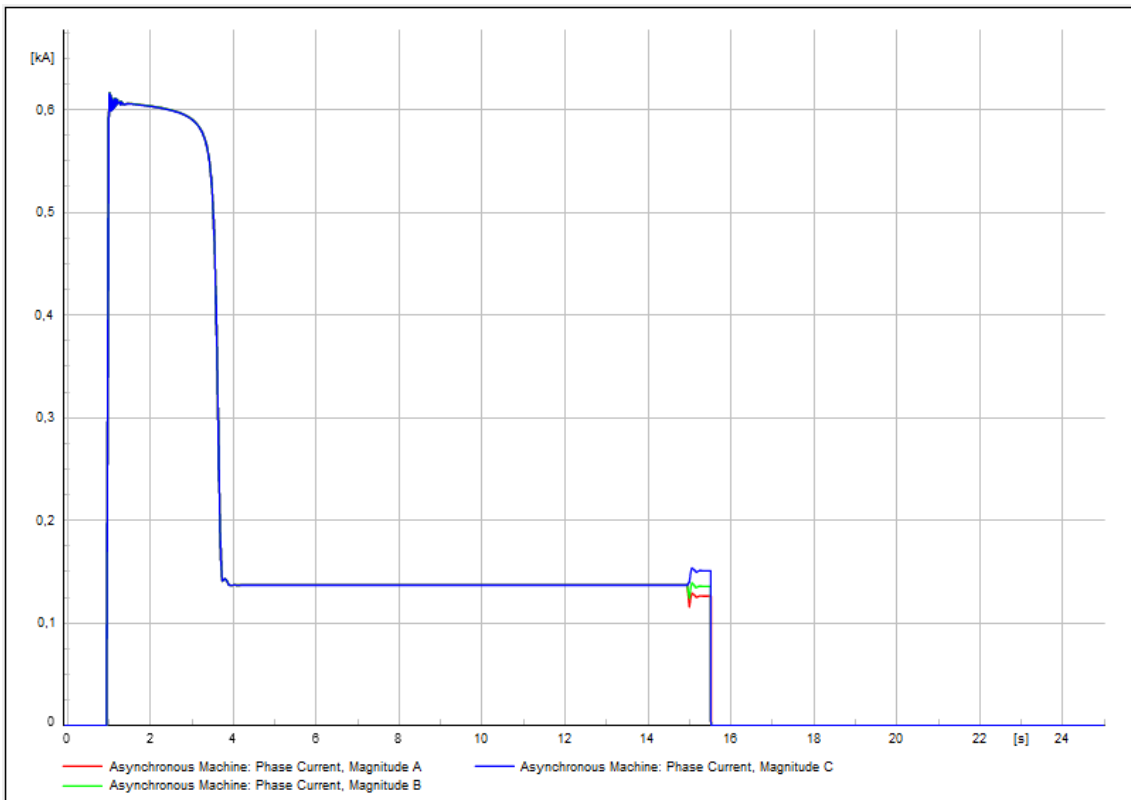
**Figura 128.** Configuración.

**Tabla 36.** Eventos para prueba de protección 46.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado	15

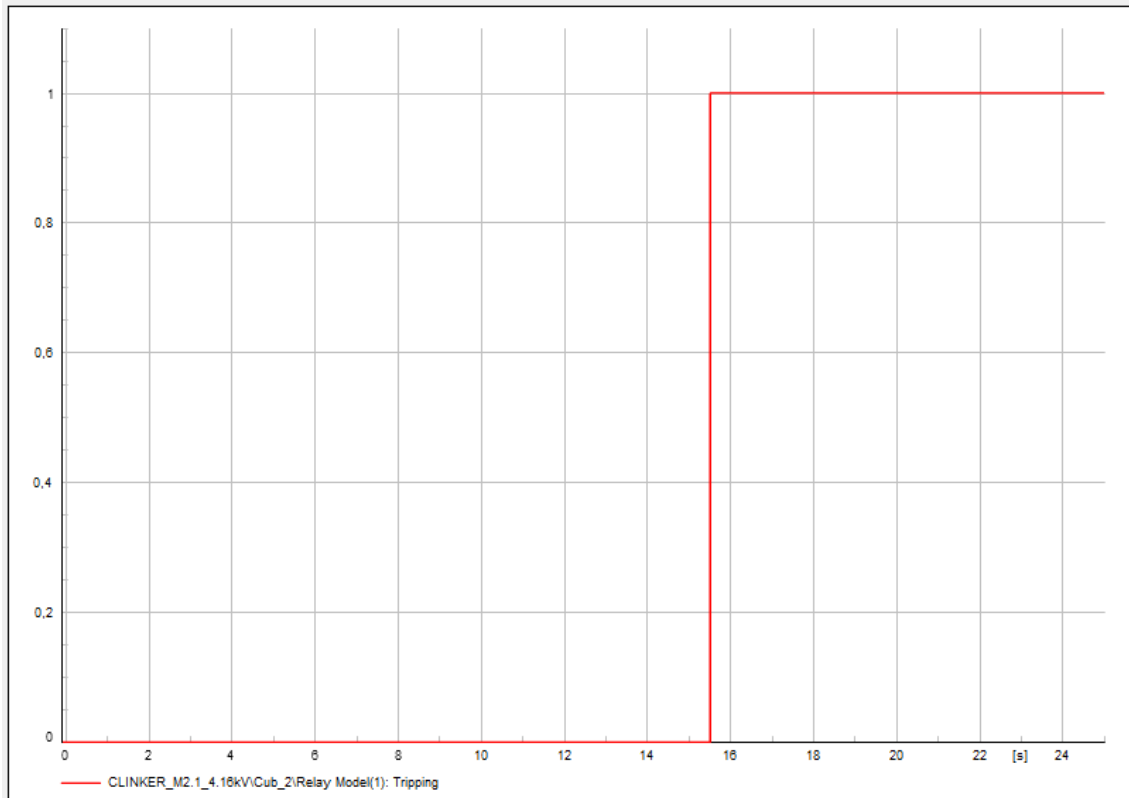


**Figura 129.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 130.** Corrientes de fase del motor.



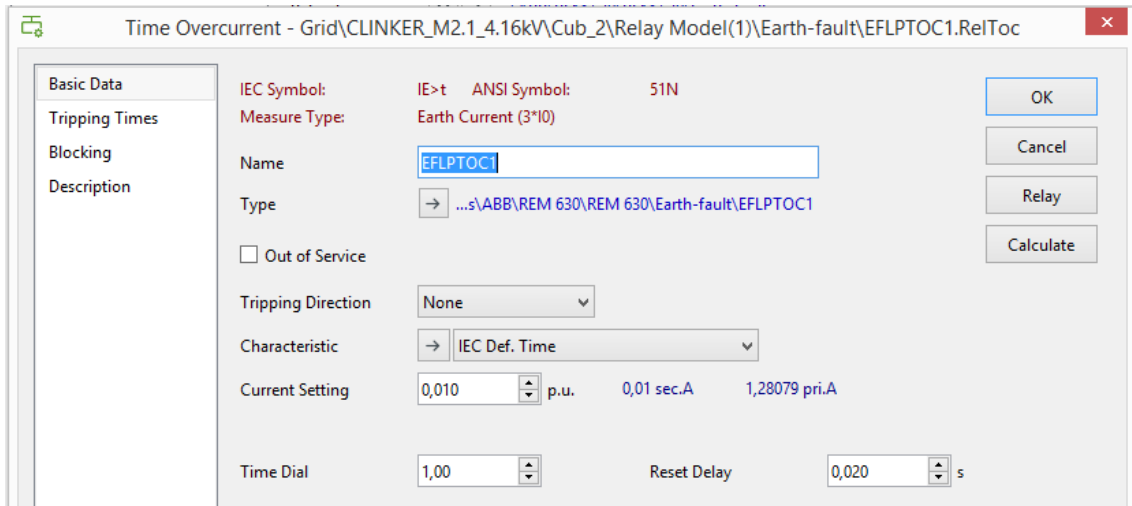


**Figura 131.** Disparo del relé.

Las Figuras 129-131 evidencian la correcta actuación de la protección al momento de sentir un desbalance de corriente producido por la conexión de la carga monofásica en la fase A de la línea que alimenta el motor.

#### 4.2.1.1.3 Prueba de protección contra fallas a tierra temporizada (51N)

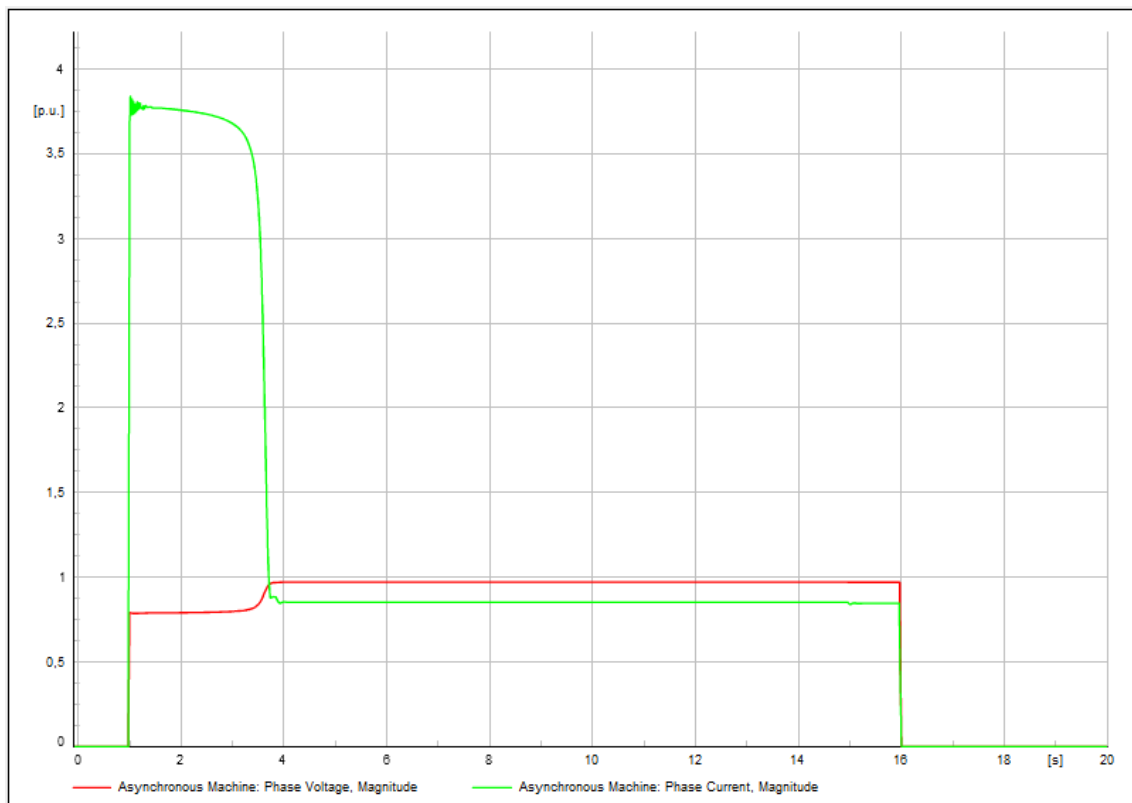
Para realizar la prueba de protección contra fallas a tierra temporizada, se utilizó el mismo procedimiento y eventos que se utilizaron en las pruebas de la protección 46 ya que por el desbalance se genera corriente de secuencia cero, la cual es el parámetro con el cual trabaja esta protección. Para las pruebas de esta protección se parametrizó las funciones con los valores obtenidos de la herramienta, el tipo de curva corriente de pick up y tiempo de actuación.



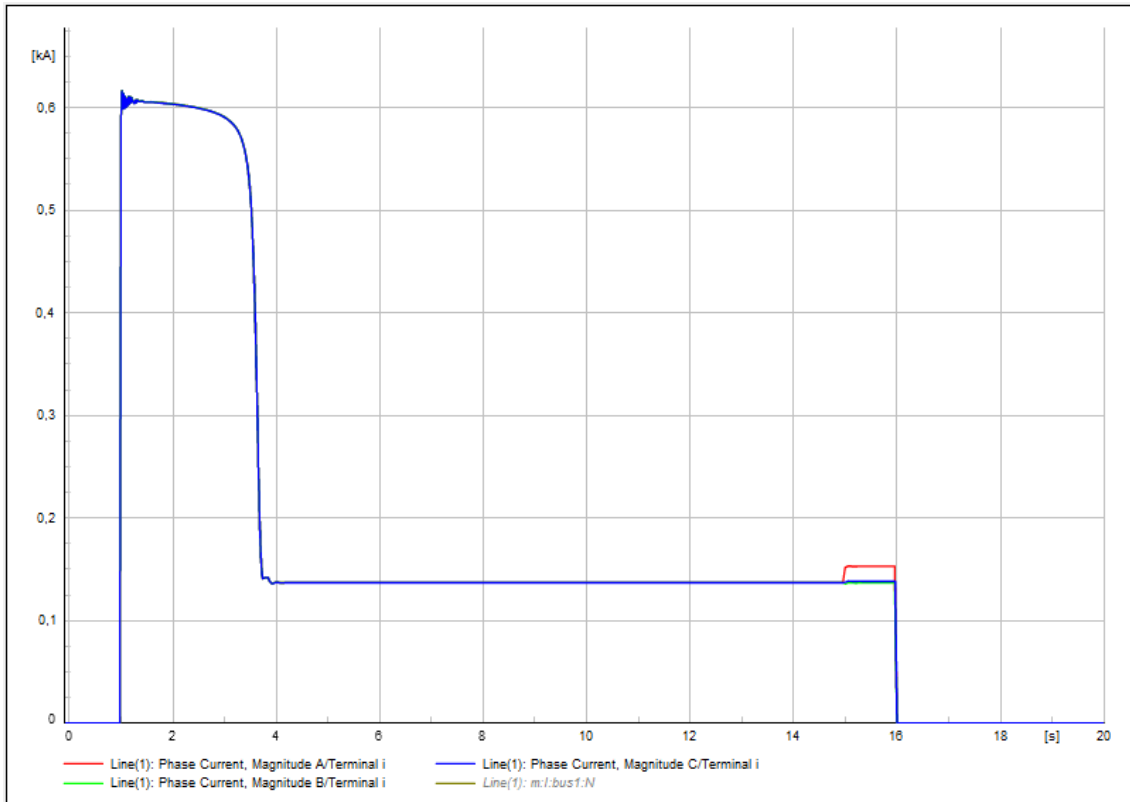
**Figura 132.** Configuración.

**Tabla 37.** Eventos para prueba de la protección 51N.

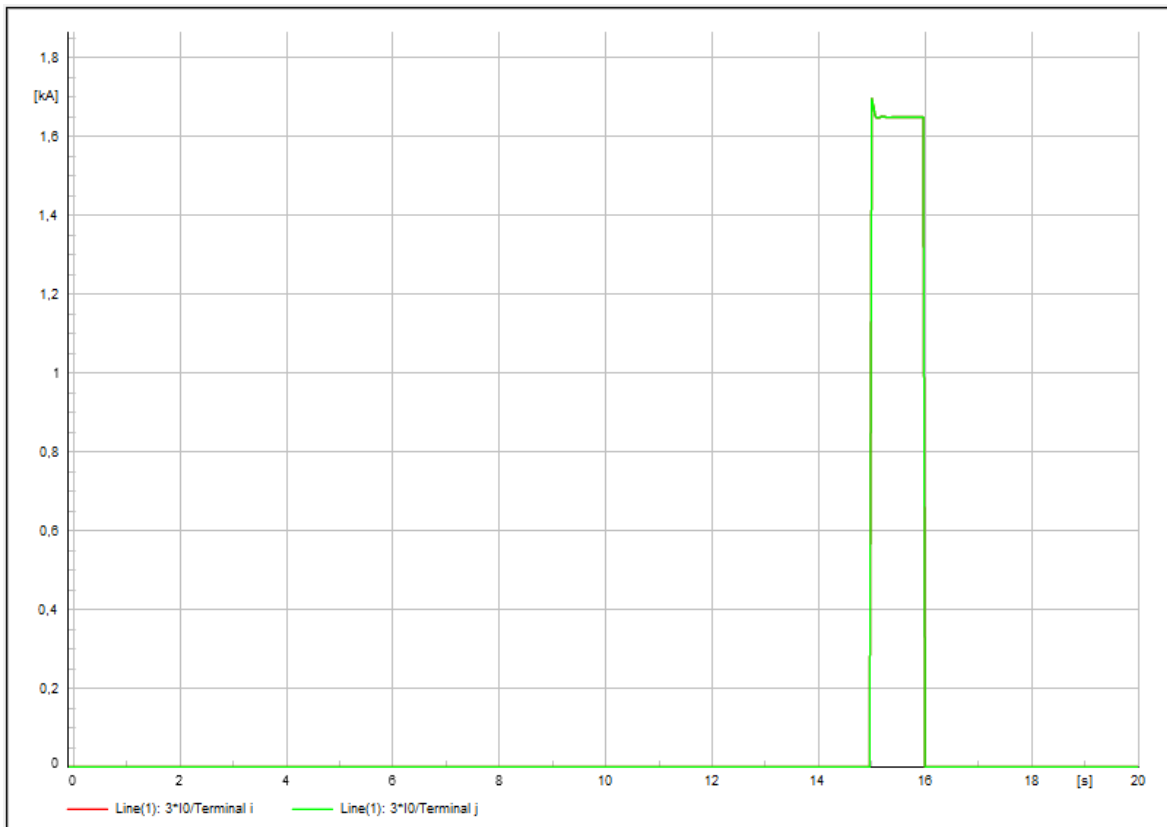
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado	15



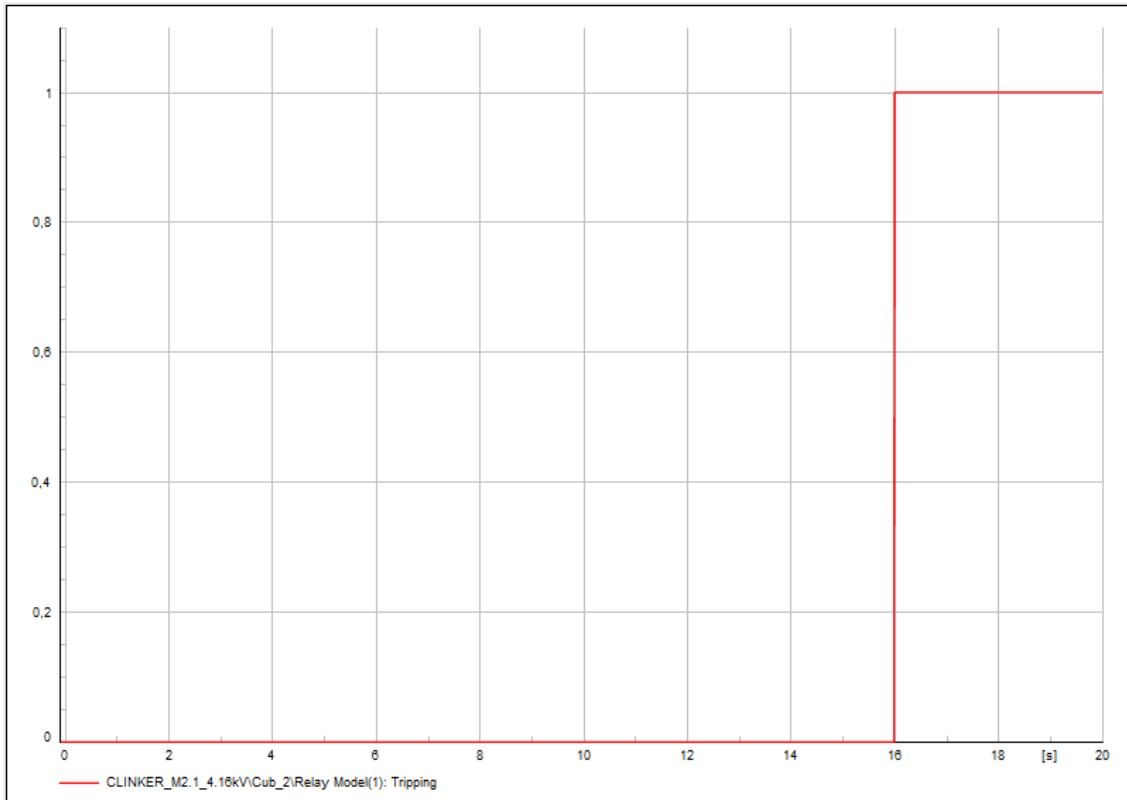
**Figura 133.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 134.** Corrientes de fase de la línea al motor.



**Figura 135.** Corriente 3xI0 de la línea al motor.



**Figura 136.** Disparo del relé.

Las Figuras 133-136 muestran los resultados de la operación correcta de la protección que se probó, al conectar una carga monofásica en paralelo con el motor, las corrientes que circulan por la línea, ya no son simétrica y se genera corriente de secuencia cero que es percibida por la protección, lo que produce que actúe de forma instantánea.

#### 4.2.1.1.4 Prueba de Protección de Bajo Voltaje (27)

Para esta prueba de la protección de bajo voltaje, se procedió a configurar la parametrización que brinda la herramienta en el software de prueba. Se ingresó el tipo de curva, el parámetro de voltaje al 75% y la mitad del tiempo que dura el arranque del motor.

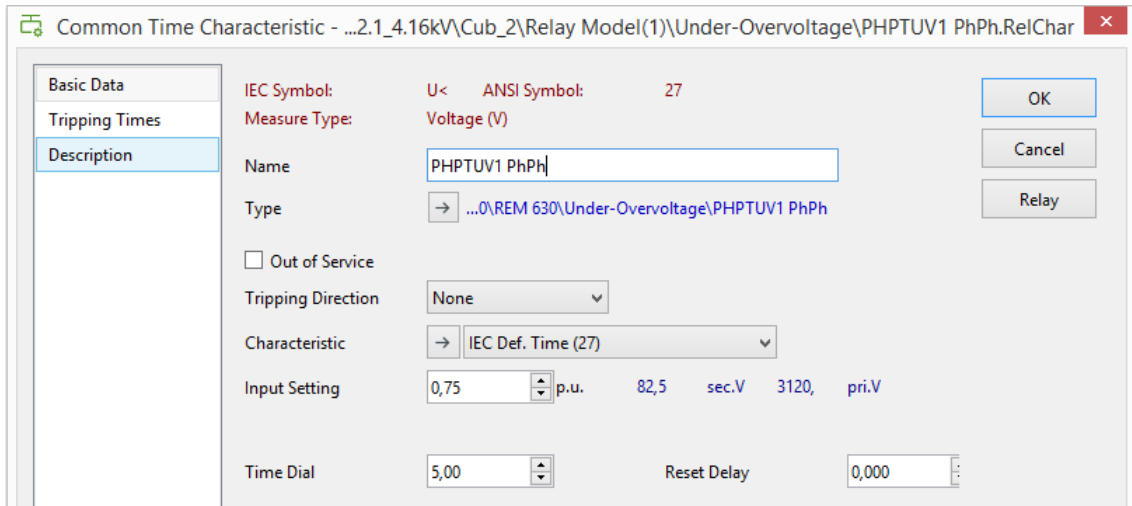


Figura 137. Configuración.

Tabla 38. Eventos para prueba de protección 27.

	Eventos	Tiempo [s]
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Posición del tap a -26	15

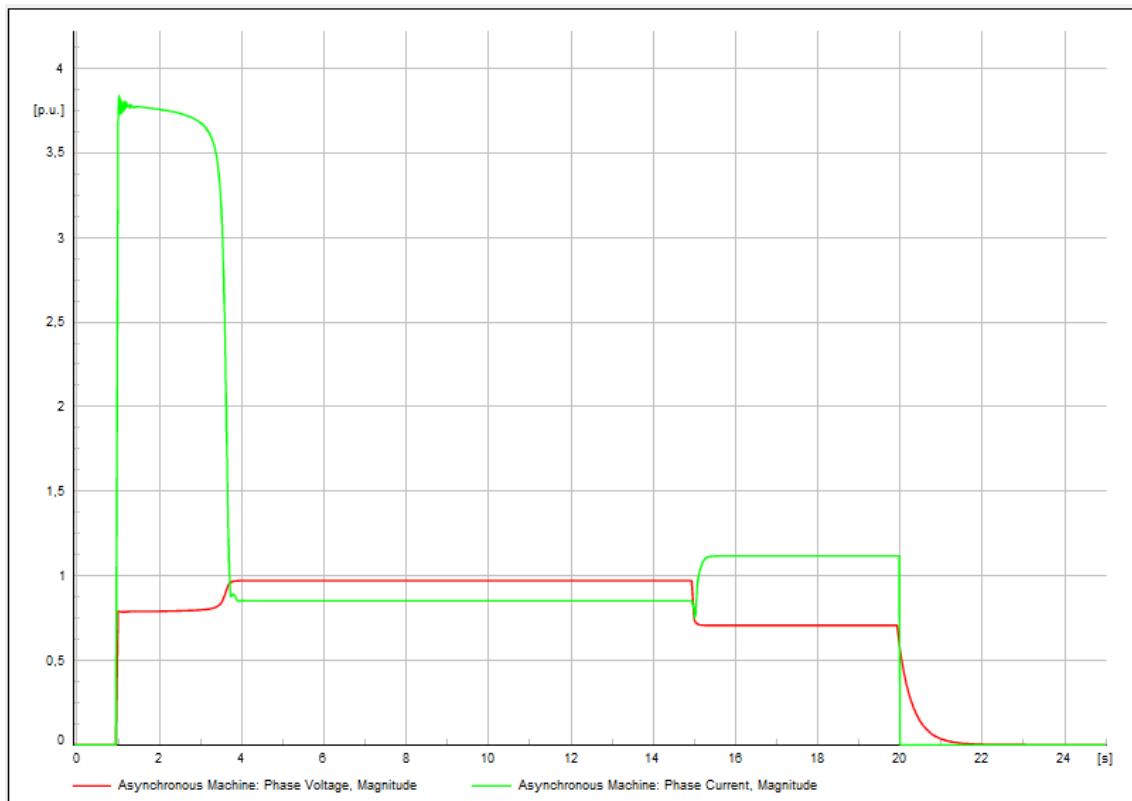
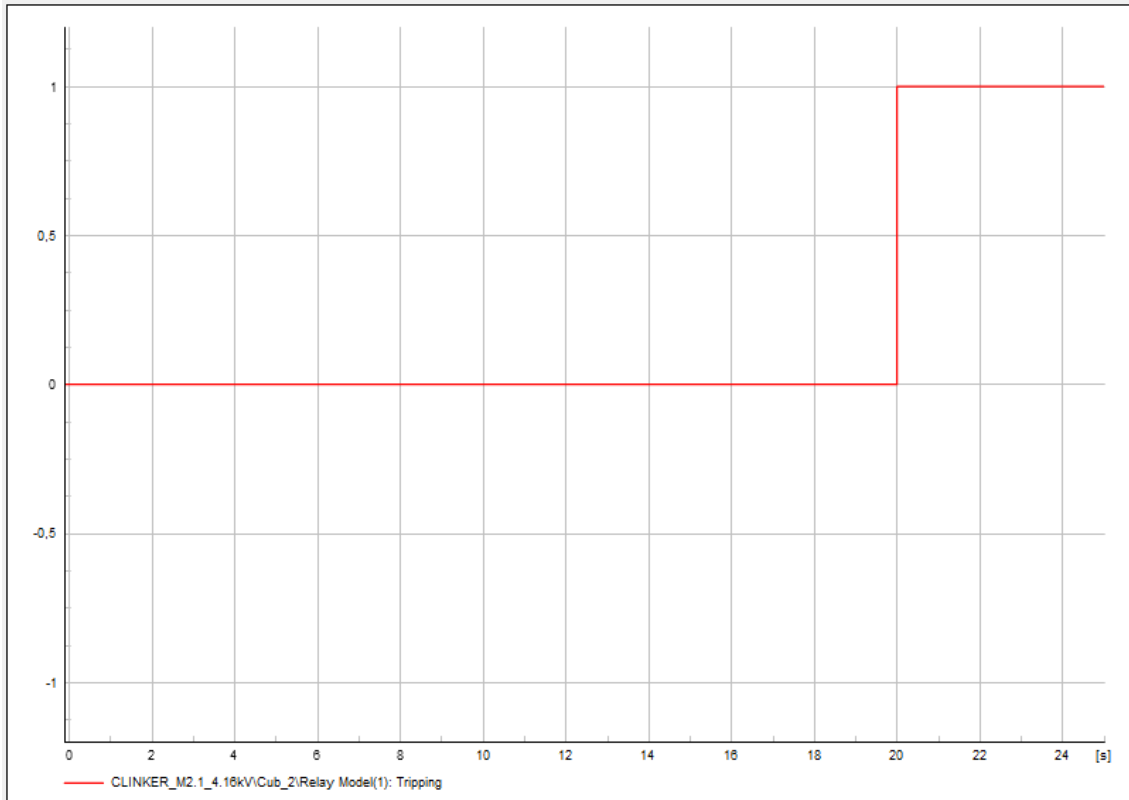


Figura 138. Voltaje y corriente en motor.



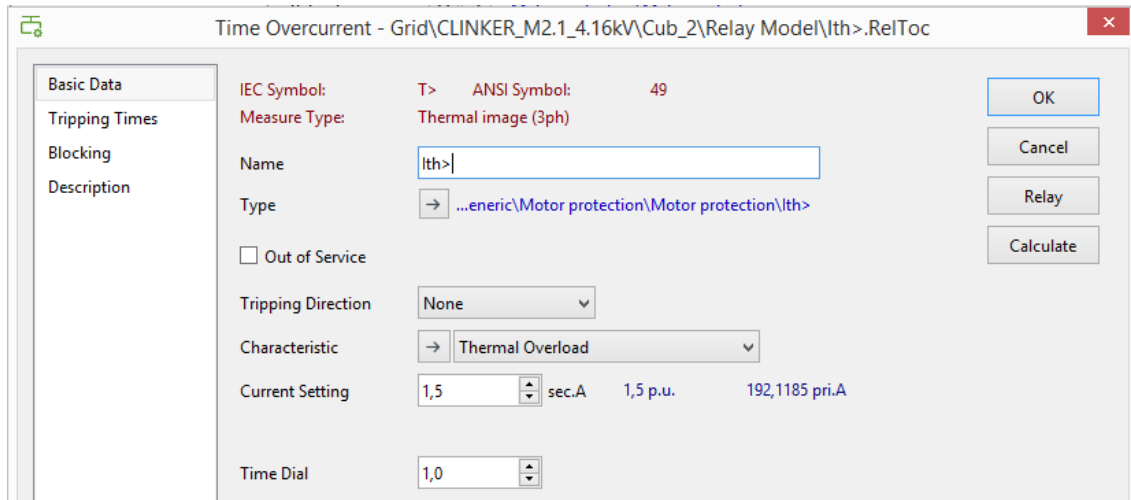
**Figura 139.** Disparo del relé.

Las Figuras 138 y 139 indican que los resultados obtenidos en la prueba de la protección 27 son correctos, ya que podemos ver un arranque exitoso del motor sin tener una actuación inesperada de la protección por este evento y una correcta operación de la protección cuando ocurre la perturbación de bajo voltaje.

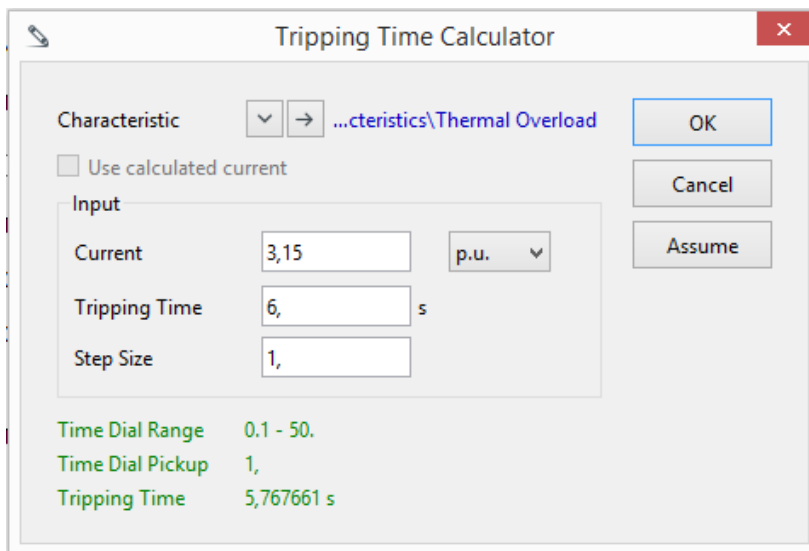
#### **4.2.1.2 GENÉRICO**

##### *4.2.1.2.1 Pruebas para la protección térmica (49)*

Para la prueba de la protección 49, se configuró con la parametrización según se indica en la sección 2.4.2.1.4 y con el valor de 115% de la corriente a plena carga [16]. Al configurar esta protección el valor mínimo de corriente es de 1.5 pu, por lo que se realizarán las pruebas con este valor, solo tiene una opción de curva y se configuró el time dial como se muestra en la figura 140.



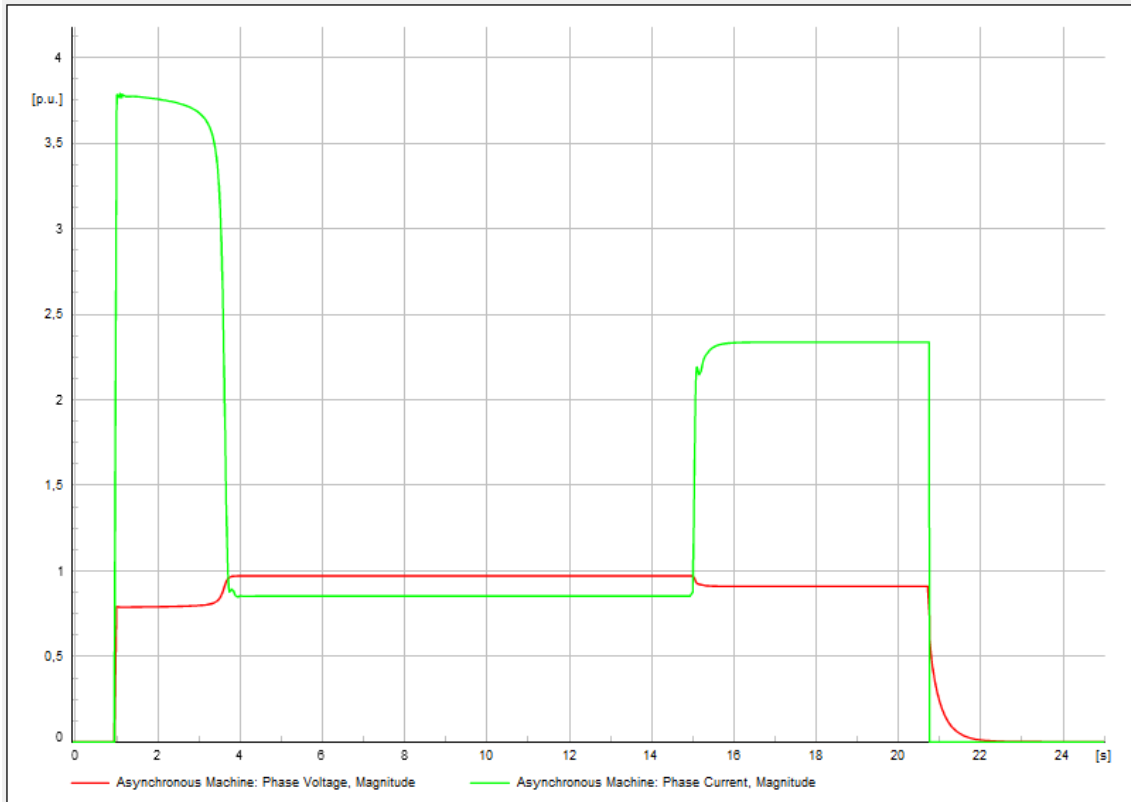
**Figura 140.** Configuración.



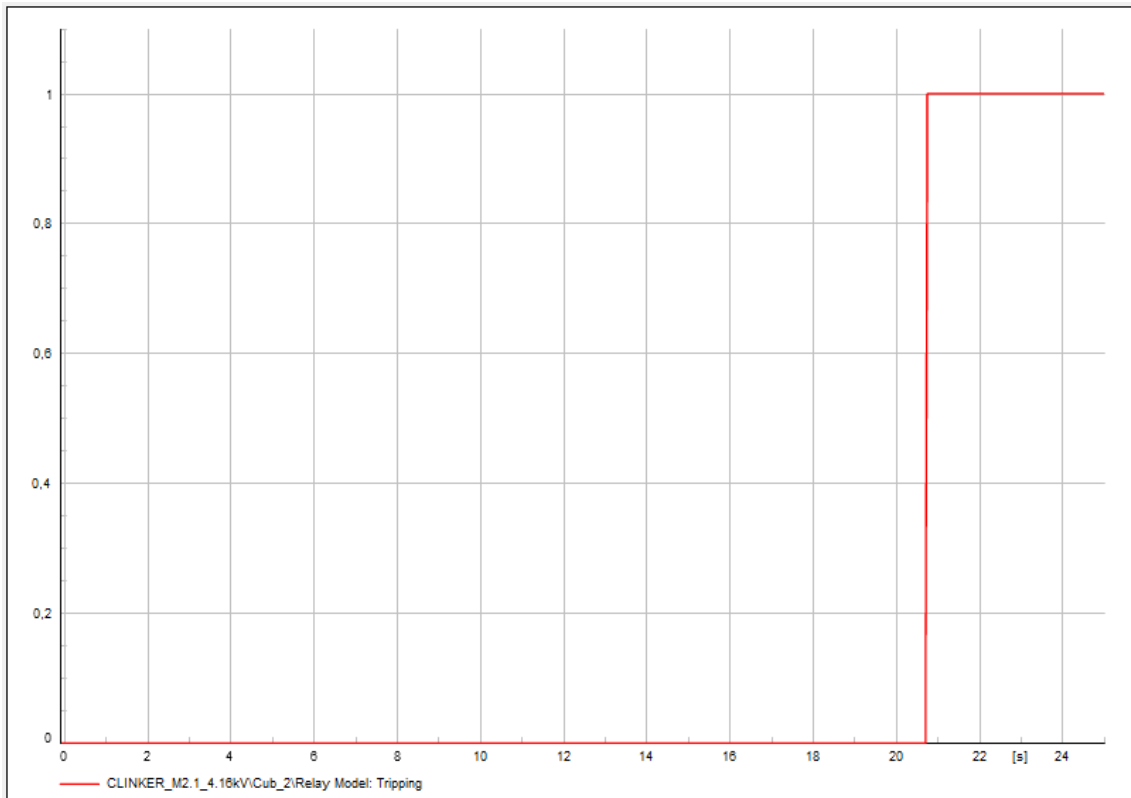
**Figura 141.** Cálculo de time dial para protección 49.

**Tabla 39.** Eventos para prueba de protección 49.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 1,75 [pu]	15



**Figura 142.** Voltaje y corriente del motor.



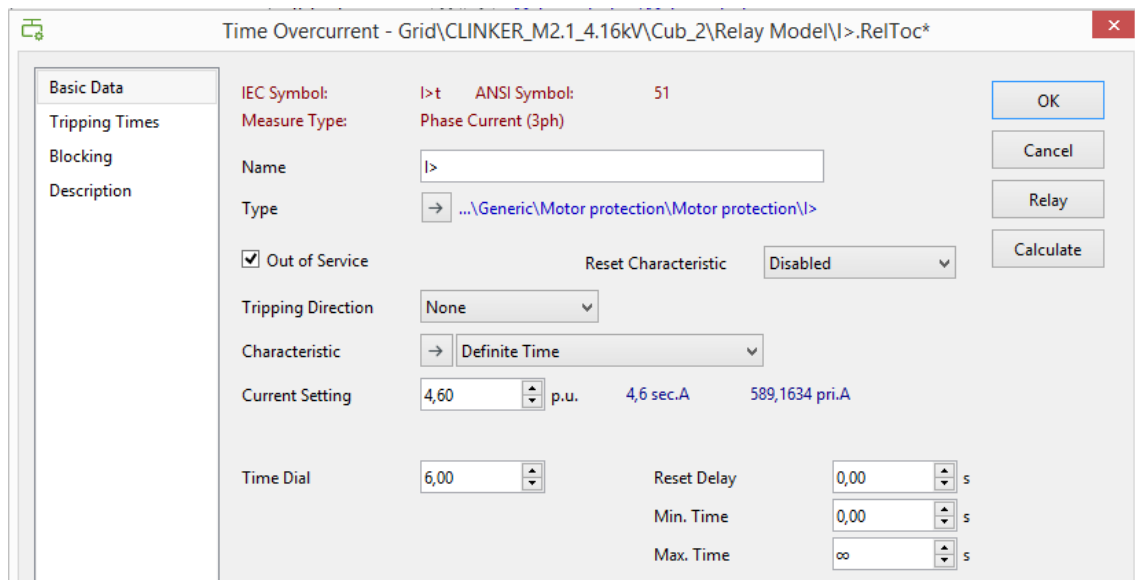
**Figura 143.** Disparo del relé.



Las Figuras 142 y 143 muestran el proceso de prueba para la protección 49, como se puede observar, el relé opera bajo los parámetros configurados, permitiendo un arranque exitoso y una posterior operación de la protección cuando ocurre la perturbación.

#### 4.2.1.2.2 Prueba de la protección de sobrecorriente temporizada (51)

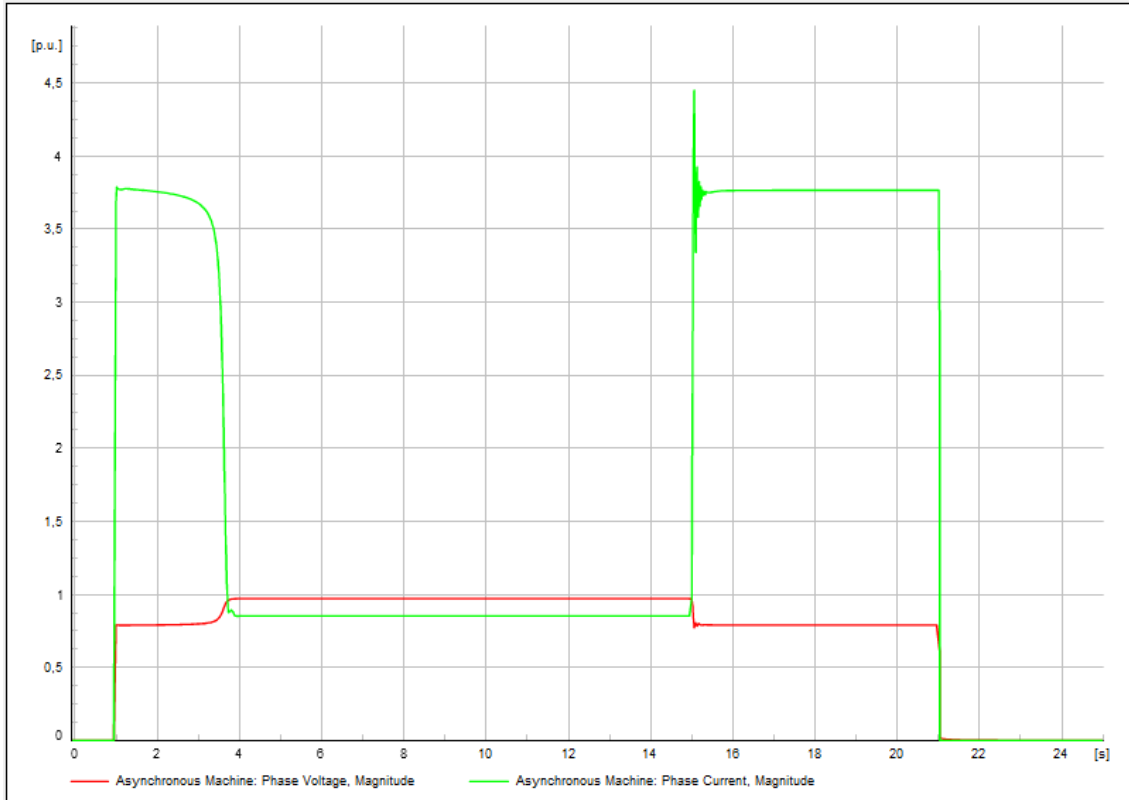
Para la parametrización de esta protección se colocó la configuración típica expuesta en el punto 3.2, se seleccionó el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de actuación del relé.



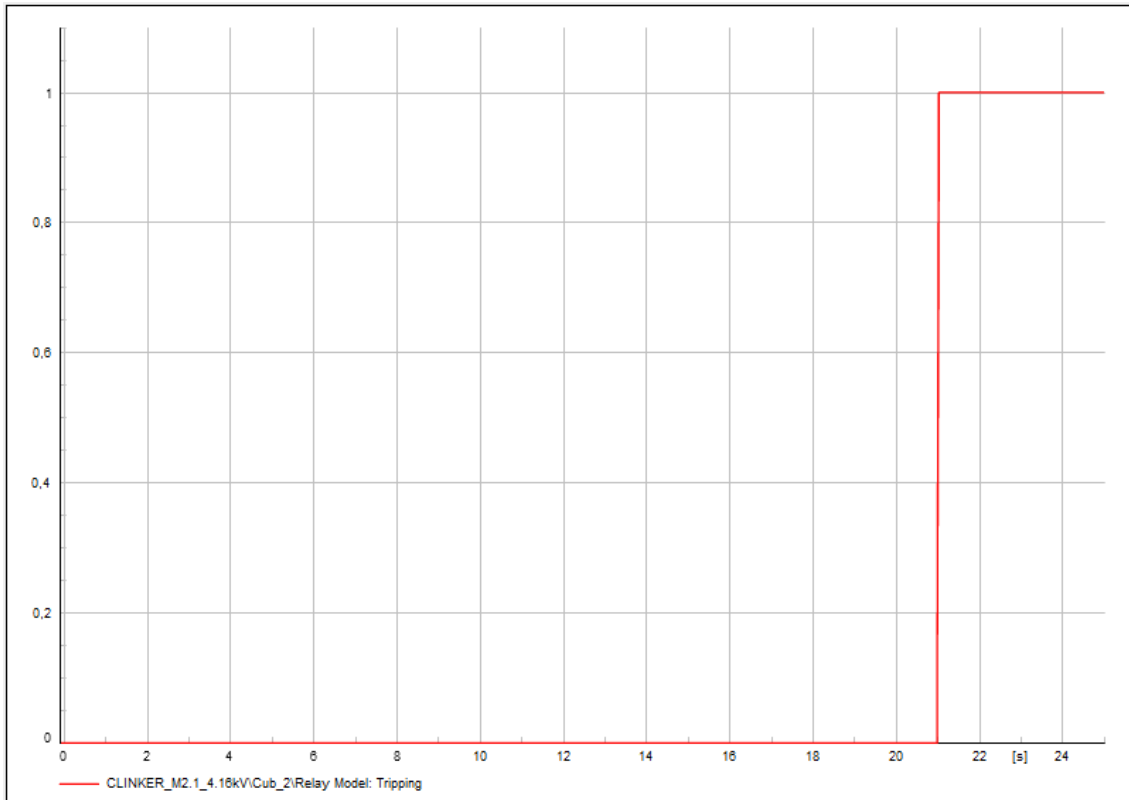
**Figura 144.** Configuración.

**Tabla 40.** Eventos para la prueba de la protección 51.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Parámetro de motor mdmlp a 6 [pu]	15



**Figura 145.** Voltaje y corriente del motor.

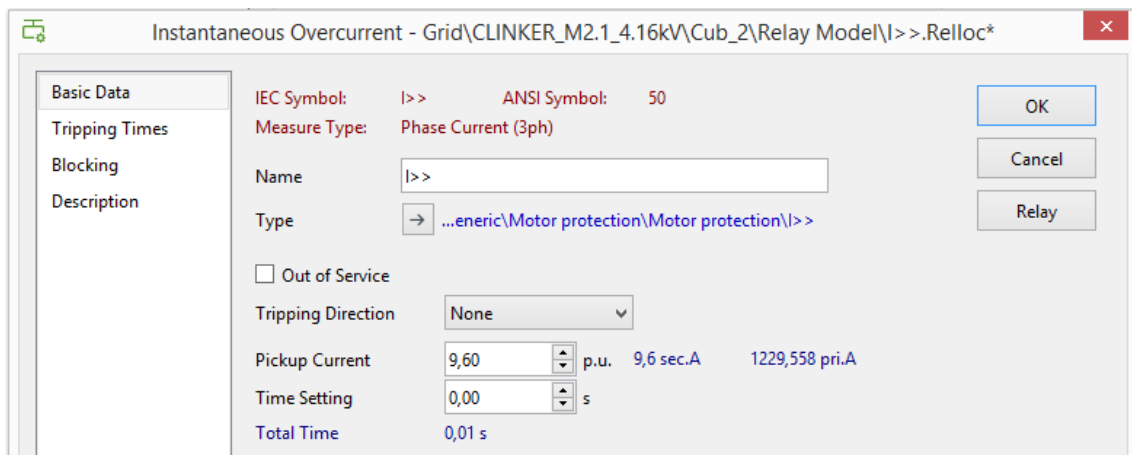


**Figura 146.** Disparo del relé.

Observando las Figuras 145-146 se puede decir que la prueba de la protección fue exitosa debido a que el motor tuvo un arranque exitoso y el relé solo operó cuando sintió la perturbación simulada para probar su correcta aplicación.

#### 4.2.1.2.3 Prueba de la protección de sobrecorriente instantánea (50)

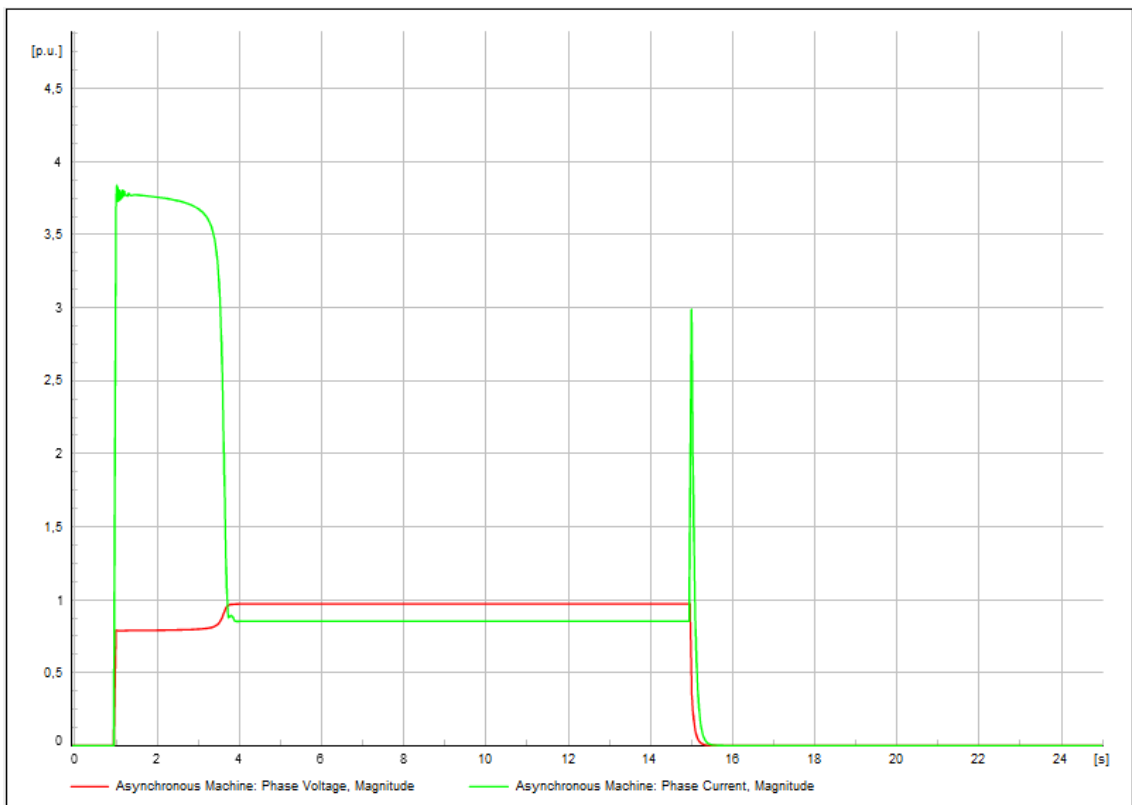
Para la prueba de la protección 50 se configuró los parámetros según lo expuesto en el punto 3.2, se configuró la corriente de pick up y el tiempo de actuación que en este caso es instantáneo.



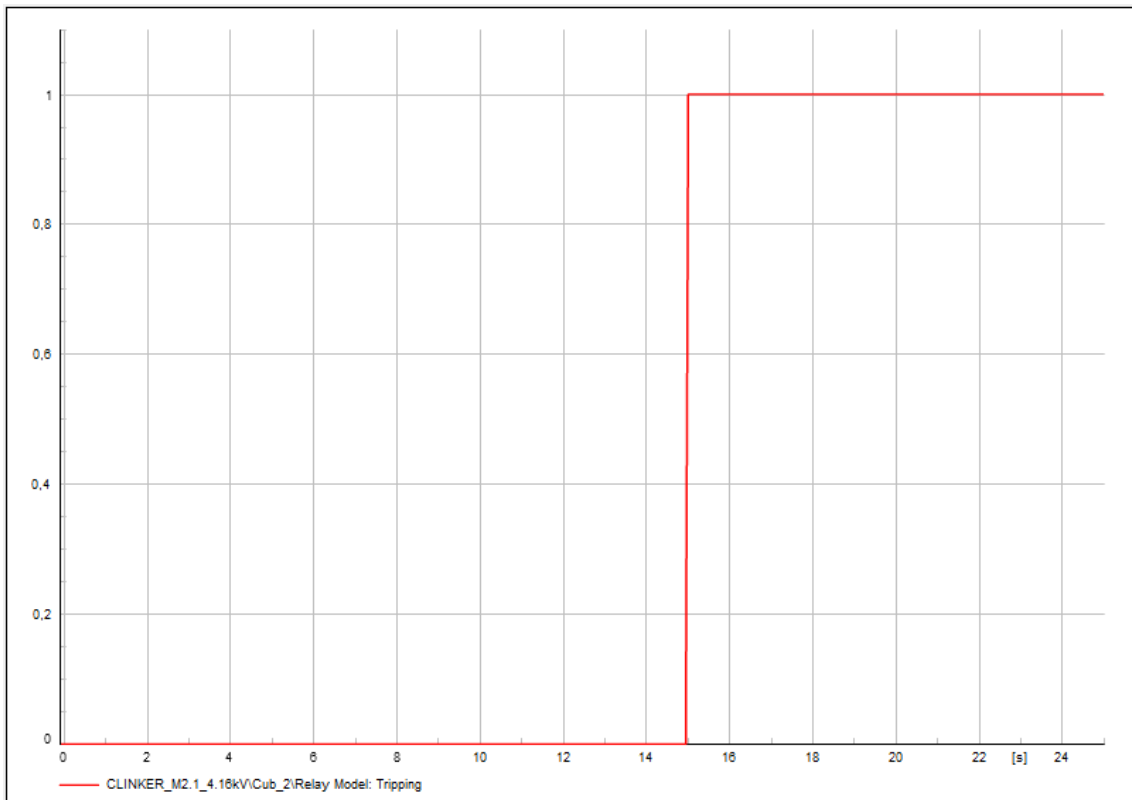
**Figura 147.** Configuración

**Tabla 41.** Eventos para prueba de la protección 50.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Cortocircuito en la barra del motor	15



**Figura 148.** Voltaje y corriente del motor.



**Figura 149.** Disparo del relé.

Las Figuras 148 y 149 muestran la exitosa situación de a prueba de la protección 50, teniendo un correcto arranqué del motor y una correcta operación instantánea de la protección cuando ocurre la perturbación simulada.

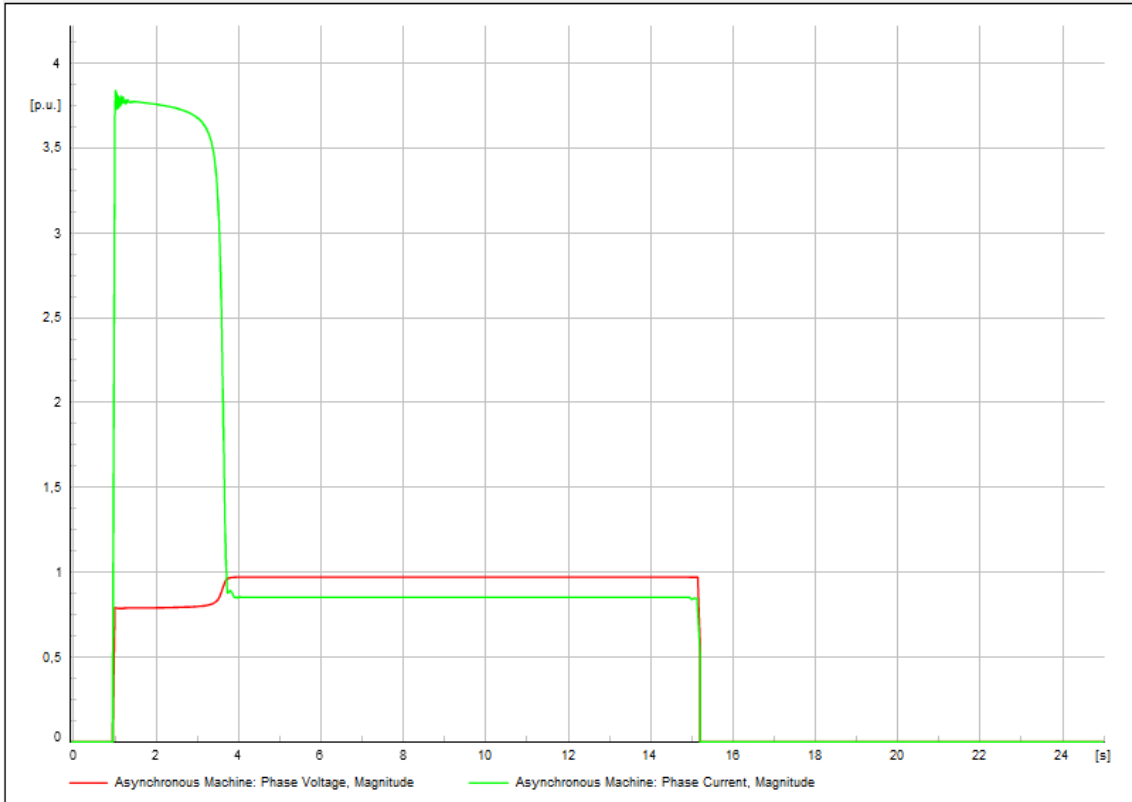
#### 4.2.1.2.4 Prueba de protección contra fallas a tierra temporizada (51N)

para realizar la prueba de la protección 51N, se procedió a la configuración de la protección bajo los parámetros indicados en la sección 3.2, indicando el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de actuación de la protección.

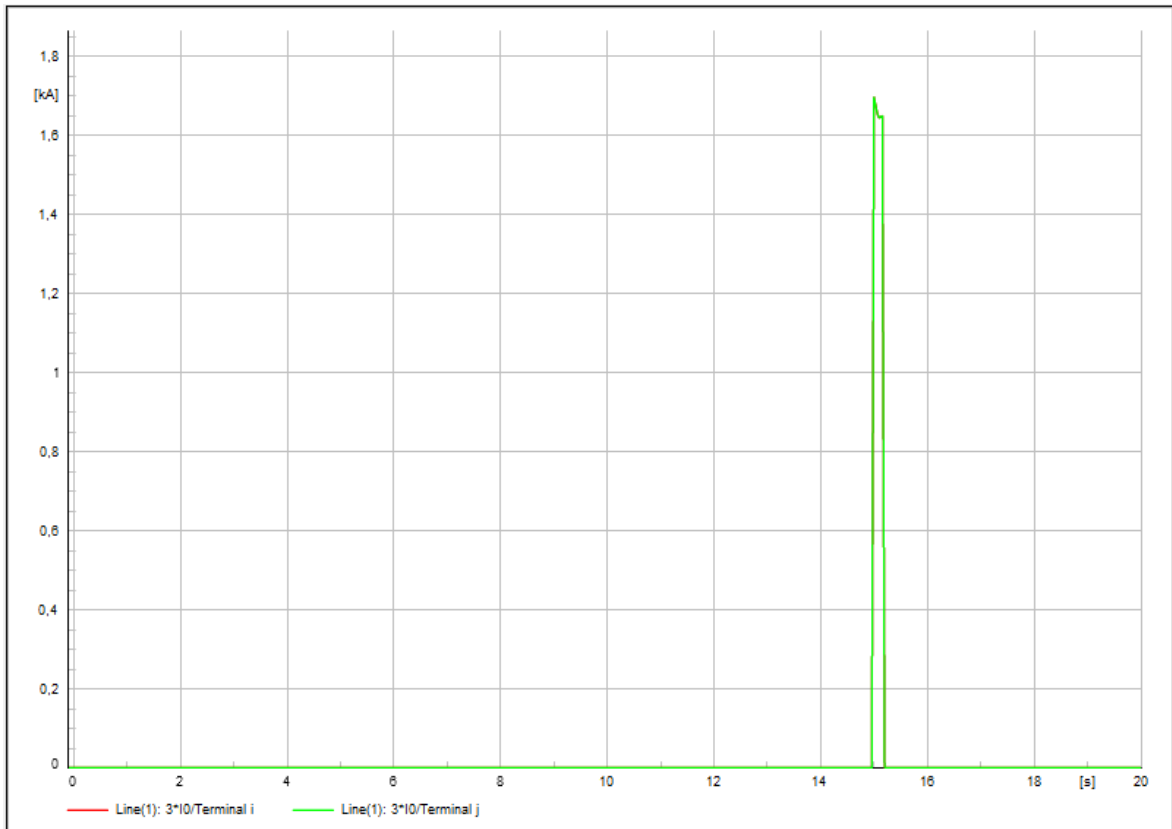
**Figura 150.** Configuración.

**Tabla 42.** Eventos para prueba de protección 51N.

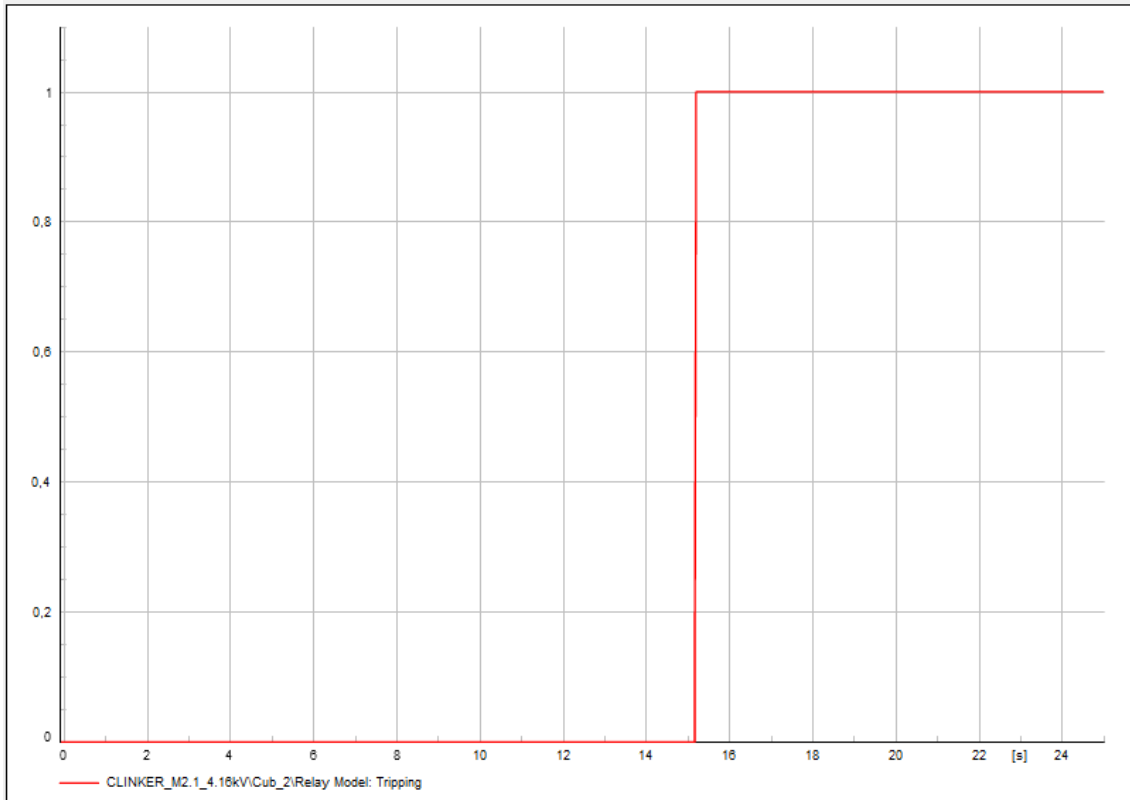
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado.	15



**Figura 151.** Voltaje y corriente del motor.



**Figura 152.** Corriente de secuencia cero de la línea al motor.

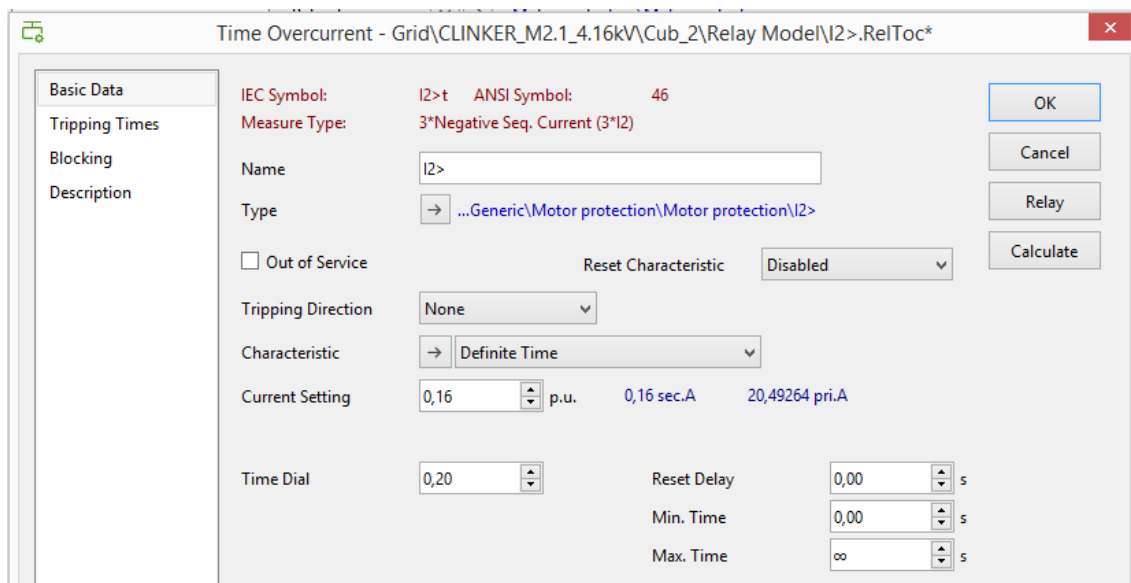


**Figura 153.** Disparo del relé.

Las Figuras 151-153 muestran los resultados de la prueba realizada a la protección 51N, obteniendo un exitoso arranque de motor, posteriormente la perturbación simulada y la operación adecuada de la protección, asegurando su correcta parametrización.

#### 4.2.1.2.5 Prueba de la protección de desbalance de corriente (46)

Para la prueba de la protección 46 se procedió con la parametrización según se expone en el punto 3.2 y se configuró la protección, con el tipo de curva, la corriente de pick up y el tiempo de operación.

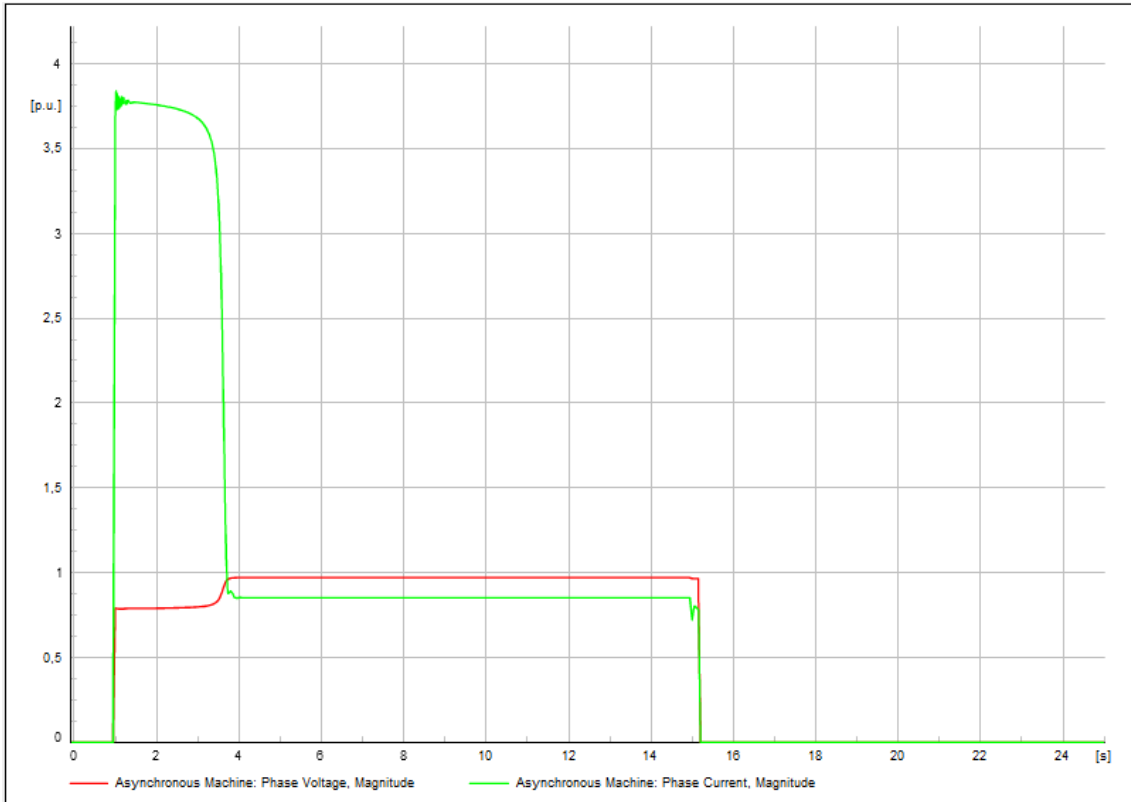


**Figura 154.** Configuración

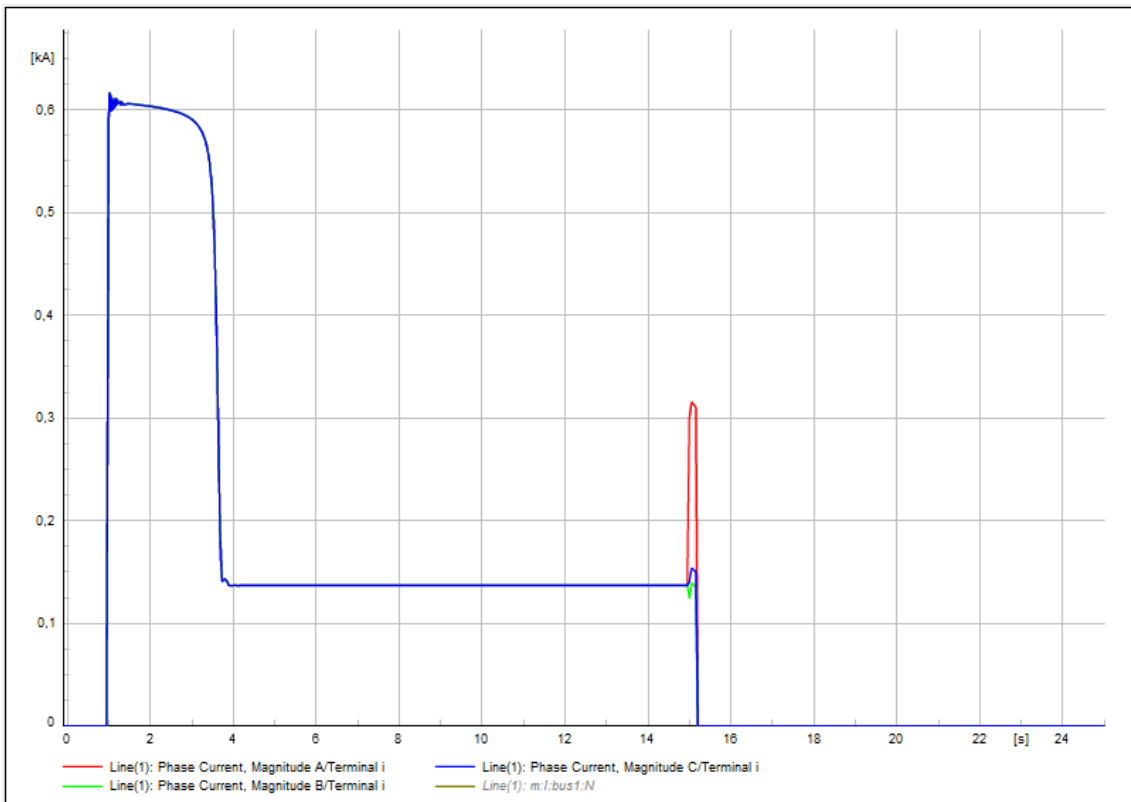
**Tabla 43.** Eventos para la prueba de la protección 46.

	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Switch de la carga monofásica a cerrado.	15

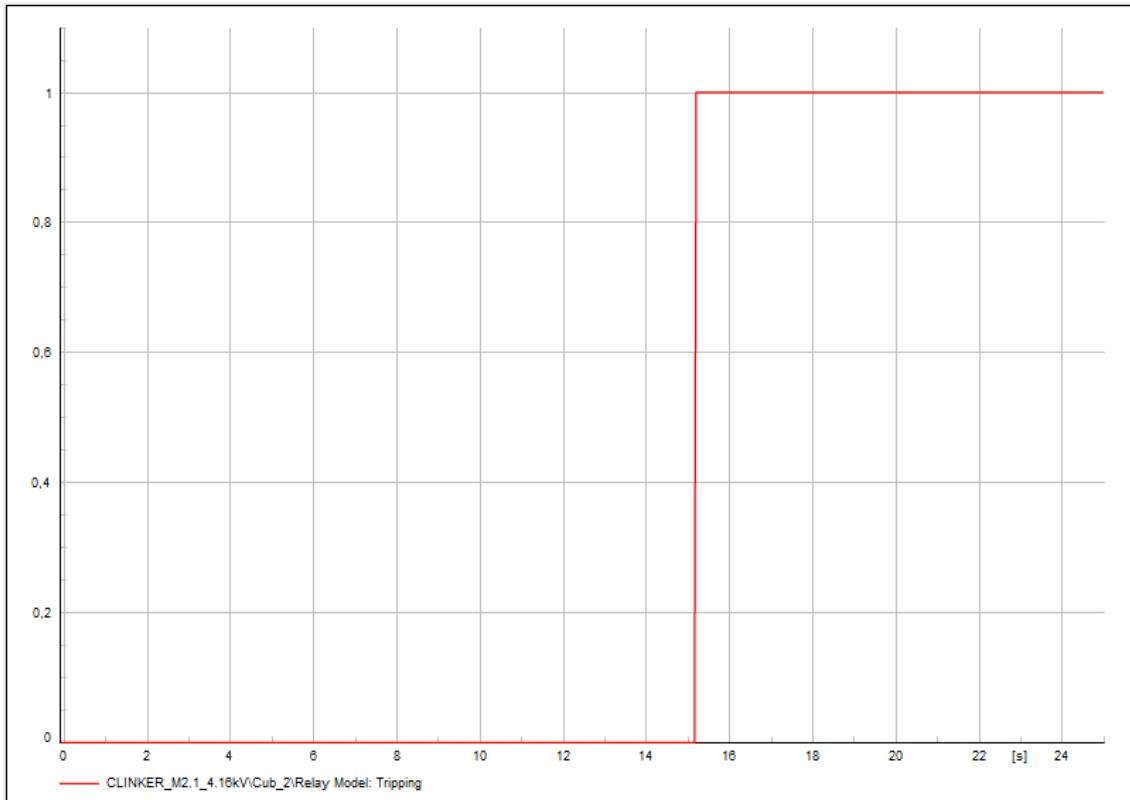




**Figura 155.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 156.** Corrientes de fase de la línea al motor.

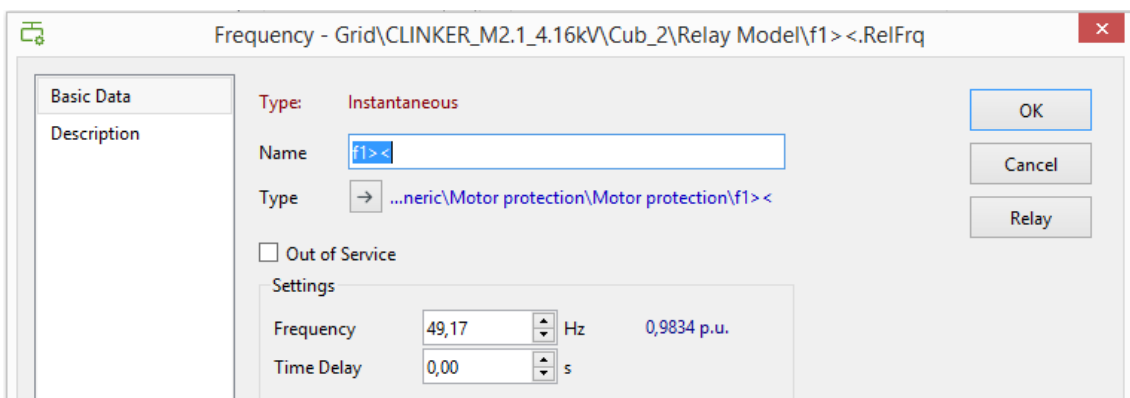


**Figura 157.** Disparo del relé.

Los resultados que se muestran en las Figuras 155-157, comprueban la correcta aplicación de la protección 46, permitiendo un arranque del motor exitoso y una operación del relé instantánea al momento de ocurrir la perturbación, confirmando que la parametrización y aplicación de la protección es la adecuada.

#### 4.2.1.2.6 Prueba de la protección de baja frecuencia (81)

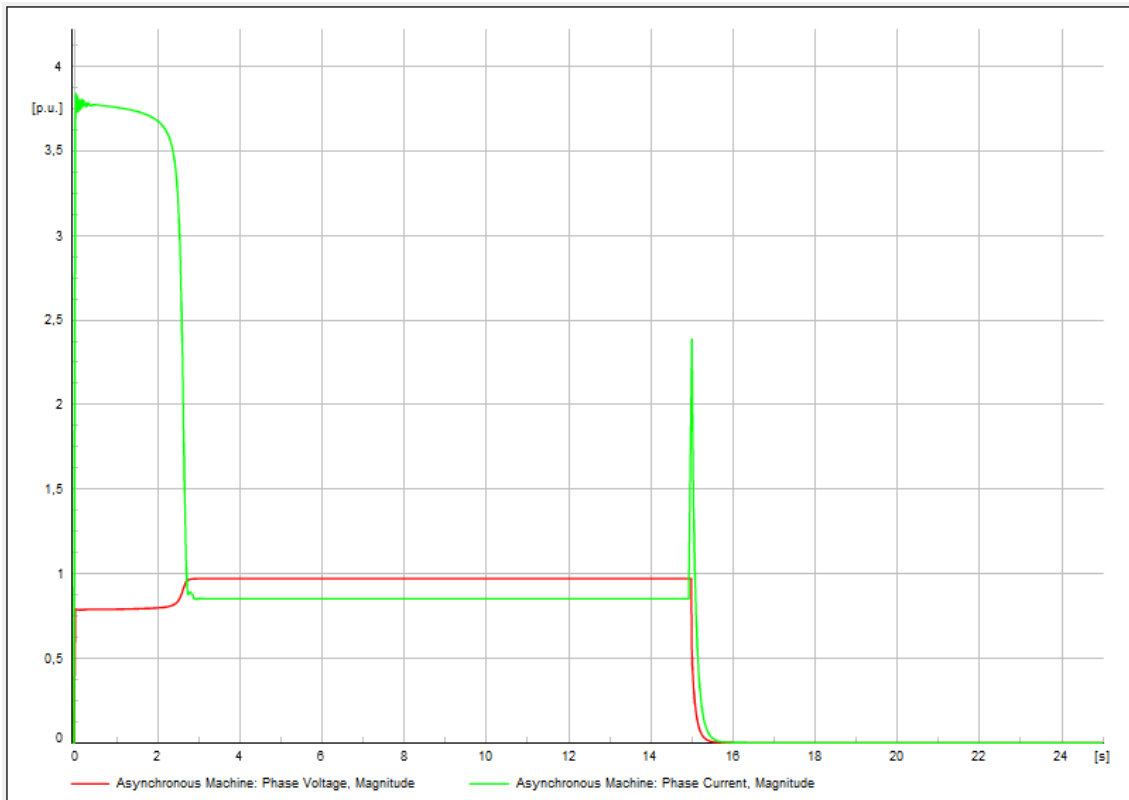
Para la prueba de la protección 81, se configuró según la parametrización propuesta en el punto 3.2, ingresando la frecuencia mínima de operación del relé y el tiempo que para este caso debe ser instantáneo.



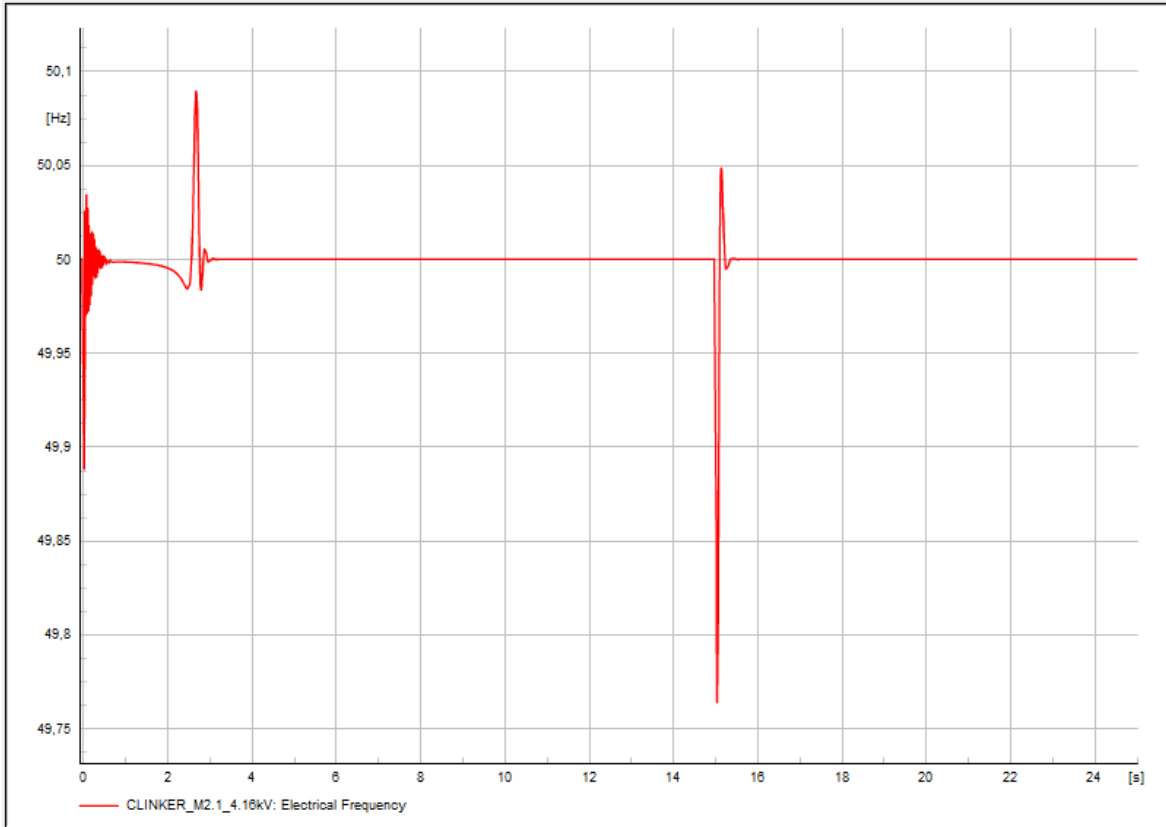
**Figura 158.** Configuración.

**Tabla 44.** Eventos para la prueba de la protección 81.

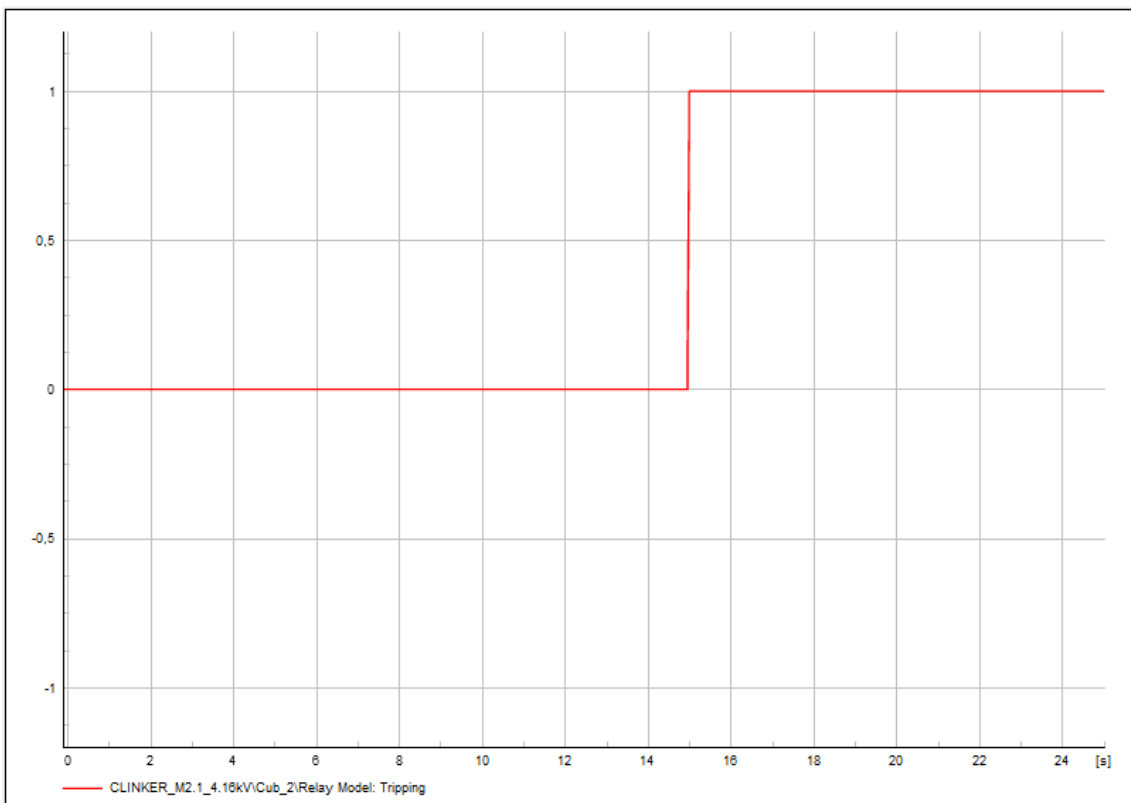
	<b>Eventos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Arranque de motor.	Switch del motor a cerrado	1
Parámetro de cambio	Switch de la carga a abierto.	15



**Figura 159.** Voltaje y corriente en pu del motor.



**Figura 160.** Frecuencia de la barra del motor.



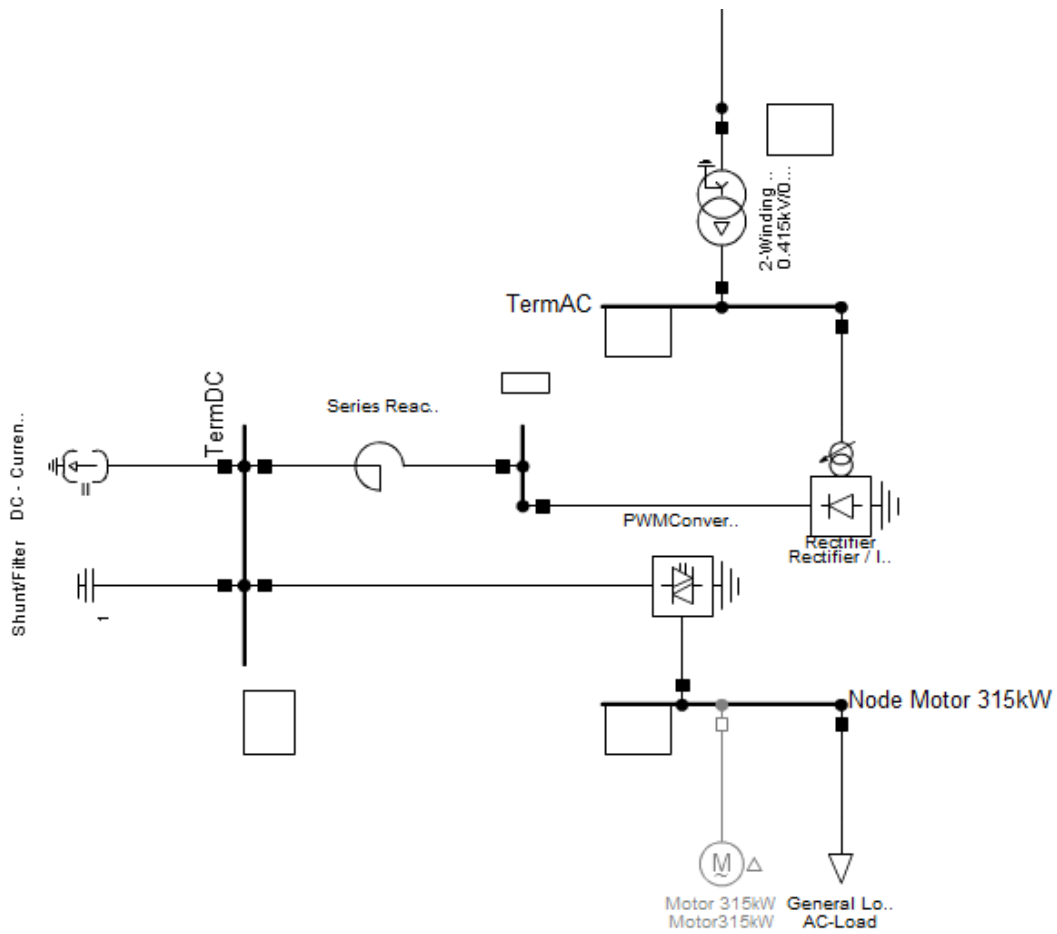
**Figura 161.** Disparo del relé.

Las Figuras 159-161 muestran los resultados éxitos de la prueba de la protección 81, donde se puede observar el voltaje, la corriente y la frecuencia del motor; el arranque ocurre con normalidad y al momento de la perturbación la protección actúa de forma instantánea.

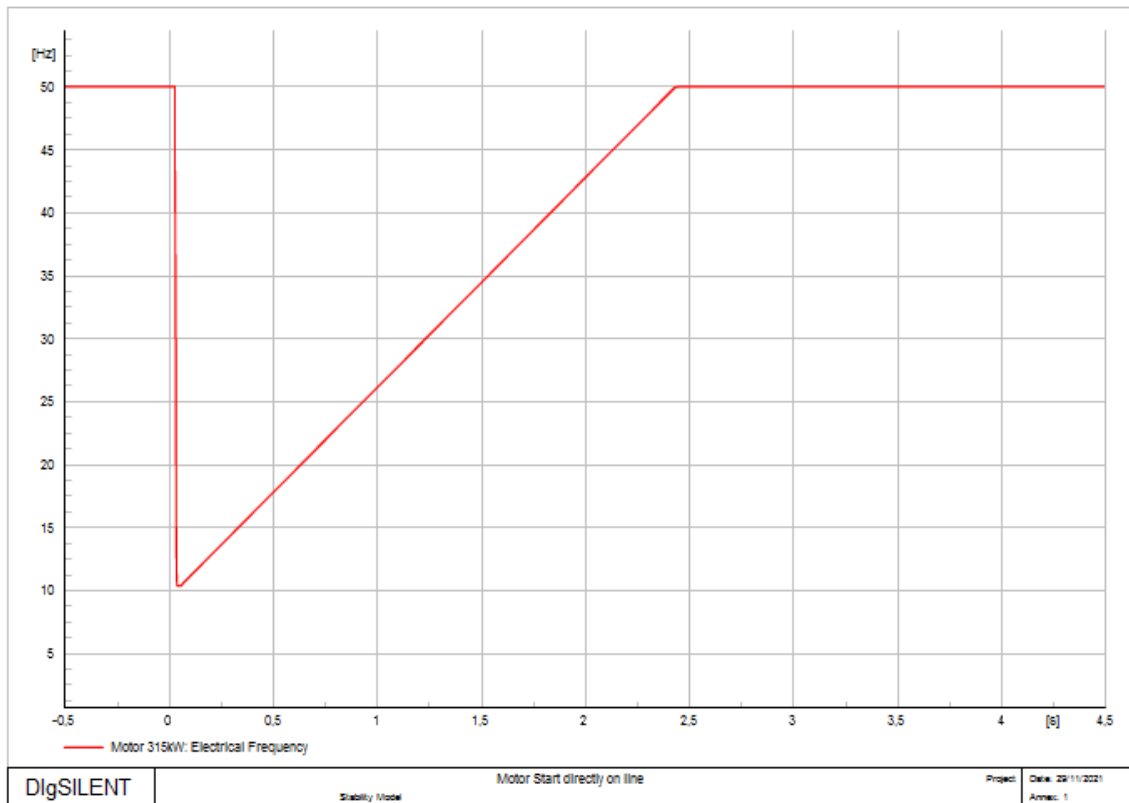
### 4.3 PROTECCIÓN 81 CON ARRANQUE VFD

#### 4.3.1 VFD

Para probar este tipo de arranque se utilizó el caso de estudio provisto por DlgSILENT ya que su implementación real es de mucha complejidad.



**Figura 162.** Esquema para arranque con VFD.



**Figura 163.** Arranque del motor.

### 4.3.1.1 GENERICO

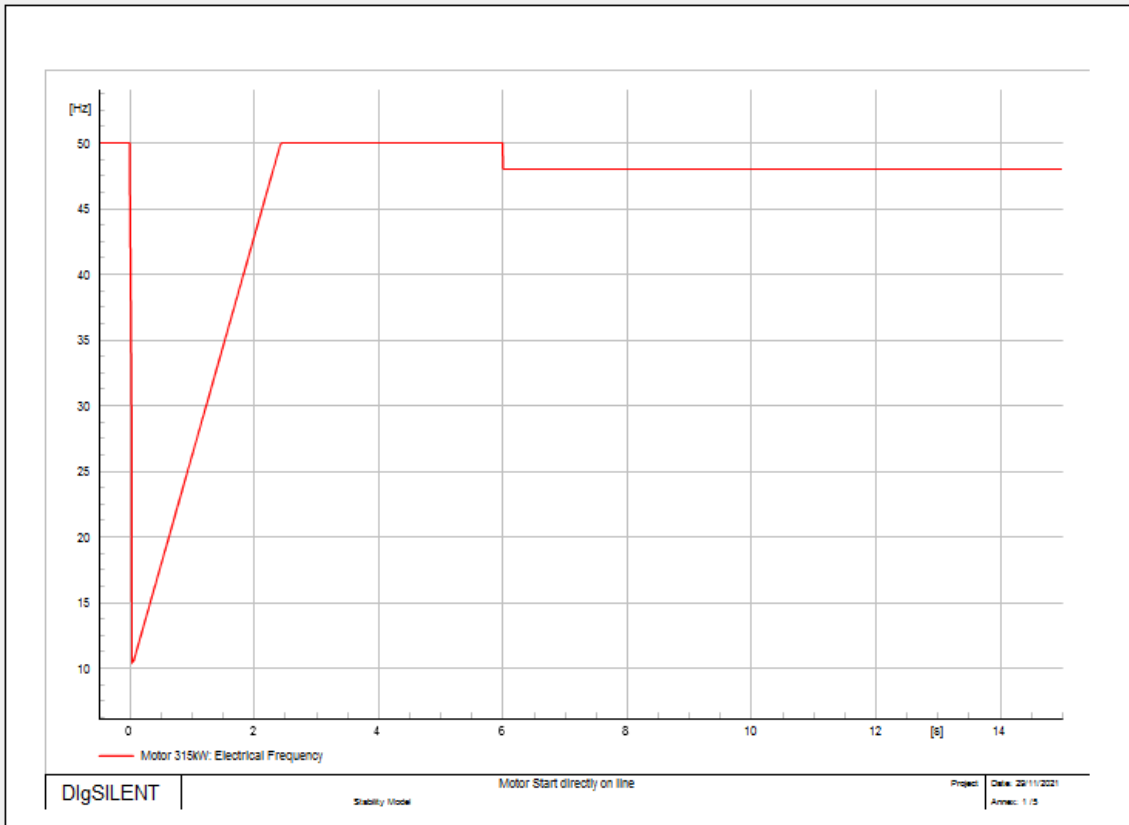
#### 4.3.1.1.1 Prueba de la protección de baja frecuencia (81)

The screenshot shows the configuration dialog for a relay. The title bar reads "Frequency - Grid\Node Motor 315kW\Cub\_4\Relay Model\f1><.RelFrg\*". The dialog is divided into several sections:

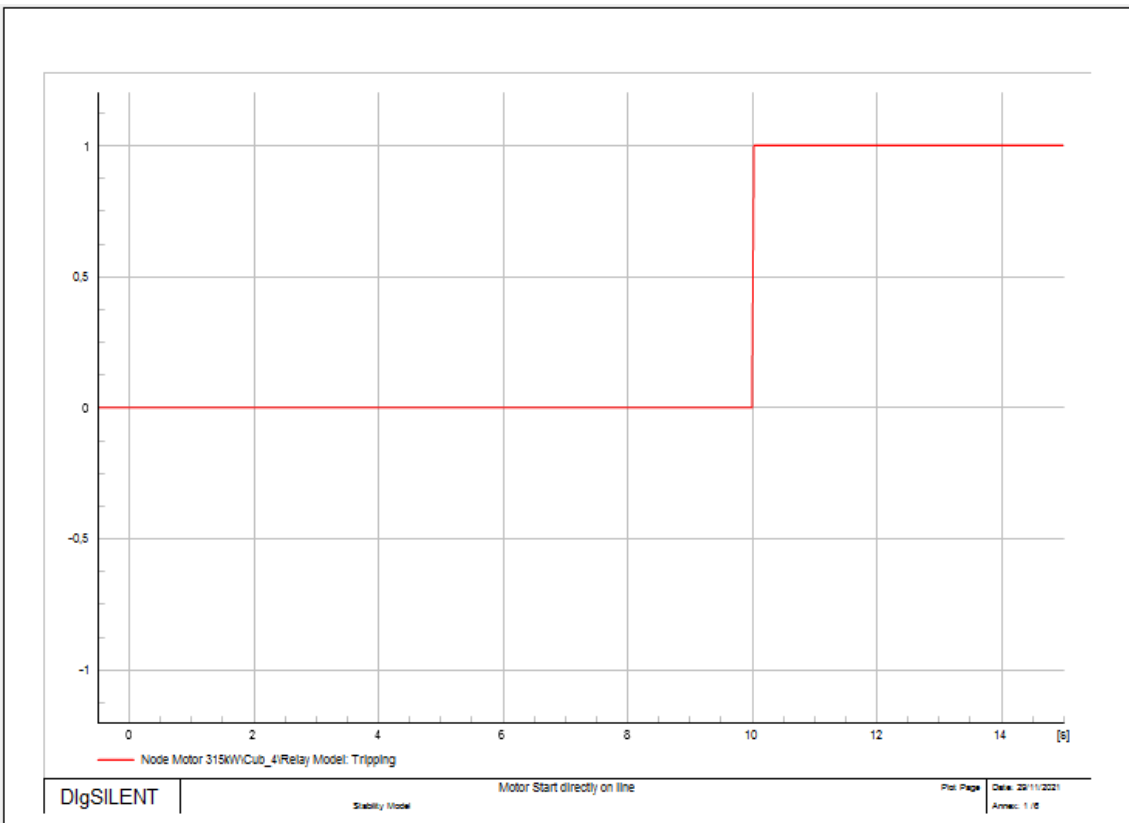
- Basic Data:**
  - Type: Instantaneous
  - Name: f1><
  - Type: ...neric\Motor protection\Motor protection\f1><
  - Out of Service
- Settings:**
  - Frequency: 49,17 Hz (0,9834 p.u.)
  - Time Delay: 4,00 s

Buttons for OK, Cancel, and Relay are visible on the right side of the dialog.

**Figura 164.** Configuración del relé.



**Figura 165.** Frecuencia del motor.



**Figura 166.** Disparo del relé.

Las Figuras 165 y 166 muestran la prueba de la protección 81 cuando se utiliza un arranque de motor con VFD, obteniendo un resultado exitoso al momento del arranque donde no opera la protección y una posterior operación cuando la baja frecuencia es permanente.



## **CAPITULO 5**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- Los motores son componentes importantes del sistema eléctrico que aportan al desarrollo de un país puesto que son parte constituyente de los procesos industriales, es así que la falta de mantenimiento y adecuados sistemas de protección del equipo pueden significar pérdidas económicas para la empresa y la sociedad.
- La protección de motores es un campo muy amplio y la parametrización de las distintas funciones de protección ha sido poco descrita en las normas internacionales. Este trabajo de titulación presenta la lista mínima de protecciones a implementar en base a un análisis de las recomendaciones encontradas en la literatura especializada, las funciones de protección presentes en los relés de los principales fabricantes en el mercado, los diferentes tipos de arranque disponibles y el modelado térmico del motor, brindando una amplia compilación de información respecto a lo investigado. Como resultado se elaboró un listado de funciones de protección a aplicarse en los motores de gran potencia y alto voltaje, teniendo en cuenta el modelo térmico del motor, así como la aplicación de los diferentes tipos de arranque del motor.
- La guía metodológica y la herramienta computacional para la parametrización de las funciones de protección seleccionadas brindaron resultados muy satisfactorios al momento de realizar las pruebas en los sistemas de estudio, teniendo una correcta respuesta ante las diferentes perturbaciones simuladas en el dominio del tiempo.
- Mediante las pruebas realizadas a las diferentes funciones de protección para motores se validó la correcta parametrización de las funciones y la filosofía de protecciones propuesta en este documento, las simulaciones en el dominio del tiempo muestran el correcto funcionamiento del esquema propuesto.
- Con motores de alto voltaje y gran potencia se debe tener un cuidado particular debido a su elevado costo de inversión. Un mal manejo, una mala aplicación del sistema de protección o la ausencia de este pueden significar gastos extras por mantenimiento, reparación, pérdida de vida útil, disminución de eficiencia y

reemplazo total por daño; un sistema de protección adecuado ayuda a prevenir problemas futuros en el motor y asegura que cumpla correctamente su función.

- La protección térmica del motor se implementa mediante: i) Aplicación del modelo térmico del motor, y ii) Uso de detector resistivo de temperatura (RTD). No todos los relés cuentan con la capacidad de uso de RTD, sin embargo, aquellos que aplican el modelo térmico del motor, internamente calculan la curva térmica según las características técnicas del motor, que deben ser provistas por el usuario.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- En la literatura técnica, se recomienda que para la protección de rotor bloqueado se debe utilizar un relé de distancia que permite una mejor evaluación del bloqueo del rotor. En este trabajo no se aplicó dicho tipo de protección debido a que los relés comerciales exclusivos para motores no incluyen la protección de distancia.
- El alcance de presente trabajo de titulación no incluye la realización de pruebas físicas de los relés en ambiente real, por tanto, se recomienda realizar pruebas de parametrización de relés aplicados a motores industriales de alto voltaje y gran potencia para verificar la correcta operación de los dispositivos de protección. Las pruebas presentadas en el trabajo de titulación pueden considerarse como punto de partida.
- Para la aplicación de relés de protección que sean manufacturados por fabricantes que no se mencionen en este trabajo o posible actualización de alguno de los mencionados, es importante la adecuada interpretación y lectura de los manuales correspondientes para una correcta parametrización de las funciones de protección.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] MEER, *Plan Maestro de Electricidad 2016-2015*. Quito, 2017.
- [2] N. K. SUREPELLY, "Industrial AC Motors Categorized," 2018. <https://www.arcweb.com/blog/industrial-ac-motors-categorized>.
- [3] J. Vico and R. Hunt, "PRINCIPLES IN MOTOR PROTECTION," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2011, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6009150>.
- [4] C. Ascuy, "Arranque de motores eléctricos de C. A.," 2005. .
- [5] "High voltage HV motors from Germany." <https://www.menzel-motors.com/high-voltage-motors/> (accessed Oct. 03, 2020).
- [6] "Large Induction Motors - Baldor.com." <https://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/motors/large-ac-motors/large-induction-motors> (accessed Oct. 03, 2020).
- [7] DirectIndustry, "High-voltage motors." <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/high-voltage-motor-140873.html>.
- [8] R. JOSÉ, *MOTORES ELÉCTRICOS AUTOMATISMOS DE CONTROL*, 9th ed. MADRID, 2005.
- [9] ABB Motors and Mechanical, "Starting Method." [https://config.baldor.com/Help/LAC/LAC\\_Starting\\_Method\\_Help.pdf](https://config.baldor.com/Help/LAC/LAC_Starting_Method_Help.pdf).
- [10] F. Acosta, "Simulación y Ensayos del Partidor Suave Electrónico Digital V5 Accionando un Motor con Diferentes Cargas," Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017.
- [11] Rockwell Automation, "When to use a Soft Starter or an AC Variable Frequency Drive." [Online]. Available: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf).
- [12] Variable Frequency Drives, "What is VFD , How it works ? - VFD working principle," 2018. <http://www.vfds.org/what-is-vfd-how-it-works-964803.html>.
- [13] S. Zocholl and E. Scheitzer, "THERMAL PROTECTION OF INDUCTION MOTORS ENHANCED BY INTERACTIVE ELECTRICAL AND THERMAL MODELS," *IEEE*

- Trans. Power Appar. Syst.*, vol. Vol. PAS-1, 1984.
- [14] S. E. Zocholl, "Optimizing motor thermal models," *Rec. Conf. Pap. - Annu. Pet. Chem. Ind. Conf.*, 2006, doi: 10.1109/PCICON.2006.359713.
- [15] I. Power and E. Society, *IEEE Guide for AC Motor Protection*, vol. 2012, no. February. 2013.
- [16] L. Blackburn and T. Domin, *PROTECTIVE RELAYING PRINCIPLES AND APPLICATIONS*, Fourth. 2014.
- [17] W. A. ELMORE, *PROTECTIVE RELAYING THEORY AND APPLICATIONS*, SECOND EDI. .
- [18] S. E. Zocholl, *AC Motor Protection*, Second. 2003.
- [19] J. Mamede Filho, *Proteção De Sistemas Elétricos De Potência*. Rio de Janeiro, 201AD.
- [20] ABB, "Type CO Overcurrent Relay." 1992, [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/7042f1d45630fca185256eac0053e7d4/41-101U.pdf>.
- [21] ABB, "Main catalog: Motor protection and control," 2014. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/numerical-relays/motor-protection-and-control/motor-protection-and-control-rem630-iec>.
- [22] ABB, "Motor protection and control REM630." pp. 1–4, 2016, [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS756977&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [23] Schneider Electric, "Easergy MiCOM P24x," 2019. <https://www.se.com/ww/en/product-range/60753-easergy-micom-p24x/?parent-subcategory-id=4665#documents>.
- [24] Schweitzer Engineering Laboratories Inc., "SEL-849." <https://selinc.com/es/products/849/>.
- [25] Schweitzer Engineering Laboratories Inc., "SEL-849 Relé de Protección a Motor." 2013, [Online]. Available: [https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product Literature/Data Sheets/849\\_DS\\_20130104\\_ES.pdf?v=20160625-205417](https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product Literature/Data Sheets/849_DS_20130104_ES.pdf?v=20160625-205417).
- [26] S. Jones, "Motor Protection.," *Control and Instrumentation*, 1975. [149](https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/reynolle-5/motor-protection/motor-protection-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

reyrolle-7sr57.html.

- [27] Siemens, “Reyrolle 7SR5 Motor Protection 7SR57,” vol. V02.21. 2021, [Online]. Available:  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/131/109792131/att\\_1074050/v1/7SR57\\_Motor\\_Protection\\_Device\\_Manual\\_2\\_en\\_US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/131/109792131/att_1074050/v1/7SR57_Motor_Protection_Device_Manual_2_en_US.pdf).
- [28] General Electric Company, “Multilin M60.”  
<https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/m60.htm>.
- [29] B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman, M. Thakur, and R. Midence, “Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection,” *2005 58th Annu. Conf. Prot. Relay Eng.*, vol. 2005, pp. 127–144, 2005, doi: 10.1109/CPRE.2005.1430428.

## **7. ANEXOS**

ANEXO A. Manual de usuario herramienta computacional: PARAMETRIZACION DE PROTECCIONES PARA MOTORES.

# ANEXO A

Manual de usuario.

El software muestra una sola ventana interactiva donde se puede ingresar los datos necesarios para su funcionamiento, así como sus resultados.

Figura 167. Ventana principal de la herramienta computacional.

## Ingreso de datos.

Los datos para el correcto funcionamiento de la herramienta para parametrizar protecciones se encuentran ubicado en la parte superior de la ventana principal.

Figura 168. Sección para ingreso de datos.

En esta sección se deberán ingresar los datos:

- Marca del relé comercial que se desea parametrizar.

MARCA	ABB ▼
TIPO DE ARRANQUE	ABB
TIEMPO DE ARRANQUE	SCHNEIDER
	SEL
	SIEMENS

**Figura 169.** Selección de la marca comercial del relé.

- Tipo de arranque del motor.

TIPO DE ARRANQUE	ARRANQUE DIREC... ▼
TIEMPO DE ARRANQUE	ARRANQUE DIRECTO
SELECCIÓN DE	ESTRELLA-DELTA
<input type="checkbox"/> 14	RESISTENCIA VARIABLE (ROTOR)
<input type="checkbox"/> 27	REACTOR
<input type="checkbox"/> 46	AUTOTRANSFORMADOR
	VFD

**Figura 170.** Selección del tipo de arranque del motor.

- Tiempo de arranque en segundos.

TIEMPO DE ARRANQUE	<input type="text" value="5"/>	s
--------------------	--------------------------------	---

**Figura 171.** Ingreso del tiempo de arranque.

- Corriente nominal.

CORRIENTE NOMINAL	<input type="text" value="226"/>	A.Prim
-------------------	----------------------------------	--------

**Figura 172.** Ingreso de corriente nominal del motor.

- Frecuencia



FRECUENCIA  Hz

Figura 173. Ingreso de la frecuencia nominal.

- Voltaje

VOLTAJE  V.Prim

Figura 174. Ingreso del voltaje nominal.

- Corriente de rotor bloqueado.

CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO  A.Prim

Figura 175. Ingreso de la corriente de rotor bloqueado del motor.

- Relaciones de transformación del transformador de corriente y transformador de potencial.

RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN		
	PRIMARIO	SECUNDARIO
TC	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="5"/> A
TP	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="120"/> V

Figura 176. Ingreso de las relaciones de transformación de tc y tp.

- Tiempo de parada segura en caliente en segundos.

TIEMPO DE PARADA SEGURO EN CALIENTE  s

Figura 177. Ingreso del tiempo de parada seguro en caliente.

Cabe mencionar que todos los datos que debe ingresar en el software deberán ser valores numéricos, positivos y mayores a cero como el software mismo lo pide.

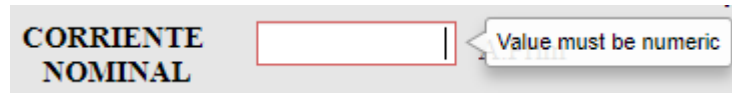


Figura 178. Error por ingreso no numérico.

### **Selección de protecciones.**

En la parte inferior izquierda, se encuentra una lista de protecciones de las cuales se puede seleccionar las funciones que se desea tener la parametrización.

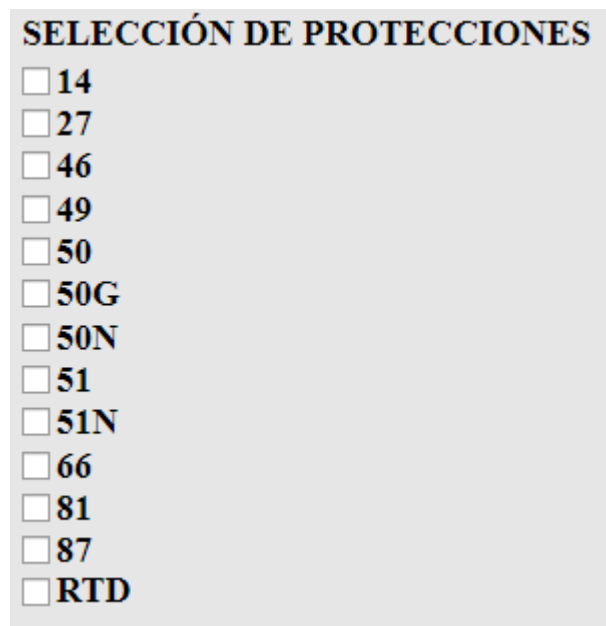
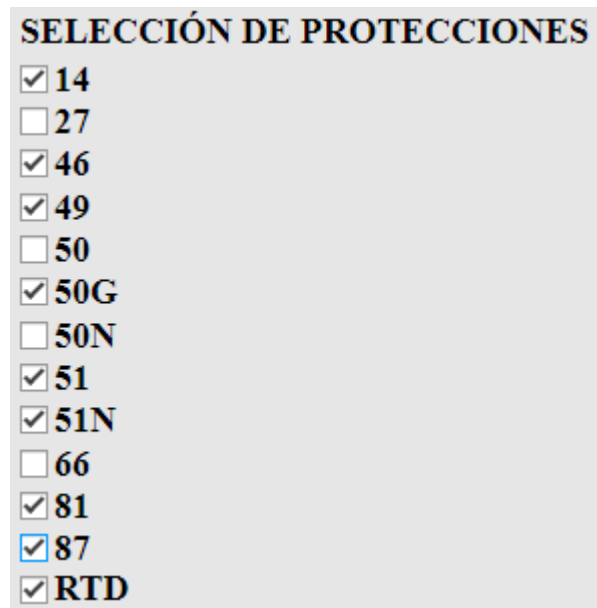


Figura 179. Lista de funciones de protección.

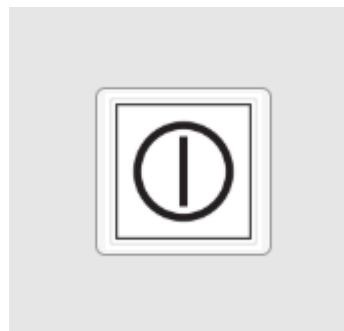
Mediante un “clic” en los checkbox del lado izquierdo se selecciona la o las funciones a parametrizar.



**Figura 180.** Ejemplo de selección de funciones de protección.

#### **Inicio de la parametrización.**

Para obtener la parametrización de las funciones de protección seleccionadas se deberá presionar el botón ubicado en la parte superior de ventana principal.



**Figura 181.** Botón para iniciar parametrización.

#### **Resultados.**

Los resultados de las parametrizaciones se muestran en la parte inferior de la ventana principal, donde se puede ver tanto la función de protección, los parámetros de la función y valores.

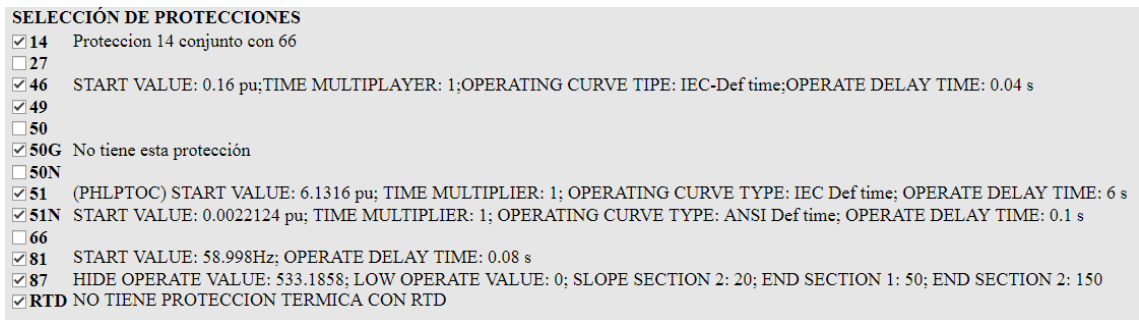


Figura 182. Resultados.

Algunas funciones tienen una lista de parámetros muy extensa y no alcanza en la ventana principal, por lo que se desplegará una ventana extra con los resultados de la función requerida.

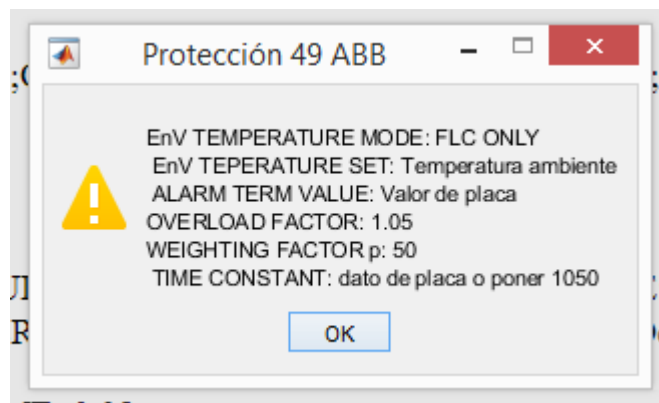


Figura 183. Ejemplo de resultados en otra ventana.

### Errores.

Los errores pueden presentarse por un mal ingreso en los datos del motor y se desplegará una ventana de error indicando una solución.

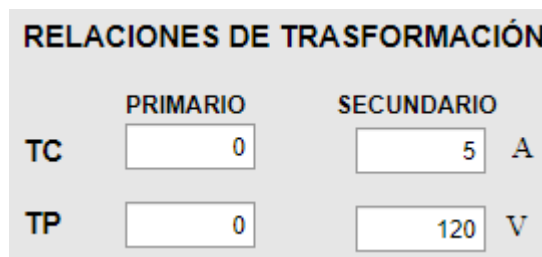


Figura 184. Ejemplo de datos incorrectos.

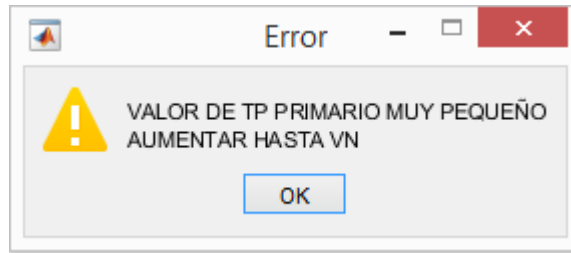


Figura 185. Ejemplo de ventana de error 1.

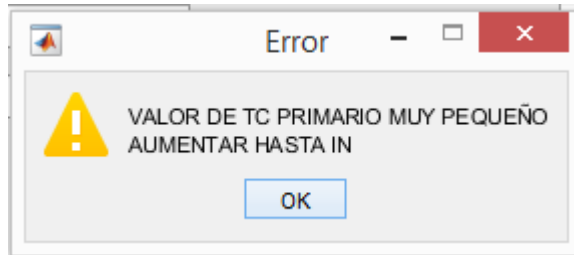


Figura 186. Ejemplo de ventana de error 2.