

Reglas que permiten explotar el conocimiento de los esquemas de relés para la localización de la sección en fallo

Marta Bravo
Humberto Machado
Zenaida García

Alain Álvarez
Isis Bonet
Norma E. Cabrera

Recibido: Julio del 2006

Aprobado: Septiembre del 2006

Resumen / Abstract

Se presentan las reglas que permiten, usando la información procedente de los relés operados e interruptores disparados, hacer la estimación de secciones en fallo en sistemas eléctricos de potencia (SEP). Se pueden identificar fallas en barras, transformadores y líneas. El conocimiento acerca del SEP se almacena en las bases de conocimiento como hechos y los esquemas de los relés como reglas. El mecanismo de inferencia, escrito en lenguaje Prolog estima la sección en fallo con la justificación de cada operación de los relés e interruptores. Para la identificación de las secciones en fallo se prueban un conjunto de hipótesis las cuales están establecidas en forma jerárquica, de forma tal que puedan dar respuesta a cualquier situación creada, aun en caso de fallos múltiples o fallos de operación de los relés e interruptores.

Palabras clave: Sistemas expertos, inteligencia artificial, protecciones eléctricas, localización de fallas

This work presents rules that allow using the information coming from the operated relays and breakers to make the estimate of sections in failure in electric systems of power (EPS). It is possible to identify faults in bars, transformers and lines. The knowledge about the EPS is stored in the bases of knowledge like Facts and the outlines of the relays like rules. The inference mechanism, written in language Prolog estimates the section in failure with the justification of each operation of the relays and breakers. For the identification of the sections in failure are proven a hypothesis group which are established in hierarchical form, in such way that can give answer to any created situation, even in the event of multiple faults or failure of operation of the relays and breakers.

Key words: Expert systems, artificial intelligence, electric protection, failure localization

INTRODUCCIÓN

El sistema basado en conocimiento SDESF, sistema de diagnóstico para la estimación de secciones en fallo,¹ posee una interfase de usuario amigable, un editor gráfico del SEP estilo Windows,² la cual es capaz de configurar las bases de conocimiento acerca de la configuración de la red de forma fácil y amena, sin importar la complejidad que tenga el SEP con el que se quiera trabajar. Además, tiene una interfase con un programa lógico escrito en Prolog,³ el cual se encarga de realizar el proceso de inferencia a partir

de los datos de entrada suministrados por el usuario de los relés e interruptores que operaron con la situación específica deseada. El mecanismo de inferencia procederá a la búsqueda de la solución más probable y el resultado final será mostrado en el editor. Las soluciones propuestas estarán organizadas según la probabilidad de ocurrencia de las mismas.

Las reglas que describen el funcionamiento de las protecciones han sido obtenidas a partir de las encuestas realizadas a especialistas y a los

despachadores de experiencia, se tratan de imitar o reproducir los procesos de razonamientos empleados por estos a partir de las características de operación de cada protección existente; determinando sobre qué interruptores actúa cada protección en forma primaria y de respaldo.

REGLAS PARA EXPLOTAR EL CONOCIMIENTO DE ESQUEMAS DE RELEVADORES

El proceso de justificación de las secciones en fallo consiste en determinar cómo operaron las protecciones para formar el área total desconectada mediante la formulación de varias hipótesis: Operación normal, fallos de operación, operación incorrecta, fallos múltiples.^{4,5}

Para justificar la sección en fallo de acuerdo con los relés operados y con interruptores disparados se necesita probar alguna de estas hipótesis, para ello se cuenta con un conjunto de reglas que se explican más adelante. Para la explicación de cada regla se hará referencia al esquema mostrado en la figura 1. Este esquema representa una red, y toda la información referente a la misma deberá encontrarse en forma de hechos como se indica en las bases de conocimientos.

Formulación de la hipótesis de operación normal

La justificación de la sección en fallo mediante la formulación de la hipótesis de operación normal consiste en probar las siguientes reglas:

- Sin información de relés:

$fallaONSR(E, ID) :- protprimaria(E, IP), igual(ID, IP).$

donde:

fallaONSR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo.

E: Elemento posible de la sección en fallo (obtenido de la lista de elementos estimados como posibles secciones en fallo).

ID: Lista de interruptores que dispararon.

protprimaria: Apuntador empleado para identificar los interruptores que brindan protección primaria a cada elemento.

igual: Apuntador empleado para determinar si dos listas contienen los mismos elementos.

IP: Lista de interruptores que brindan protección primaria al elemento E, posible sección de fallo.

Ejemplo: Se justifica falla en la barra 2:

$fallaONSR(b2, [i2, i4, i5]).$

Yes

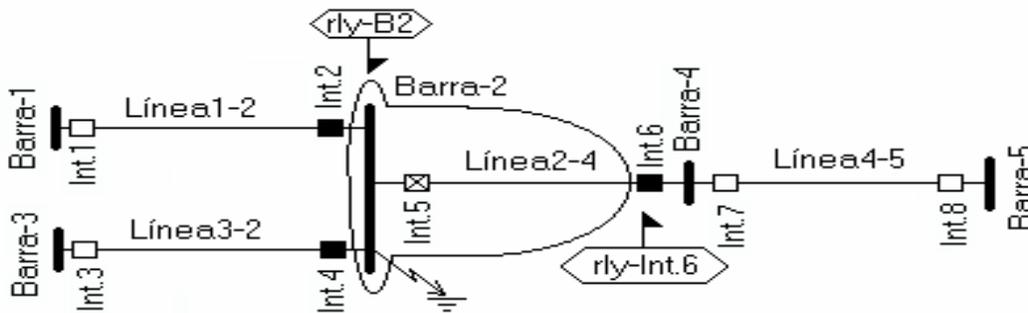
- Con información de relés:

$fallaONCR(E, ID, RD) :- protprimaria(E, IP), igual(ID, IP), relepri(E, RP), igual(RD, RP).$

donde:

fallaONCR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo con información de relés.

RD: Lista de relés que operaron.



Nota:

- Interruptores Disparados.
- Interruptores Cerrados.
- ⊗ Interruptor Fallado.
- ◀ Relés Operados.
- ◀ Área Total Desconectada.

Formación del área total desconectada generada por un fallo de operación de un Interruptor.

Ejemplo: fallaONCR (b2, [i2, i4, i5], ['87b2']).
Yes

Formulación de la hipótesis de fallo de operación

Esta hipótesis se prueba cuándo en el proceso de verificación del área total desconectada bajo la consideración de operación normal de los relés e interruptores, no se justifica por la operación de la protección primaria del elemento posible lugar en fallo. La regla de fallos de operación tiene la siguiente forma:

- Sin información de relés:
fallaFOSR(E, ID) :- protprimaria(E, IP),
interseccion(ID, IP, lpo),
diferencia(IP, lpo, lpno),
conjuntorespaldo(lpno, E, IR),
union(IR, lpo, IT),
igual(IT, ID).

donde:

fallaFOSR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo bajo la hipótesis de fallo de operación.

intersección: Apuntador empleado para determinar la intersección de dos conjuntos.

diferencia: Apuntador empleado para determinar la diferencia de dos conjuntos.

lpo: Conjunto de interruptores primarios que operaron.
lpno: Conjunto de interruptores primarios que no operaron.

conjuntorespaldo: Apuntador empleado para determinar el conjunto total de interruptores que respaldan a "E" ante la no operación de "lpno".

union: Apuntador empleado para determinar la unión de dos conjuntos.

Ejemplo: Se justifica falla en la barra 2 y en la línea 2-4.

fallaFOSR(b2, [i2, i4, i6]).

Yes

fallaFOSR(l24, [i2, i4, i6]).

Yes

- Con información de relés:
fallaFOCR(E, ID, RD) :- fallaFOSR(E, ID),
relepri(E, L1),
releresp(E, L2),
union(L1, L2, L),
pertenece(RD, L).

Para detectar solapamiento:

fallaFOCR([B,E], ID, RD) :- barra(B),
adyacentes(B, E),
relepri(B, L1),
relepri(E, L2),
union(L1, L2, L),
igual(L, RD).

donde:

fallaFOCR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo con información de relés.

pertenece: Apuntador empleado para determinar si los elementos de la primera lista pertenecen a la segunda.
barra: Apuntador empleado para determinar si un elemento es una barra.

Adyacentes: Apuntador empleado para determinar si dos elementos son adyacentes.

Ejemplo: Teniendo en cuenta la información de los relés operados, se determina de forma más precisa el elemento en fallo, que en este caso es la barra 2 y se puede descartar la línea 2-4:

fallaFOCR (b2, [i2, i4, i6], ['87b2', '21142']).

Yes

fallaFOCR (l24, [i2, i4, i6], ['87b2', '21142']).

No

Formulación de la hipótesis de operación incorrecta

Esta hipótesis se prueba cuando el área total desconectada no puede ser justificada con la hipótesis de fallos de operación, por lo cual verifica la formación del área desconectada a partir de los resultados obtenidos por la hipótesis de operación normal y fallos de operación mediante las reglas siguientes:

Sin información de relés:

fallaOISR(E, ID) :- pertenece(IJ, ID),
justificaSR(E, IJ),
diferencia(ID, IJ, INJ),
conteo(I NJ, 1).

fallaOISR(E, ID) :- pertenece(IJ, ID),
justificaSR(E, IJ),
diferencia(ID, IJ, INJ),
not(conteo(INJ, 1)),
aislados(INJ).

justificaSR(E, ID) :- fallaONSR(E, ID);
fallaFOSR(E, ID).

donde:

fallaOISR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo bajo la hipótesis de operación incorrecta.

justifica: Apuntador empleado para realizar el proceso de inferencia hasta fallos de operación.

conteo: Apuntador empleado para determinar si la lista contiene un único elemento.

aislados: Apuntador empleado para determinar si no existe en "INJ" un par de interruptores asociados a un mismo elemento.

Ejemplo: Operación incorrecta del Interruptor 8:

fallaOISR(b2, [i2, i4, i6, i8]).

Yes

- Con información de relés:
fallaOICR(E, ID, RD) :- pertenece(IJ, ID),
pertenece(RJ, RD),
justificaCR(E, IJ, RJ),

diferencia(ID,IJ,INJ),
diferencia(RD,RJ,RNJ),
conteo(INJ,1).
fallaOICR(E, ID, RD) :- pertenece(IJ,ID),
pertenece(RJ,RD),
justificaCR(E,IJ,RJ),
diferencia(ID,IJ,INJ),
diferencia(RD,RJ,RNJ),
not(conteo(INJ,1)),
aislados(INJ).
justificaCR(E, ID, RD) :- fallaONCR(E,ID,RD);
fallaFOCR(E,ID,RD).

donde:

fallaOICR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo con información de relés.

Ejemplo: Falla en la barra 2, Operación incorrecta en el Interruptor 8:

fallaOICR(b2, [i2, i4, i6, i8], ['87b2', '21142']).

Yes

Falla en la barra 2, Operación incorrecta en el relé '21154':

fallaOICR(b2, [i2, i4, i6, i8], ['87b2', '21142', '21154']).

Yes

No se justifica la falla en la barra 2 bajo la hipótesis de operación incorrecta pues los relés '21154' y '21145' están asociados a un mismo elemento:

fallaOICR(b2, [i2, i4, i6, i8, i7], ['87b2', '21142', '21154', '21145']).

No

Formulación de la hipótesis de fallas múltiples

Esta hipótesis se prueba cuándo las hipótesis para fallos simples no logra justificar la operación de todos los interruptores operados para formar el área total desconectada, o sea, no se cumplen las hipótesis de operación normal, fallos de operación y operación incorrecta, por lo que existe entonces la posibilidad de un segundo fallo que ocurre de forma simultánea. Para justificar esta hipótesis, se usan las siguientes reglas:

• Sin información de relés:

fallaFMSR(E, ID) :- pertenece(IJ,ID),
justificaSR(E,IJ),
diferencia(ID,IJ,INJ),
not(conteo(INJ,1)),
not(aislados(INJ)),!,
 analisisSR(X,INJ).

analisisSR(E, ID) :- fallaONSR(E,ID);
fallaFOCR(E,ID);
fallaOISR(E,ID);
fallaFMSR(E,ID).

donde:

fallaFMSR: Apuntador empleado para justificar una de las posibles secciones en fallo.

E: Elemento posible de la sección en fallo (obtenido de la lista de elementos estimados como posibles secciones en fallo).

ID: Lista de interruptores que dispararon.

analisis: Apuntador empleado para realizar todo el proceso de inferencia.

Ejemplo: Se justifican fallas en la barra 2 y en la línea 4-5 bajo la hipótesis de operación normal:

fallaFMSR(b2, [i2, i4, i5, i7, i8]).

Yes

fallaFMSR(145, [i2, i4, i5, i7, i8]).

Yes

Se justifican fallas en la línea 1-2 bajo la hipótesis de fallo de operación y en la línea 4-5 bajo la hipótesis de operación normal:

fallaFMSR(112, [i1, i4, i5, i7, i8]).

Yes

fallaFMSR(145, [i2, i4, i5, i7, i8]).

Yes

Se justifican fallas en la línea 1-2 y en la línea 4-5 bajo las hipótesis de operación normal y de operación incorrecta:

fallaFMSR(112, [i1, i2, i3, i7, i8]).

Yes

fallaFMSR(145, [i1, i2, i3, i7, i8]).

Yes

No se justifican fallas múltiples pues aunque se justifica falla para la línea 1-2 bajo la hipótesis de operación normal, los interruptores 3 y 8 no están relacionados a un mismo elemento y ambos se dispararon incorrectamente:

fallaFMSR(112, [i1, i2, i3, i8]).

No

• Con información de relés:

fallaFMCR(E,ID,RD) :- pertenece(IJ,ID),
pertenece(RJ,RD),
justificaCR(E,IJ,RJ),
diferencia(ID,IJ,INJ),
diferencia(RD,RJ,RNJ),
not(conteo(INJ,1)),
not(aislados(INJ)),!,
 analisisCR(X,INJ,RNJ).

analisisCR(E,ID,RD) :- fallaONCR(E,ID,RD);
fallaFOCR(E,ID,RD);
fallaOICR(E,ID,RD);
fallaFMCR(E,ID,RD).

donde:

fallaFMCR: Apuntador empleado para justificar la sección en fallo con información de relés.

E: Elemento posible de la sección en fallo.

RD: Lista de relés que operaron.

ID: Lista de interruptores que operaron.

Ejemplo: Se justifican fallas en las líneas 1-2 y 4-5 teniendo en cuenta la información de los relés operados:

fallaFMCR(112, [i1, i2, i7, i8], ['21112', '21121', '21145', '21154']).

Yes

fallaFMCR(145, [i1, i2, i7, i8], ['21112', '21121', '21145', '21154']).

Yes

Módulo que permite construir las bases de conocimientos

Las bases de conocimiento donde se almacena la información son:^{4,5}

- **Base de conocimiento 1:** Almacena los conocimientos acerca de la configuración de la red.
- **Base de conocimiento 2:** Almacena los conocimientos de los interruptores que protegen en forma primaria cada elemento, permite conocer los interruptores que deben operar como protección primaria cuándo se presenta un fallo en un elemento, sin indicar el tipo de protección que realiza esta función.
- **Base de conocimiento 3:** Almacena los conocimientos acerca de los interruptores de respaldo de cada elemento.
- **Base de conocimiento 4:** Almacena los conocimientos acerca de los relés primarios de cada elemento, estos son los relés que deben operar para abrir los interruptores primarios correspondientes a la sección en falla.
- **Base de conocimiento 5:** Almacena los conocimientos acerca de los relés de respaldo de cada elemento, estos son los relés que deben operar para abrir los interruptor de respaldo correspondientes a la sección en falla cuando los relés de protección primaria del elemento en fallo no operan por presentar problemas.

A continuación se expone, como ejemplo, las principales características de una de las bases de conocimiento, el resto de las bases de conocimiento están descritas en las referencias 4 y 5.

• **Base de conocimiento 1:** Configuración de la red. Esta base almacena el conocimiento acerca de la configuración de la red en forma de hechos, los cuales describen la interconexión entre los diferentes elementos del SEP a través de los interruptores, así como el estado de cada interruptor; este conjunto de hechos tiene la siguiente forma:

Red(N1, I, N2, Te, Est).

donde:

Red: Apuntador empleado para el almacenamiento de la información acerca de la configuración de la red en la base de conocimiento.

N1: Nodo 1 (por convenio este nodo siempre será una barra, pues todos los interruptores conectan siempre una barra con cualquier otro elemento del sistema).

I: Es el interruptor que conecta al nodo 1 con el nodo 2.

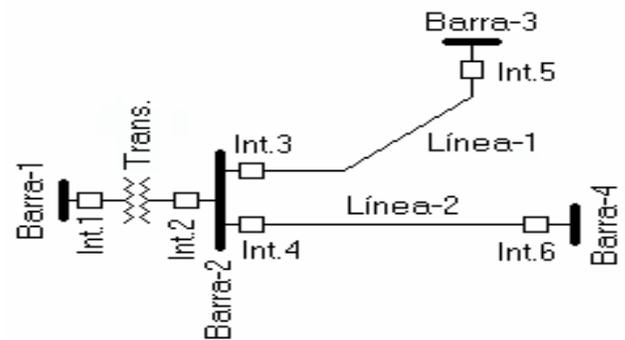
N2: Nodo 2 (este nodo puede ser cualquier elemento del sistema).

Te: Tipo de elemento del nodo 2, permite conocer qué tipo de elemento es el que se describe en N2.

Est: Estado en qué se encuentra el interruptor "I" (abierto o cerrado).

Por ejemplo:

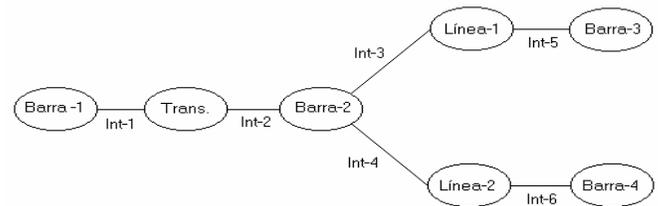
a) Representación de la red original (figura 2).



Esquema original de una red.

2

b) Representación por nodos y ramas (figura 3).



Representación de la red por nodos y ramas.

3

c) Representación en Prolog.

En programación lógica Prolog la red se representa mediante un conjunto de hechos que tienen la siguiente forma:

red (Barra-1, Int.1, Trans., Transformador, Cerrado).
 red (Barra-2, Int.2, Trans., Transformador, Cerrado).
 red (Barra-2, Int.3, Línea-1, Línea, Cerrado).
 red (Barra-2, Int.4, Línea-2, Línea, Cerrado).
 red (Barra-3, Int.5, Línea-1, Línea, Cerrado).
 red (Barra-4, Int.6, Línea-2, Línea, Cerrado).

Cada hecho es independiente, o sea, cuando un interruptor es abierto o cerrado solo cambia el hecho correspondiente a este interruptor. El hecho red (Barra-1, Int.1, Trans., Transformador, Cerrado) significa que el Int.1 está entre el nodo (Barra-1) y el nodo (trans.) y el interruptor (int.1) está cerrado o sea que la barra (Barra-1) está conectada al transformador mediante el interruptor (Int.1) y este interruptor está cerrado.

Como se puede observar la configuración de un SEP está dada por los elementos que lo integran y las

interconexiones que existen entre ellos. Los puntos de interconexión entre los diferentes elementos están representados por los interruptores, por tanto, la cantidad de hechos depende de la cantidad de interruptores que posea el SEP. Aquí no importa el tamaño ni la configuración de la red; además, la nomenclatura para la identificación de los diferentes, interruptores y relés puede ser cualquiera, pero tiene que ser adecuada de forma tal que cada parte del sistema sea identificada sin que haya confusiones.

En este trabajo, para las pruebas realizadas se han utilizado las nomenclaturas vigentes en Cuba para la identificación de las líneas e interruptores, pero para las barras y subestaciones se ha empleado una nomenclatura que consta de cuatro dígitos como máximo.

En esta base de conocimientos se almacena la configuración de la red, la cual guarda estrecha relación con las restantes bases de conocimiento que dependen de esta. Además, esta opción de creación o modificación de las bases de conocimiento brinda las posibilidades de adicionar, eliminar y modificar la información que se desee, de una forma fácil. Todo esto se hace por medio del **editor gráfico**.⁶

CONCLUSIONES

Con la finalidad de determinar la capacidad de deducción del sistema de diagnóstico (SDEF) ante diversas situaciones reales, y como es lógico probar las diferentes reglas programadas en Prolog antes descritas, se efectuaron distintas pruebas de casos de operación real de las protecciones de la red de transmisión 110/220 kV del territorio central de Cuba.^{1,4,5}

- El sistema realiza inferencias lógicas para estimar los posibles lugares de falla, usando el mecanismo de inferencia del Prolog, lo cual permite una búsqueda exhaustiva de todas las posibles secciones en fallo de una forma sencilla y fácil; además busca una explicación que justifique la formación del área total desconectada.
- Las bases de conocimiento se configuran mediante un ambiente creado en el **editor gráfico**, lo cual permite todas las facilidades al usuario para la modificación, eliminación, adición, búsqueda, etc., acerca de la configuración del sistema eléctrico de potencia y de los esquemas de los relés de protección.
- El proceso de estimación determina un conjunto de secciones del SEP, donde pudo ocurrir el fallo a partir de los relés e interruptores que operaron. Esto lleva un conjunto de procesos de intersección, hallando las secciones que se encuentran en el área de intersección de las zonas de protección de los interruptores y relés operados.
- Se logró construir un conjunto de reglas que usando la información de los relés en el proceso de inferencia, diagnostica de forma más precisa la sección en fallo y se trataron los casos de respaldo y de solapamiento.

REFERENCIAS

1. **Bravo, M. et al.:** "Sistema de diagnóstico para la estimación de secciones en fallo en sistemas eléctricos de potencia", *Revista Ingeniería Energética*, Vol. XXVII, No. 2-3, Cujae, Ciudad de La Habana, 2006.
2. **Kruglinski, D. J.:** *Inside Visual C++*, McGraw-Hill, 1995.
3. **Winston, P. H.:** *Prolog Programming for Artificial Intelligence*, pp. 1-65, Massachusetts, January, 1986.
4. **Bravo, M.:** *Informe final de proyecto de investigación, Proyecto CITMA Territorial*, Código No. 0302 Sistema de diagnóstico para la estimación de secciones en fallo (SDEF) en sistemas eléctricos de potencia, diciembre, 2005.
5. "Sistema de diagnóstico para la estimación de secciones en fallo (SDEF) en sistemas eléctricos de potencia, Tesis para optar por el Título Académico de Maestro en Ingeniería Eléctrica, Especialidad Sistemas Eléctricos, enero, 2000.
6. **Álvarez, A.; M. Bravo y Z. García:** *Editor de sistemas eléctricos de potencia*, Memorias Evento FIE '2002 (Formato Electrónico), Santiago de Cuba, julio, 2002.

AUTORES

Marta Bravo de las Casas

Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central de Las Villas, Marta Abréu, Villa Clara, Cuba
e-mail: mbravo@uclv.edu.cu

Humberto Machado Fernández

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Organización Básica Eléctrica, Villa Clara, Cuba

Zenaida García Valdivia

Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Centro de Estudios Informáticos, Universidad Central de Las Villas, Marta Abréu, Villa Clara, Cuba
e-mail: zgarcia@uclv.edu.cu

Alain Álvarez Chávez

Licenciado en Ciencias de la Computación, Centro de Estudios Informáticos, Universidad Central de Las Villas, Marta Abréu, Villa Clara, Cuba
e-mail: alin@uclv.edu.cu

Isis Bonet Cruz

Licenciada en Ciencias de la Computación, Máster en Ciencias de la Computación, Centro de Estudios Informáticos, Universidad Central de Las Villas, Marta Abréu, Villa Clara, Cuba
e-mail: isisb@uclv.edu.cu

Norma E. Cabrera González

Licenciada en Ciencias de la Computación, Centro de Estudios Informáticos, Universidad Central de Las Villas, Marta Abréu, Villa Clara, Cuba
e-mail: normacg@uclv.edu.cu