

**DESIGN OF AN INTELLIGENT SYSTEM OF PROTECTION FOR MOTORS
APPLYING THE LOGIC DIFFUSE.****DISEÑO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE PROTECCION DE MOTORES
APLICANDO LA LOGICA DIFUSA.****Msc. Juan Carlos Morales Fernández, Ing. Alfredo Carbonell Mendoza**

*Universidad de Camaguey
Dpto. Ingeniería Eléctrica
Carretera Circunvalación Norte km. 5 ½
jmorales@em.reduc.edu.cu, carbonell@em.reduc.edu.cu
Camaguey. Cuba*

Abstract: The system values the abnormal situations of work and makes a decision choosing among three possible alternatives: · Shot of the relé · Alarm. · Blocking the relé The method used to create this system consists on the formulation of rules of the Diffuse Logic. The antecedent of these rules contains the comparison operation among the mensuration of each flaw indicator and the relé shot conditions expressed by means of diffuse groups with adjusted membership according to the experience of the experts. The final conversion to the conventional logic is carried out by means of the NOT operation of threshold. .

Resumen: El sistema valora las situaciones anormales de trabajo y toma una decisión escogiendo entre tres alternativas posibles: disparo del relé, alarma, loqueo del relé El método utilizado para crear este sistema consiste en la formulación de reglas de implicación de la Lógica Difusa. El antecedente de dichas reglas contiene la operación de comparación entre la medición de cada indicador de falla y las condiciones de disparo del relé expresadas mediante conjuntos difusos con membresía ajustada según la experiencia de expertos. La conversión final a la lógica convencional se realiza mediante la operación NOT de umbral. .

Keywords: Protección de motores, lógica difusa, base de reglas, sistema de inferencia difuso, motores asincrónicos trifásicos.

1. INTRODUCCIÓN

La protección de motores es de primordial importancia debido al papel que estos desempeñan en la industria y al monto de pérdidas económicas que se producirían si alguno de estos motores,

debido a una protección deficiente, se dañara irremediablemente.

Las fallas más frecuentes que se presentan en los motores durante su régimen de trabajo se deben a problemas inducidos por: la carga, la fuente de suministro de energía, por el propio motor, el

medio ambiente, así como a otras causas. Históricamente las protecciones se han desarrollado para solucionar estos problemas de manera aislada, obteniéndose diferentes dispositivos contra: bajo voltaje, sobrecorriente, cortocircuito, fallas a tierra, desbalance de fases, sobrevoltaje, sobretensión, aislamiento defectuoso, fallas internas, arranques repetidos y otros.

El Sistema Universal de Protección contiene todas las protecciones anteriormente mencionadas como opciones a seleccionar por el usuario permitiendo además introducir la alarma en casos necesarios.

La protección de cada motor depende de las exigencias a su régimen de trabajo, lo que implica una selección de magnitudes a utilizar como indicadores de fallas, así como sus niveles, que siempre se expresan en forma de un rango aproximado de valores, dados por la experiencia práctica de la explotación tanto de motores como de líneas de distribución. La imprecisión de dichos rangos dificulta grandemente el proceso de ajuste de las protecciones, así como su reajuste en diferentes combinaciones, sobre todo para regímenes variables de trabajo.

Nuestro objetivo es eliminar las dificultades descritas mediante la aplicación de la Lógica Difusa, que es una herramienta matemática desarrollada específicamente para manipular los datos imprecisos basados en la experiencia laboral de los profesionales en la materia.

2. DESARROLLO

Para desarrollar este sistema, la Lógica Difusa puede aplicarse de dos modos o enfoques diferentes:

Enfoque 1. Los resultados de las mediciones se consideran números exactos, mientras que las condiciones que activan la protección se representan mediante Conjuntos Difusos.

Enfoque 2. Los resultados de las mediciones se consideran números difusos, Mientras que los límites de funcionamiento normal son tratados como curvas exactas.

Aquí se aplica el Enfoque 1, donde el formato básico para las condiciones que activan la protección es:

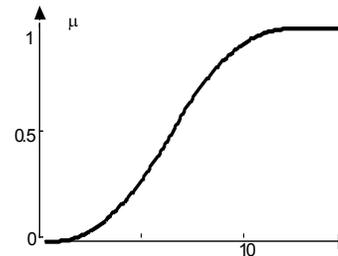
Magnitud medida \otimes L, donde:

- \otimes es uno de los operadores =, >, >=, <, <=;

L es un límite con expresión no precisa, por ejemplo: de 1.2 a 10. Si consideramos el atributo

del Conjunto Difuso como la magnitud medida, podemos plantear por medio de la función de membresía un enunciado lógico, por ejemplo, la condición "Corriente de fase es mayor que 10 A". Ver figura 1.

Los títulos de cada sección deben estar centrados, en letra mayúscula, numerados en forma consecutiva a partir de la introducción, pero sin incluir los reconocimientos, referencias y apéndices (para explicar detalles del desarrollo).



a) Fig.1 Condición "corriente de fase mayor que 10 A"

- b) Las reglas de implicación que definen el funcionamiento de cada una de las protecciones implementadas en el Sistema Universal son las siguientes:

2.1. Selección de los criterios de protección.

Usualmente ocurre que los motores asincrónicos de gran potencia son desconectados básicamente por dos causas: calentamiento excesivo de los enrollados del motor y valores elevados de corrientes producidos por cortocircuitos o por bloqueo del rotor; operaciones que se realizan mediante protectores térmicos y cualquier tipo de protección contra cortocircuitos.

Para cada una de estas protecciones hemos seleccionado las variables que influyen directamente en el comportamiento de cada de forma tal que después de un proceso de agregación multicriterial el sistema pueda tomar una decisión: bloqueo, alarma o disparo del relé.

En el caso específico de la protección contra sobre-temperatura o calentamiento excesivo del motor se seleccionaron los siguientes criterios de protección:

- sobrecarga sostenida que incluye los valores de la corriente en las fases y el tiempo de duración de la

misma.

- estado térmico propio del motor.
- estado de la resistencia de aislamiento.
- tiempo transcurrido desde el último arranque del motor.

El relé de protección debe desconectar el motor si:

Criterio C1

El valor de la corriente de fase I es igual o mayor que $(1.1 \div 2) \cdot I_{pc}$

Donde: I_{pc} es la corriente a plena carga.

Mediante tres unidades idénticas de medición una por cada fase este criterio se verifica para las tres fases del motor.

Criterio C2

Si el tiempo de duración de la falla (T_d), es mayor que el tiempo de operación permisible (T_{op}), calculado a partir del tipo de curva de tiempo inverso seleccionada.

Criterio C3

La resistencia de aislamiento (R_{aisl}) de los enrollados del estator del motor es menor que un valor límite permisible ajustable por el usuario (R_{perm}).

Criterio C4

El estado térmico del motor (T°) (información obtenida de las protecciones inherentes o el valor promedio de temperatura en diferentes partes del motor) es mayor que un valor predeterminado T_{lim}

Criterio C5

El tiempo transcurrido desde el último arranque del motor (T_{arr}) es menor que 2 horas.

Para el caso de la protección contra sobrecorriente la selección de los criterios de protección es similar.

Cada uno de estos criterios obtenidos a la salida del bloque de medición y conversión de señales se introducen para su posterior procesamiento en el Sistema Inteligente de Protección.

El método utilizado consiste en la operación de comparación entre el resultado de la medición de cada indicador de falla y las condiciones de disparo del relé expresadas mediante conjuntos difusos con membresía ajustada según la experiencia práctica de expertos.

De esta forma, transformamos valores numéricos concretos en grados de membresía que reflejan para cada criterio el permiso de disparo de la protección.

La conversión final a la lógica convencional para operar la protección se realiza mediante la operación NOT de umbral.

2.2. Fuzificación de las entradas.

Cada uno de los criterios de protección obtenidos a la salida del bloque de medición y configuración de criterios es evaluado en una función no lineal representada por el conjunto difuso que caracteriza la condición de disparo de la protección, por lo que el criterio C_k se transforma en una señal continua μ_k .

La señal μ_k que es el grado de membresía de ese criterio representa el nivel de permiso de disparo de la protección inducido por el criterio C_k . El tipo de curva de cada uno de los conjuntos difusos se escoge según la opinión y experiencia práctica de expertos y reflejan el carácter no lineal de este proceso.

La membresía resultante de los criterios C1 y C2 se obtiene a partir de la regla de implicación siguiente:

IF [$I > k_1 \times I_{pc}$ **AND** (tiempo $\geq T_{op}$)] **THEN** (señal de desconexión)

Donde k_1 Coeficiente de valor ajustable entre 1.05 y 1.25.

Definiendo el conectivo AND según Zadeh, obtenemos la membresía resultante del antecedente:

$$\mu_{12} = \min(\mu_1, \mu_2)$$

Este criterio debe ser capaz de provocar la desconexión del motor antes que los niveles de corriente provoquen que se alcance la curva de calentamiento permisible del mismo. El valor mínimo de la corriente de disparo se puede ajustar también en dependencia del valor de la corriente máxima de carga y el factor de servicio del motor.

$$I_{min} = I_{cmax} \times F.S$$

Las curvas de tiempo inverso de la protección se determinan por la fórmula:

$$T_{op} = \frac{A \times Pt}{M^n - C} + B \times Pt + k \quad (2.4)$$

Donde:

A, B, C, n, k-coeficientes dependientes del tipo de curva.

M- múltiplo de la corriente nominal del motor.

Pt –Palanca de tiempo. Puede tomar valores desde 0.5 hasta 10.

Los enunciados lógicos del antecedente ($k_1 \times I_{pc}$ y T_{op}) se expresan mediante los conjuntos difusos, mostrados en las figuras 2 y 3.

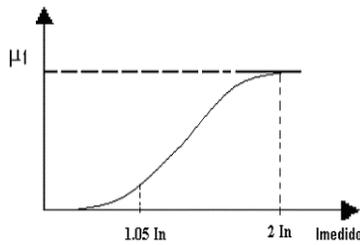


Fig. 2 Límite difuso de la corriente.

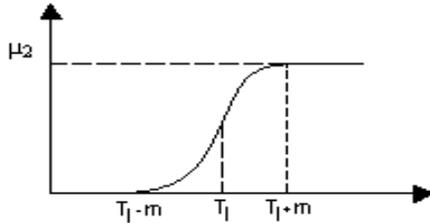


Fig. 3 Límite difuso del tiempo

El grado de membresía μ_4 del criterio C4 se obtiene por la regla de implicación siguiente:

IF [$T^o \geq T_{lim}$] **THEN** (señal de desconexión).

Se toman muestras periódicamente de señales provenientes de sensores de temperatura situados en diferentes partes del motor (estator, rotor, cojinetes) y se toma un promedio de las mismas. Para el envío de señales de alarma ó desconexión se tienen en cuenta la temperatura del medio ambiente, la temperatura para mínima carga y otros factores como la clase de aislamiento etc.

Las reglas de implicación que definen el comportamiento del criterio C3 son:

Si la resistencia de aislamiento R_{aisl} es mayor que un valor límite L_4 el grado de membresía correspondiente μ_3 es menor que 0.5 y decrece rápidamente con el aumento de la resistencia lo que implica bloqueo del relé.

Si R_{aisl} toma valores entre los límites L_4 y L_3 entonces el grado de membresía correspondiente es 0.5 y se envía señal de alarma.

Si R_{aisl} es menor que L_3 los valores de membresía se acercan a 1 enviando señales de disparo de la protección. Ver figura 4

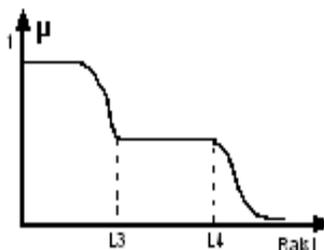


Fig.4 Conjunto difuso “estado de la resistencia de aislamiento”.

Se mide la resistencia de aislamiento R_{AISL} periódicamente, mediante el método de alta frecuencia, la frecuencia de muestreo se toma entre $1500 \div 2000$ Hz, con un período ajustable por el usuario. Las reglas de implicación que controlan al relé son las siguientes:

Las reglas de implicación difusa que describen el funcionamiento de la protección son:

1. **IF** ($L_3 \leq R_{AISL} \leq L_4$) **THEN** (alarma).

2. **IF** ($R_{AISL} < L_3$) **THEN** (señal de desconexión).

IF (aislamiento esta defectuoso) **THEN** (señal de desconexión).

Para el criterio de protección C5 se utilizó un conjunto difuso cuya curva polinomial tipo Z se describe por la ecuación:

$$y = zmf(x, [x1, x0]), x1 < x0.$$

En este conjunto difuso el grado de membresía μ_5 es menor que 0.5 para intervalos de tiempo entre conexiones mayores que 2 horas. Ver figura 5

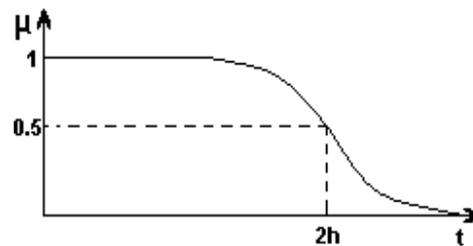


Fig.5 Conjunto difuso “Tiempo entre conexiones del motor”

La señal emitida al pulsar el botón de arranque activa el siguiente algoritmo:

- Inicializa la protección contra el aislamiento defectuoso, determinando μ_3
- Determina la membresía μ_5 del concepto: “pasó X tiempo desde la última desconexión del motor”.

La regla de implicación difusa correspondiente es:
IF ($\mu_3 > 0.5$) **OR** ($T_{arr} < 2h$) **THEN** (señal de desconexión)

2.3. Selección de los pesos.

Para cada una de las salidas de los criterios de protección se escoge un coeficiente o peso determinado (P) en dependencia del grado de implicación de forma tal que la suma de todos sea:
 $p12 + p3 + p4 + p5 = 1$

La membresía de salida que integra todos los factores que influyen sobre la protección contra sobretensión se determina mediante el método de agregación multicriterial.

$$\mu_{s1} = \mu_{12} p_{12} + \mu_3 p_3 + \mu_4 p_4 + \mu_5 p_5$$

De forma similar se implementan la protección contra sobre - corriente y cualquier otro de tipo de protección que el usuario desee habilitar.

2.4.- Toma de decisión.

Aplicando la operación de unión de los conjuntos difusos (OR de Zadeh.) a los valores de membresía de cada una de las salidas de las protecciones, se obtiene la señal μ_R que define el comportamiento del relé.

$$\mu_R = \max(\mu_{s1}, \mu_{s2})$$

El valor de membresía de salida μ_R se transfiere a la entrada del bloque NOT de Umbral, el cual realiza la función de comparación de μ_R con un valor de frontera de disparo predefinido por el usuario λ .

IF ($\mu_R \geq \lambda$) THEN (se envía señal de desconexión del motor.)

El esquema en bloques del sistema inteligente de protecciones está representado en la figura 6

Todas las operaciones lógicas son realizadas en el sistema de la lógica difusa. Solamente a la salida del esquema se realiza la conversión necesaria a la lógica Booleana.

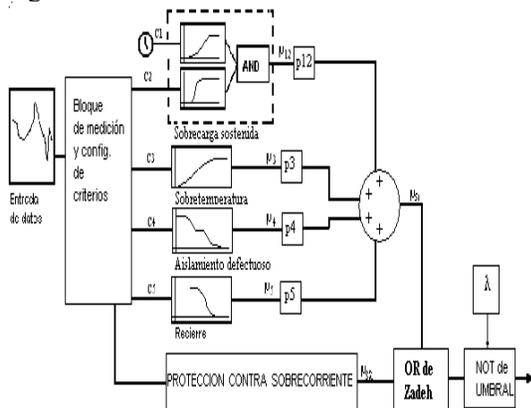


Fig.6 Esquema en bloques simplificado del sistema inteligente de protección de motores.

El modelo utilizado para la simulación del sistema y el paquete de programas diseñado se muestran en los Anexos 1 y 2 respectivamente.

2.5. Autoajuste del relé.

Los valores de los criterios de protección de C1 a C5, correspondientes a los grados de membresía μ_{12} , μ_3 , μ_4 y μ_5 , los pesos p_{12} , p_3 , p_4 y p_5 y el valor de frontera de disparo λ son auto - ajustables y pueden ser establecidos antes de la instalación del relé.

3.- SIMULACIONES. RESULTADOS Y ANALISIS.

Al modelo obtenido se le realizaron un total de 20 simulaciones con diferentes valores de las variables de entrada con el objetivo de obtener las curvas de disparo del relé inteligente para dos temperaturas.

Tabla 1. Resultados de las simulaciones.

I_{pc} .20A I/I_{pc}	Tiempo de disparo	
	Temp. 120 ⁰	Temp. 180 ⁰
1.05	∞	∞
1.1	15	14
1.15	14.8	13.2
1.2	14.4	12.68
1.25	14	12.28
1.375	13.2	11.6
1.5	12.8	11.1
1.6	12.4	10.8
1.7	12.2	10.4
1.8	12	10.4
1.9	11.8	10
2	11.6	10
3	10.8	9.2
4	10.4	9.1
5	10	8.68
6	9.6	8.4
8	9.6	8.4
9	9.2	8.28
10	9.2	8.28

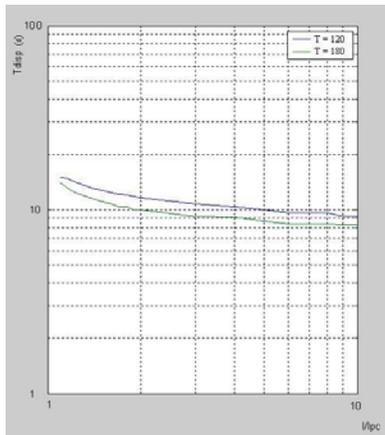


Fig. 7 Curvas de disparo del relé difuso.

3.1. Resultados.

- Los resultados de las simulaciones muestran que el relé comienza a disparar a partir de valores de corriente de $1.1 I_{pc}$ para ambas temperaturas.
- El incremento de la temperatura promedio del motor conlleva a una disminución de aproximadamente 15% del tiempo de disparo para valores de corriente de $1.12 \div 3 I_{pc}$.
- Para valores de $I > 3 I_{pc}$ la pendiente de la curva para $T=120^{\circ}$ se hace mayor acercándose a los valores de la curva para $T=180^{\circ}$.
- Ambas curvas se corresponden con el tipo de curva de tiempo largo lo que se ajusta al tipo de motor.

4.- CONCLUSIONES

La protección de un motor necesita de la selección de indicadores de fallas, cuyos niveles se expresan en forma de un rango de valores aproximados determinados en el transcurso de la experiencia práctica de la explotación. La imprecisión de dichos rangos dificulta tanto el proceso de ajuste de las protecciones, como su combinación. En este trabajo hemos logrado eliminar dichas dificultades mediante la aplicación de la Lógica Difusa, que es una herramienta matemática desarrollada específicamente para manipular datos imprecisos del tipo descrito.

La trayectoria histórica de las protecciones por vía de la búsqueda de soluciones de manera aislada, conllevó al establecimiento de una lista de protecciones universalmente aceptadas. El Sistema Universal de Protección, diseñado en el presente trabajo, contiene todas sus componentes como opciones a seleccionar por el usuario, permitiendo además introducir la alarma en casos necesarios.

REFERENCIAS.

- Corrales L., "Protección de máquinas eléctricas". Monografía. Universidad de Camagüey. 2000.
- Dubois D., "Fuzzy Numbers: An Overview", Analysis of fuzzy Information, CRC Press, Boca Raton, 1987
- Fan J., "Some notes on similarity measure and proximity measure", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 101, 1998, pp 403-412.
- Kaufmann A., "Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications", New York: Van Nostrand Reinold Company Ltd., 1985.
- Mamdani E. H., "Fuzzy Reasoning and its Applications", New York: North-Holland, 1985.
- Zadeh L. A., "Fuzzy sets as the basis for Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems, 1, 1978, pp 3-28.