

46  
25

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



Facultad de Ingeniería

## Selección de la Protección Diferencial para un Transformador de Potencia de 12-16 MVA, 115-13.8 KV, Trifásico

### TESIS

Que para Obtener el Título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
PRESENTAN

Luis Enrique Díaz Espeleta  
Luis Antonio Cruz Ramírez  
Perfecto Gerardo Sánchez Méndez

Director: Ing. Luis López Ortíz

México, D. F., 1987



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## TABLA DE CONTENIDO.

|       | Página.  |
|-------|--|
| 1.    | ANTECEDENTES ..... 1   |
| 1.1   | PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES<br>DE POTENCIA. .... 2   |
| 1.2   | FALLAS EN LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL<br>TRANSFORMADOR ..... 2                                 |
| 1.2.1 | Aceite del Transformador ..... 2   |
| 1.2.2 | Cámara de Gas ..... 2  |
| 1.2.3 | Bombas del Aceite y Ventiladores ..... 3   |
| 1.2.4 | Aislamiento del Núcleo y de los Devanados ... 4  |
| 1.3   | FALLAS EN LOS DEVANADOS ..... 5  |
| 1.4   | SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS EXTERNOS ..... 6  |
| 2.    | CONEXIONES Y OPERACION DE LOS TRANSFORMADORES<br>DE CORRIENTE Y DEL RELEVADOR DIFERENCIAL .... 8 |
| 2.1   | OPERACION DE LA PROTECCION DIFERENCIAL ..... 15  |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.2   | CORRIENTES DE FALLA EXTERNA .....   | 17 |
| 2.3   | CORRIENTE DE FALLA INTERNA .....  | 20 |
| 2.4   | CORRIENTE DE MAGNETIZACION .....  | 21 |
| 3.    | CARACTERISTICAS DE LOS RELEVADORES<br>DIFERENCIALES .....   | 24 |
| 4.    | SELECCION DE LOS TRANSFORMADORES DE<br>CORRIENTE .....  | 40 |
| 4.1   | CONSIDERACIONES .....   | 40 |
| 4.1.1 | Elección del Nivel de Aislamiento y Tipo de<br>Construcción del Transformador de<br>Corriente ..... | 41 |
| 4.1.2 | Elección de la Relación de Transformación<br>Nominal .....  | 41 |
| 4.1.3 | Elección de la Clase de Precisión .....   | 42 |
| 4.1.4 | Determinación del Cálculo del Burden .....  | 43 |
| 4.1.5 | Adopción del Índice de Sobrecarga .....   | 46 |
| 4.1.6 | Selección del Número de Núcleos del<br>Transformador de Corriente .....                             | 46 |
| 4.2   | ERROR EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMA-<br>DORES DE CORRIENTE .....                           | 47 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3   | MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ERROR EN LA RELACION DE TRANSFORMACION .....                               | 49 |
| 4.3.1 | Método Algebraico o de la Curva de Saturación del Transformador de Corriente .....                    | 49 |
| 4.3.2 | Método Utilizando las Curvas de Factor de Corrección de las Relaciones de Transformación .....        | 51 |
| 4.3.3 | Método que Utiliza la Clasificación "C" ANSI de los Transformadores de Corriente ....                 | 51 |
| 4.4   | CALCULOS PARA LA SELECCION DE LA RELACION DE TRANSFORMACION DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE ..... | 54 |
| 5.    | SELECCION DEL RELEVADOR DIFERENCIAL .....   | 56 |
| 5.1   | REGLAS BASICAS .....  | 56 |
| 5.2   | REFIRIENDOSE A ESPECIFICACIONES GENERALES ...   | 56 |
| 5.3   | REQUERIMIENTOS AMBIENTALES .....  | 57 |
| 5.4   | RANGO DE TEMPERATURAS .....   | 58 |
| 5.5   | CARACTERISTICAS ELECTRICAS .....  | 59 |
| 5.6   | EFFECTOS DE INTERFERENCIA MAGNETICA .....   | 59 |
| 5.7   | EVALUACION DE UNA BUENA SUPERFICIE DE CONTACTO .....  | 60 |
| 5.8   | Selección del Relevador .....   | 61 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 5.8.1   | Requisitos .....                         | 63 |
| 5.8.2   | Cómo Seleccionar el Relevador .....      | 65 |
| 5.8.2.1 | Tipo CA .....                            | 66 |
| 5.8.2.2 | Tipo ITE - 87T .....                     | 67 |
| 5.8.2.3 | Tipo HU Y BDD15B .....                   | 67 |
| 6.      | CALIBRACIONES Y AJUSTES .....            | 70 |
| 6.1     | PROCEDIMIENTO DE CALCULO .....           | 73 |
| 6.2     | COMENTARIOS A MANERA DE CONCLUSION ..... | 81 |
| 7.      | CONCLUSIONES .....                       | 82 |
|         | BIBLIOGRAFIA .....                       | 86 |
|         | ANEXO 1. SIMBOLOGIA .....                | 88 |

## I. ANTECEDENTES

En un sistema eléctrico de potencia, los equipos más importantes económica y funcionalmente son los generadores, los motores y los transformadores.

Si bien es cierto que éstos equipos tienen una incidencia de fallas menor que la líneas de transmisión, debe tenerse presente que cuando cualquiera de estos dos elementos sufre algún desperfecto, generalmente se requiere mucho más tiempo y dinero para repararlos que en el caso de las líneas de transmisión.

Sin embargo, si la falla es detectada y aislada con prontitud se reducen significativamente sus efectos dañinos tanto para el sistema como para el usuario, ya que existen centros de consumo que requieren en todo momento de un buen suministro de energía eléctrica, los cuales sufren cuantiosas pérdidas en caso de falla en el sistema, entendiéndose por esto último desde una ligera inestabilidad hasta una interrupción total del servicio.

## 1.1 PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Los transformadores de potencia siendo estáticos, totalmente cerrados y sumergidos en un medio refrigerante presentan fallas con menor frecuencia, pero sus consecuencias pueden ser graves si no se desconectan rápidamente del sistema. Las fallas se pueden dividir en tres categorías:

### 1.2 FALLAS EN LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR

Para prevenir las fallas en los devanados del transformador es necesario detectar primero las fallas que ocurren en los elementos que lo constituyen. Algunos de los más importantes son los siguientes:

1.2.1 Aceite del Transformador. El bajo nivel del aceite es una situación peligrosa en el transformador, debido a que las partes vivas y las terminales que van a las boquillas de conexión y que deben estar sumergidas en él, quedan descubiertas si éste baja más allá de un nivel específico. Existen indicadores del nivel del aceite con contactos de alarma que señalan cuándo se requiere atención inmediata.

1.2.2 Cámara de Gas. El deterioro del aceite del transformador y del aislamiento se minimizan si en el

espacio de gas disminuimos el nivel de oxígeno y el de la humedad. Debido a que varía mucho la presión normal de trabajo dentro del tanque, no siempre se recomienda sellarlo. En un tanque sellado puede usarse un manómetro de presión y vacío para que proporcione un indicador de la presión que hay en éste. Sobre el tanque principal se monta un tanque conservador para absorber las dilataciones y contracciones del aceite. En ocasiones, se conecta un cilindro de nitrógeno al espacio del gas para mantener la presión entre 0.5 y 0.8 atmósferas. Esta disposición mantiene una atmósfera inerte a pesar de las pequeñas fugas y proporciona una indicación sobre la presencia de las mismas, por la rapidez con que se agota el nitrógeno del cilindro. Pueden colocarse contactos de alarma en el sistema para indicar la presión en el interior del tanque, de manera que suene cuando ésta se encuentre arriba o por debajo de ciertos límites predeterminados.

1.2.3 Bombas del Aceite y Ventiladores. La temperatura interna del aceite es normalmente un indicador de la carga del transformador.

El incremento de la temperatura del aceite puede ser un indicador de sobrecarga y puede deberse a una falla en el sistema de enfriamiento; por ejemplo: A la falla de la

bomba del aceite, al bloqueo de una válvula del radiador o al paro de los ventiladores. Un termómetro con contactos de alarma, puede indicar la elevación de temperatura del aceite debida a cualquiera de estas causas. Es común usar un indicador de flujo del aceite para tener un registro de la operación correcta de las bombas.

1.2.4 Aislamiento del Núcleo y de los Devanados. Inicialmente pueden presentarse fallas incipientes que pueden crecer y ocasionar fallas mayores si no se les atiende en sus etapas iniciales. Las fallas en el aislamiento pueden presentarse por las siguientes causas:

1.2.4.1 El aislamiento de las piezas laminadas y de los pernos del núcleo pueden ser de baja calidad o haberse dañado accidentalmente durante el armado del transformador.

1.2.4.2 El aislamiento entre los devanados, entre el devanado y el núcleo y entre los conductores, puede ser de baja calidad; se puede haber dañado mecánicamente, o bien vuelto quebradizo por envejecimiento o sobrecarga.

1.2.4.3 Las juntas o conexiones pueden estar mal hechas. No es necesario atender de inmediato éstas fallas incipientes y como tales no ocasionan interrupciones al

sistema de suministro, pero deben atenderse en cuanto sea posible.

### 1.3 FALLAS EN LOS DEVANADOS

Las fallas eléctricas que ocasionan graves daños, pueden detectarse por desbalance de corrientes o de voltajes. Estas se pueden dividir en:

1.3.1 Fallas entre bobinas adyacentes, tales como las fallas de fase a fase en las terminales externas de alta tensión y baja tensión, en los devanados mismos o en los devanados a tierra.

1.3.2 Fallas a tierra o entre devanados completos, tales como las fallas de fase a tierra en las terminales externas de alta tensión y baja tensión o de los devanados a tierra.

Un corto circuito entre bobinas puede iniciarse debido a una ruptura de alguna de ellas ocasionada por una fuerza mecánica, al deterioro del aislamiento, a una sobrecarga excesiva, a una conexión floja o por un voltaje de impulso. Esta última causa abre una trayectoria de destrucción a través de la cual el voltaje a frecuencia normal puede mantener un arco. Sin embargo, si el voltaje entre las bobinas no es suficiente para mantener el arco, el aceite se encargará de extinguirlo.

Las fallas a tierra producen grandes corrientes de falla y la emisión de enormes cantidades de gas debidas a la descomposición del aceite. Este tipo de fallas no son difíciles de detectar, pero es de vital importancia aislarlas rápidamente pues de lo contrario el equipo restante podría llegar a sufrir un daño considerable y además la estabilidad de sistema podría resultar afectada.

#### 1.4 SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS EXTERNOS

Las sobrecargas pueden sostenerse por periodos largos y están limitadas únicamente por la elevación de temperatura permitida en los devanados y en el medio de enfriamiento. Si la sobrecarga es excesiva, se puede deteriorar el aislamiento debido a los esfuerzos dieléctricos en el material aislante pudiendo producirse además otras fallas subconsecuentes.

Se acostumbra a medir continuamente la temperatura en los devanados y en el aceite, haciendo que opere una alarma cuando se sobrepasan los límites permitidos. Los cortocircuitos externos sólo pueden limitarse por medio de una reactancia conectada a tierra a través del neutro del transformador.

Para transformadores de potencia con capacidades mayores a los 5 MVA, las normas recomiendan usar relevadores diferenciales para la protección contra fallas internas, la cual se encarga de mandar una señal de apertura a los interruptores para poder aislar al elemento fallado del resto del sistema.

Los interruptores deben tener la capacidad suficiente para que puedan conducir momentáneamente la corriente máxima de cortocircuito o soportar el recierre de una falla e interrumpirla de acuerdo a ciertas normas.

## 2. CONEXIONES Y OPERACION DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DEL RELEVADOR DIFERENCIAL

Este capítulo describe la forma de conectar los transformadores de corriente y el relevador diferencial para proteger un transformador de potencia; después se describe la operación de un relevador diferencial cuando ya esté conectado.

Los relevadores diferenciales tienen una gran variedad de formas de conexión que dependerán del equipo que estén protegiendo. Funcionan en virtud de la corriente que proporcionan los transformadores de corriente conectados al elemento del sistema, en este caso se trata de un transformador de potencia.

A grandes rasgos, la corriente del relevador diferencial será proporcional a la diferencia entre las corrientes que entran y salen del elemento protegido, si la corriente diferencial excede el valor de ajuste del relevador, éste funcionará. Esto se analizará con más detalle en la operación del relevador diferencial.

La conexión del relevador y de los transformadores de corriente para un transformador de potencia, se hará tomando en cuenta la clase de conexión que éste tenga. Para nuestro caso se trata de una conexión delta-estrella.

Las relaciones de transformación y el tipo de conexión de los transformadores de corriente en ambos lados del transformador de potencia, debe ser tal que permita la compensación del cambio de la magnitud y el ángulo de fase entre las corrientes que circulan por el transformador de potencia. Una regla usual es que los transformadores de corriente en los devanados en estrella de un transformador de potencia deberán conectarse en delta y para los devanados en delta deberán estar en estrella.

El problema siguiente será entonces cómo hacer las conexiones requeridas entre los transformadores de corriente y el relevador diferencial.

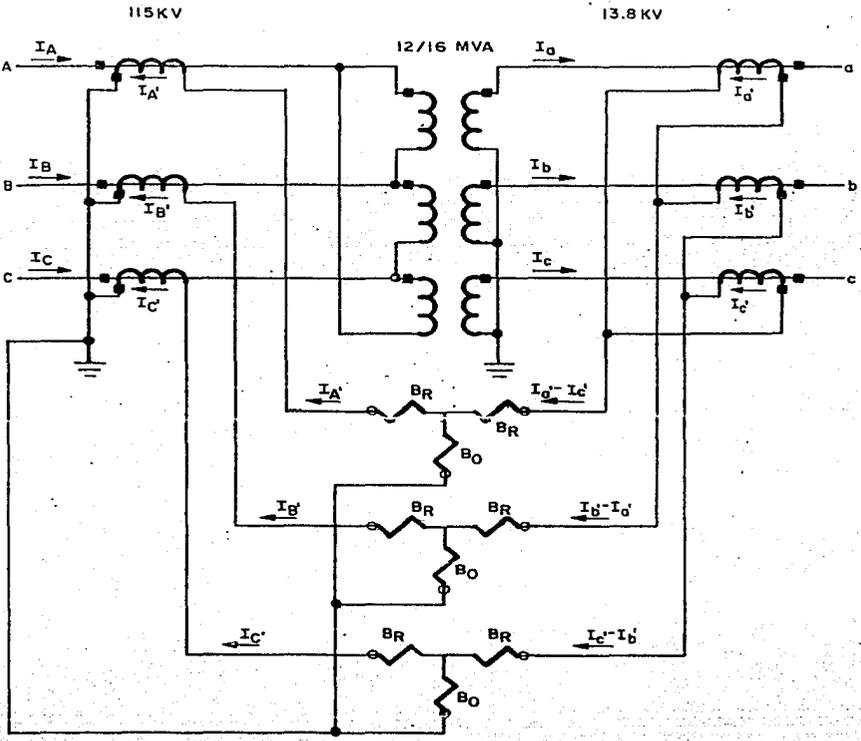
Dos puntos básicos que debe satisfacer la operación del relevador diferencial son: No debe funcionar para carga normal y además debe funcionar para fallas internas bastante severas.

El procedimiento para la conexión apropiada consiste en hacer primero que éstas satisfagan el requisito de no

operación durante fallas externas. Después, las conexiones se pueden probar para condiciones de cortocircuito y así saber si opera la protección para fallas internas. Esto se logra conectando uno de los conjuntos de transformadores de corriente en delta o estrella de acuerdo con la regla ya mencionada, sin importar cómo esté hecha la conexión, ya sea con la polaridad en un sentido u otro. Después deberá conectarse el otro conjunto de transformadores de corriente de acuerdo a la misma regla, pero con la polaridad de tal forma que cuando ocurra una falla interna, las corrientes secundarias de los transformadores de corriente se sumen y circulen por la bobina de operación. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama completo de conexiones que satisface los requisitos anteriores. Estas conexiones serían correctas aún si se invirtieran las polaridades de ambos conjuntos de transformadores de corriente.

La protección diferencial es principalmente útil en caso de fallas entre fases o de fase a tierra, si la corriente de falla es bastante elevada.

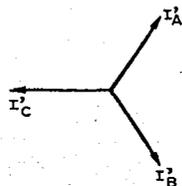
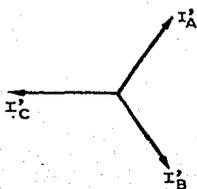
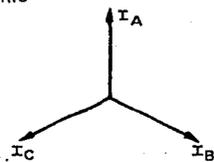
En la Figura 2.2 se muestran las corrientes correspondientes a la protección y se observa que las



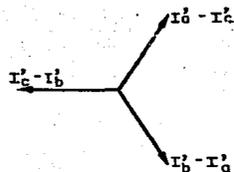
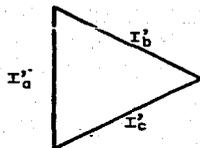
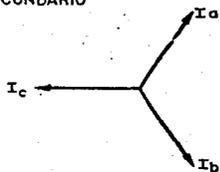
**FIGURA 2.1**  
**PROTECCION DIFERENCIAL APLICADA A UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA**  
**A-Y, CON CONEXION DE LOS TC'S**

|  |   |
|--|---|
| <b>FACULTAD DE<br/>INGENIERIA<br/>UNAM</b> | <b>TESIS</b>                                    |
|  | CRUZ RAMIREZ LUIS. A                            |
|  | DIAZ ESPELETA LUIS. E<br>SANCHEZ MENDEZ GERARDO |

PRIMARIO



SECUNDARIO



CORRIENTES EN  
EL TRANSFORMADOR  
DE POTENCIA

CORRIENTES EN  
EL SECUNDARIO DE  
LOS TC'S

CORRIENTES POR  
LOS WLOS

**FIGURA 2.2**  
DIAGRAMA DE FASORES DE LAS CORRIENTES  
EN LOS TRANSFORMADORES

FACULTAD DE  
INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**

CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
DIAZ ESPELETA LUIS.E  
SANCHEZ MENDEZ GERARDO

corrientes que entran en las conexiones de los transformadores de corriente están en fase para condiciones de carga equilibrada y, por lo tanto, no funcionará el relevador. De esta forma se consigue la igualdad de fase entre las corrientes de los transformadores de corriente, aunque sea distinta la clase de conexión de los devanados primario y secundario del transformador de potencia.

Un punto importante sobre la selección de la conexión de los transformadores de corriente es que la conexión delta hace circular dentro de ésta a las componentes de secuencia cero de la corriente de falla y no las deja pasar por las conexiones externas del relevador. Esto es necesario debido a que no hay componentes de secuencia cero en el lado de la delta del transformador de potencia para fallas a tierra en el lado de estrella; por lo tanto no hay posibilidad de que circulen fácilmente las corrientes de secuencia cero entre los conjuntos de los transformadores de corriente y si éstos en el lado de estrella no estuvieran conectados en delta, dichas componentes circularían por la bobina de operación y ocasionarían que el relevador funcionara en forma indeseada en las fallas a tierra externas.

El relevador no recibirá componentes de secuencia cero, pero recibirá y funcionará a partir de las componentes de secuencia positiva y negativa de las corrientes de falla.

Las indicaciones anteriores referidas a las conexiones de los transformadores de corriente y del relevador se aplican en igual forma para transformadores de potencia de más de dos devanados; sólo es necesario considerar dos devanados como si fueran los únicos.

Si se tratara de un transformador de potencia que tiene sus devanados acoplados en estrella-estrella, los dos grupos de transformadores de corriente pueden también estar acoplados en estrella, con la condición de que el neutro se encuentre aislado; pero si estuviera puesto a tierra sería necesario cambiar el tipo de conexión a una conexión delta-delta.

Si el transformador de potencia tiene los devanados en estrella-zig zag, los transformadores de corriente deberán ser conectados en estrella del lado de estrella y en delta del lado de zig-zag con neutro a tierra; pero si el lado en estrella estuviese igualmente puesto a tierra sería preciso adoptar la disposición anterior para eliminar la componente de secuencia cero.

En las instalaciones de protección diferencial para transformadores, se debe conectar a tierra un solo punto común de los circuitos secundarios de los transformadores de corriente.

Si en un transformador de corriente se abre el circuito secundario y permanece constante la corriente primaria  $I_p$ , determinada por el valor de la carga que exige la instalación, dicha corriente produce una imanci6n en el n6cleo muy elevada, porque no existen ampers-vuolta contramagnetizantes y act6a como corriente en vacio con un valor mucho mayor, que cuando el secundario estaba cerrado. Ello trae por consecuencia que el flujo creado induce en los devanados tensiones elevadas que pueden ser perjudiciales y adem6s se originan p6rdidas muy grandes por hist6resis y corrientes par6sitas, que producen calentamientos exagerados motivo de la destrucci6n del transformador de corriente. Por las anteriores razones no debe trabajar el transformador de corriente con el secundario abierto y si fuera preciso hacerlo, deberia previamente ponerse en cortocircuito sus terminales.

## 2.1 OPERACION DE LA PROTECCION DIFERENCIAL

Los relevadores diferenciales est6n basados todos en el principio de balanceo o comparaci6n de las corrientes

secundarias de los transformadores de corriente que se encuentran en las terminales del transformador de potencia.

Puesto que las corrientes secundarias de los transformadores de corriente son casi iguales, no aparecerá corriente a través del circuito de operación.

Los relevadores diferenciales pueden tener dos o más bobinas de restricción, las cuales producen un par que está en la dirección de apertura de un contacto y es proporcional a la suma de las corrientes de entrada y salida del relevador.

Bajo condiciones normales de carga, la corriente fluye a través del equipo protegido y las corrientes secundarias de los transformadores de corriente estarán circulando por las bobinas de restricción.

Un relevador de porcentaje variable es más sensible sobre las pequeñas fallas internas que uno de porcentaje constante y menos sensible sobre las fallas externas francas. Por esta razón, en la protección diferencial de corriente se combinan la más alta sensibilidad y el mínimo tiempo de disparo, lo que permite que el relevador opere fácilmente para fallas internas y no para fallas externas. Lo anterior se muestra en la Figura 2.1.

Otro aspecto importante es que éstos relevadores no operan con las corrientes de magnetización asociadas con la energización del transformador de potencia, aunque pudieran tomarse como una falla interna.

Para evitar falsas operaciones, los relevadores ya mencionados contienen unidades que ejercen funciones por separado. La unidad diferencial (DU) del relevador tipo HU evita la operación durante una falla externa, mientras que la unidad de restricción de armónicas (HRU) evita la operación sobre las corrientes de magnetización.

La operación del relevador se describirá mejor en los siguientes subtemas.

## 2.2 CORRIENTES DE FALLA EXTERNA

Si ocurriera una falla externa al transformador de potencia, fluiría una corriente muy grande a través de sus devanados, pero en la dirección correspondiente a las condiciones normales de funcionamiento, por lo que el relevador no operaría. El par de restricción para abrir el contacto, es firme y dirigido a prevenir una falsa operación, debida a la corriente diferencial,  $I_D$ , causada por los efectos de saturación de la corriente secundaria.

Todos los relevadores antes mencionados tienen una característica de porcentaje variable, lo cual nos indica que la corriente de operación requerida para cerrar los contactos de la unidad diferencial está expresada como un porcentaje de la corriente de restricción, la cual varía en función de la corriente de restricción mayor en los relevadores HU y HU-1 y con la suma de las corrientes de restricción en el HU-4.

El relevador mencionado se conecta como se ilustra en la Figura 2.3.

La falla externa causa un flujo de corriente en las bobinas de restricción de la unidad diferencial. En una falla externa franca donde la corriente principal sature el transformador de corriente, una parte de ésta circulará por la bobina de operación del relevador. Ante tal circunstancia, la unidad de diferencial y la unidad de restricción de armónicas podrán cerrar sus contactos dependiendo de las armónicas en la corriente de falla externa. Sin embargo, la operación del relevador es impedida por la característica de porcentaje variable de la unidad diferencial, ya que se requiere una corriente diferencial grande para cerrar éstos contactos durante una severa falla externa.

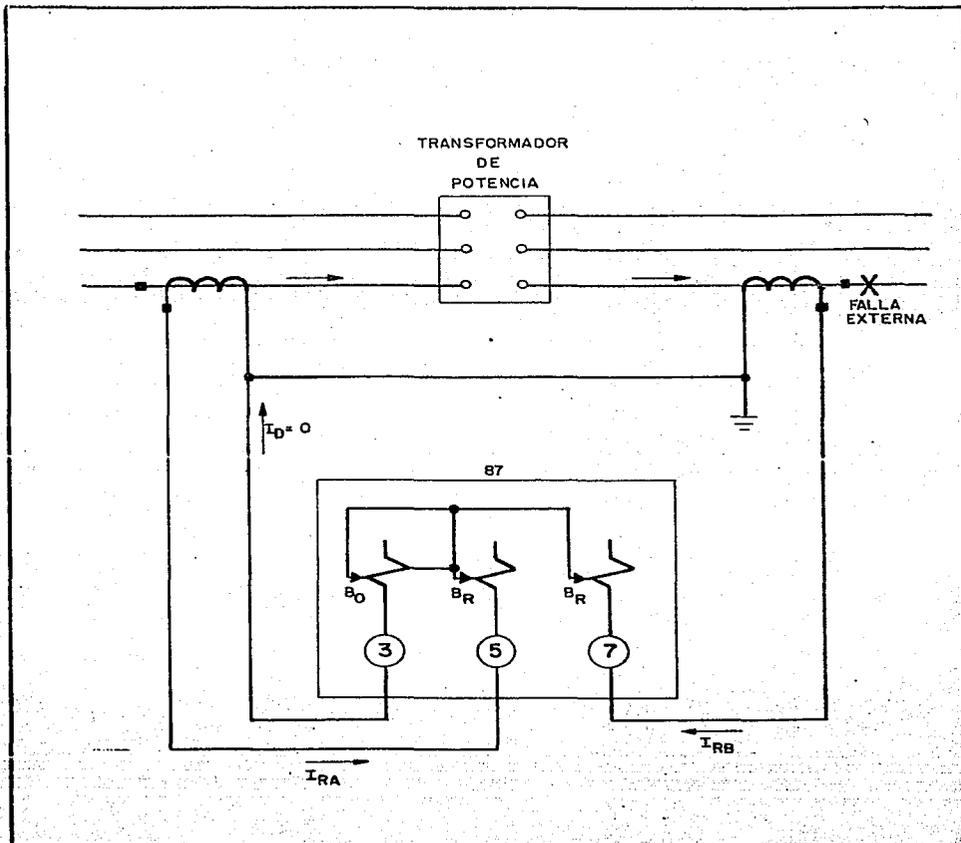


FIGURA 2.3

|  |  |
|--|--|
| <p>FACULTAD DE INGENIERIA<br/>UNAM</p> | <p>TESIS<br/>CRUZ RAMIREZ LUIS.A<br/>DIAZ ESPELETA LUIS.E<br/>SANCHEZ MENDEZ GERARDO</p> |
|--|--|

### 2.3 CORRIENTES DE FALLA INTERNA

Cuando ocurre una falla en el transformador de potencia, ya sea entre fases o a tierra, comienza a circular una corriente en sentido contrario a uno de los transformadores de corriente, lo cual provoca un desbalance de corrientes, permitiéndose entonces una corriente diferencial  $I_D$  a través de la bobina de operación del relevador. Si esta corriente excede el ajuste de operación del relevador, éste operará y mandará una señal de apertura al interruptor, aislando al transformador del resto del sistema.

La mayor parte de las corrientes que circulan por las bobinas de restricción están en dirección opuesta, por lo que el par de restricción total es mucho menor que el causado por la falla externa.

El relevador operará cuando el par de operación (creado por  $I_D$ ) sea más grande que el par de restricción. En la falla interna, como se muestra en la Figura 2.4, la restricción de la unidad diferencial es proporcional a la corriente de restricción mayor en los relevadores HU y HU-1 y la suma de las corrientes de restricción en el HU-4. La suma de las corrientes de restricción circular hacia la

bobina de operación y producen un par de operación muy grande, funcionando de esta forma la unidad diferencial.

En el caso de una falla interna que se alimenta de una sola fuente, la corriente de falla circula en una de las bobinas de restricción y en la bobina de operación; es producido un par de operación en exceso en la unidad diferencial y ésta opera.

Una falla normalmente se presenta como onda senoidal reducida, con una componente de corriente directa negativa y muy pocas armónicas. Como resultado, la unidad de restricción de armónicas operará durante una falla interna para permitir la operación del relevador.

Para fallas internas francas, la unidad de indicación de disparo instantáneo (ITT) será accionada, ya que solamente pasa la señal de la onda senoidal de la falla a la unidad mencionada, la cual está constituida por dispositivos que sirven para amortiguar las fallas internas severas que perjudiquen al relevador.

#### 2.4 CORRIENTES DE MAGNETIZACION

Las ondas de corrientes magnetizantes son de forma muy variable. Una onda típica tiene forma de media onda

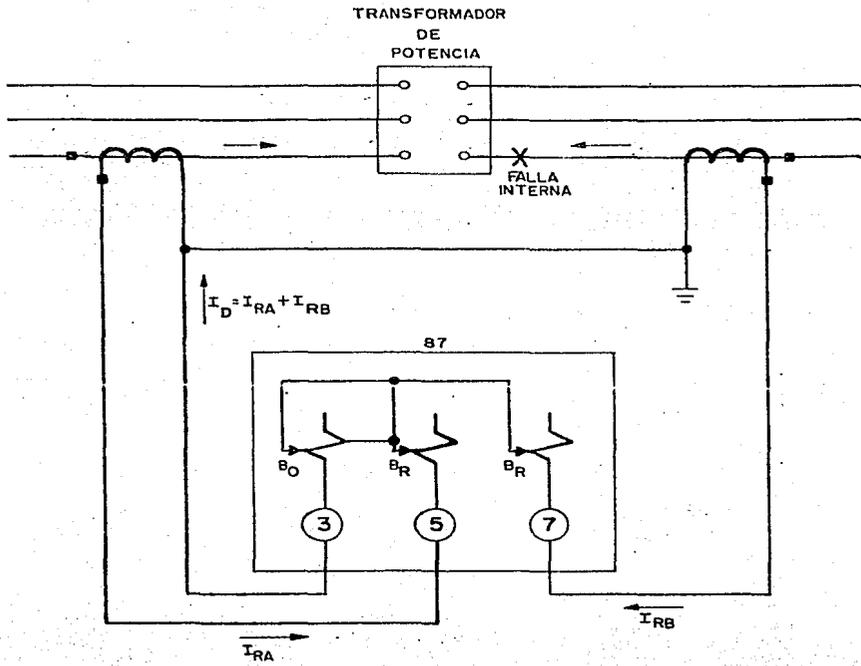


FIGURA 2.4

|  |   |
|--|---|
| <b>FACULTAD DE<br/>INGENIERIA<br/>UNAM</b> | <b>TESIS</b><br>CRUZ RAMIREZ LUIS.A<br>DIAZ ESPELETA LUIS.E<br>SANCHEZ MENDEZ GERARDO |
|--|---|

rectificada con reducción en los picos. En algunos casos tienen abundantes armónicas con la segunda armónica predominante, por lo tanto esta segunda armónica siempre se presenta en ondas de corrientes magnetizantes y no en ondas de falla interna. Esta armónica es usada para accionar a la unidad de restricción de armónicas durante la energización del transformador. La unidad diferencial cerrará sus contactos dependiendo de la magnitud de la corriente magnetizante.

Estos relevadores están provistos de dispositivos internos que eliminan la componente de corriente directa y distinguen a la segunda armónica de las demás.

La unidad de restricción de armónicas no cerrará los contactos a menos que la segunda armónica sea menor que el 15% de la componente fundamental.

La unidad indicadora de disparo instantáneo (ITT) no operará sobre una corriente magnetizante, ya que es reducida la magnitud de la onda aplicada a esta unidad.

### 3. CARACTERISTICAS DE LOS RELEVADORES DIFERENCIALES

Debido a que los relevadores diferenciales son utilizados para proteger una inmensa variedad de equipos de potencia, éstos toman una gran cantidad de formas de conexión y de operación, que dependen del equipo que se esté protegiendo.

En forma general cuando se selecciona un relevador, se necesitan conocer todas sus características de operación, valores de corriente por las derivaciones, porcentajes de pendiente, etcétera. Existen además características que diferencian a un relevador de otro y que dependen de las necesidades del equipo. Estas diferencias entre los relevadores diferenciales radican en bloques de operación que se añaden al circuito fabricado y deben ser especificados y explicados en los manuales del fabricante, tales como la unidad de restricción de armónicas, unidad indicadora de disparo, etcétera. Como se ve pueden ser unidades que dan sofisticación al diseño o unidades necesarias para garantizar una operación adecuada del dispositivo.

En la protección de los transformadores de potencia se utilizan siempre relevadores con porcentaje de pendiente, para garantizar su operación únicamente durante fallas internas muy severas. Esta característica es necesaria también para evitar el funcionamiento del relevador con corrientes de desbalance pequeñas debidas a defectos de fabricación en los transformadores de corriente, ya que estos no convierten sus corrientes primarias con tanta precisión bajo condiciones transitorias como para condiciones de corto tiempo después de haber ocurrido un cortocircuito. Además, cuando ocurre un cortocircuito la corriente de falla en ocasiones se encuentra descentrada y ocasiona que las corrientes secundarias de los transformadores de corriente del mismo diseño sean diferentes, debido a pequeñas diferencias en sus propiedades magnéticas o a que tienen diferentes cantidades de magnetismo remanente.

Aún cuando no esté descentrada la corriente de cortocircuito hacia una falla externa, las corrientes secundarias de los transformadores de corriente pueden ser diferentes debido a las diferencias de los mismos o a las cargas aplicadas al transformador de potencia.

Para explicar cómo opera un relevador diferencial haremos referencia a la Figura 2.3. La corriente diferencial en la bobina de operación es proporcional a  $(I_{RA} - I_{RB})$  y la corriente equivalente en la bobina de restricción es proporcional a  $(I_{RA} + I_{RB}) / 2$ . De esta forma la característica de pendiente está dada por la relación:

$$I_{RA} - I_{RB}$$

-----

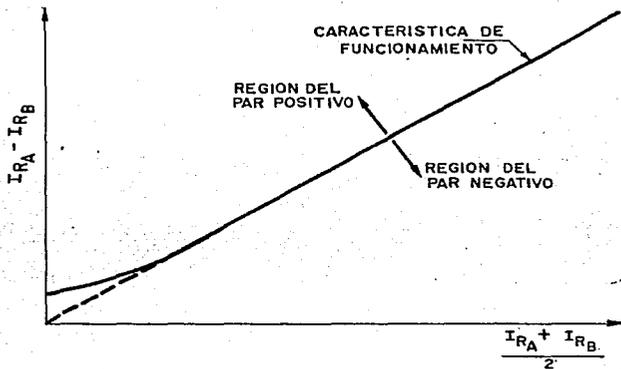
$$(I_{RA} + I_{RB}) / 2$$

Por ejemplo, si se tiene un ajuste de pendiente del 15% se tendrá que,

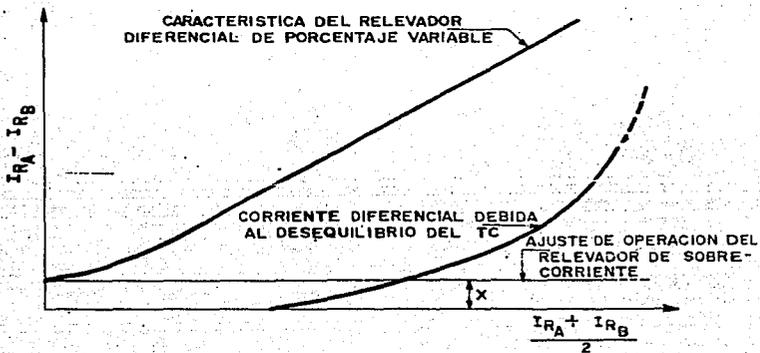
$$0.15 \times (I_{RA} + I_{RB}) / 2 = (I_{RA} - I_{RB}).$$

Lo anterior quiere decir que bastará con que la corriente en la bobina de operación sea el 15% de la corriente por la bobina de restricción para que el relevador opere, antes de este valor no operará.

La característica de porcentaje variable se ilustra en la Figura 3.1, donde también se muestra la comparación entre un simple relevador de sobrecorriente con un relevador diferencial de porcentaje variable, donde se observa que para el punto X el relevador de sobrecorriente funcionará mientras que el otro no percibe falla.



**FIGURA 3-1a**  
 CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN RELEVADOR  
 DIFERENCIAL CON PORCENTAJE VARIABLE



**FIGURA 3-1b**  
 COMPARACION DE LA OPERACION DE UN RELEVADOR DIFERENCIAL  
 CONTRA UNO DE SOBRECORRIENTE

|  |                        |
|--|------------------------|
| <b>FACULTAD DE<br/>INGENIERIA<br/>UNAM</b> | <b>T E S I S</b>       |
|  | CRUZ RAMIREZ LUIS. A   |
|  | DIAZ ESPELETA LUIS. E  |
|  | SANCHEZ MENDEZ GERARDO |

La fábrica Westinghouse produce relevadores diferenciales con características de porcentaje variable y restricción de armónicas, con las siguientes denominaciones:

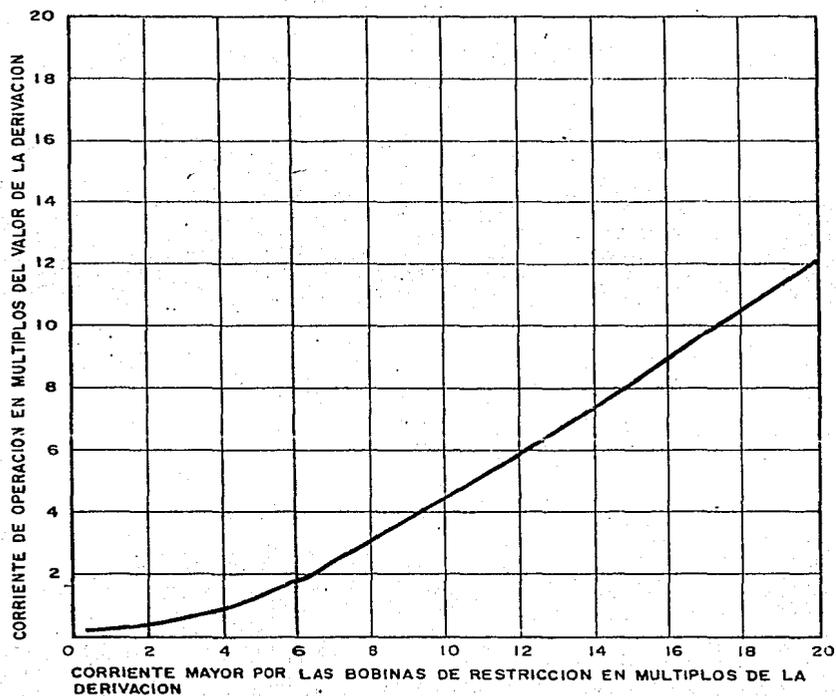
- Para transformadores de dos devanados: Relevador tipo HU.
- Para transformadores de tres devanados: Relevador tipo HU-1.
- Para transformadores de cuatro devanados: Relevador tipo HU-4.

Todos los relevadores tipo HU contienen varias unidades que conjuntamente forman todo el dispositivo de protección:

- Unidad diferencial (DU).
- Unidad de restricción de armónicas (HRU).
- Unidad indicadora de cierre de contactos (ICS).
- Unidad indicadora de disparo instantáneo (ITT).

Estos relevadores son utilizables con una sensibilidad entre el 30% y 35% de la corriente que circula por la derivación. El 30% de la sensibilidad satisface el 15% de desajuste.

El relevador tipo HU funciona para 50 y 60 hertz, 127 Volts y contiene derivaciones de 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.2, 5.0 y 8.7 Amperes.



**FIGURA 3.2**  
 CARACTERISTICAS DE PENDIENTE DE LA UNIDAD DIFERENCIAL DEL  
 RELEVADOR TIPO HU

FACULTAD DE  
 INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**  
 CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
 DIAZ ESPELETA LUIS.E  
 SANCHEZ MENDEZ GERARDO

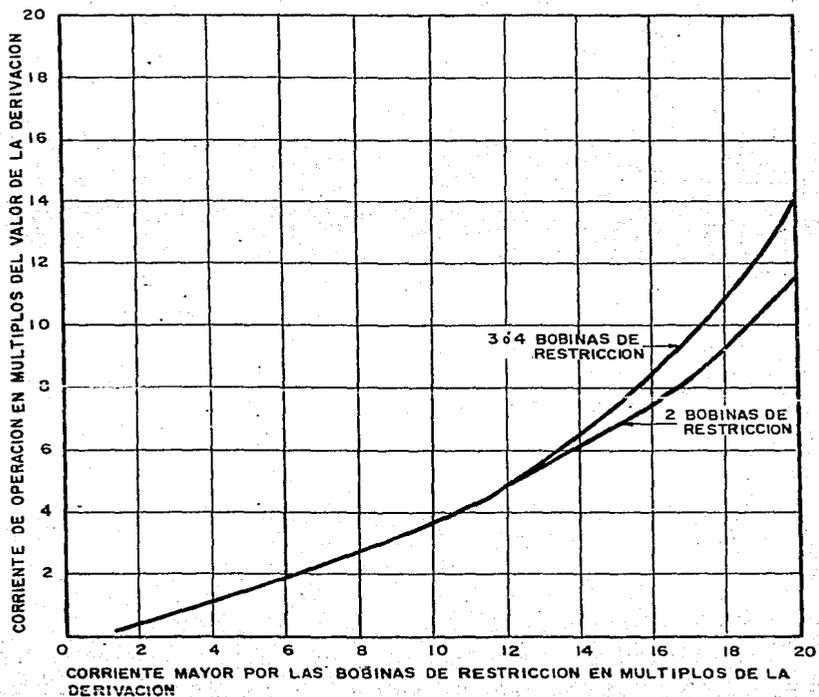
La Figura 3.2 nos enseña la característica de porcentaje variable, la cual corresponde aproximadamente a un 50% de pendiente.

La Figura 3.3 nos indica que la característica de porcentaje variable depende del número de bobinas de restricción utilizadas, ya que la corriente que circula por ellas y por la bobina de operación se ven afectadas.

La Figura 3.4 muestra el tiempo de operación, en ciclos, de la unidad principal y de la unidad de disparo instantáneo. Es una curva de tiempo inverso en la cual el tiempo de operación es menor a medida que el valor de la corriente de operación se incrementa.

La Figura 3.5 nos proporciona información del efecto de la frecuencia en el ajuste de operación del relevador tipo HU. Un relevador cualquiera se diseña para poder trabajar a su frecuencia nominal, de modo que una variación de frecuencia debida por ejemplo a una onda distorsionada de corriente puede ocasionar cambios significativos en sus características de ajuste de operación y tiempo de respuesta.

La Figura 3.6, por último, nos presenta el voltaje mínimo que debe existir en la bobina de operación para

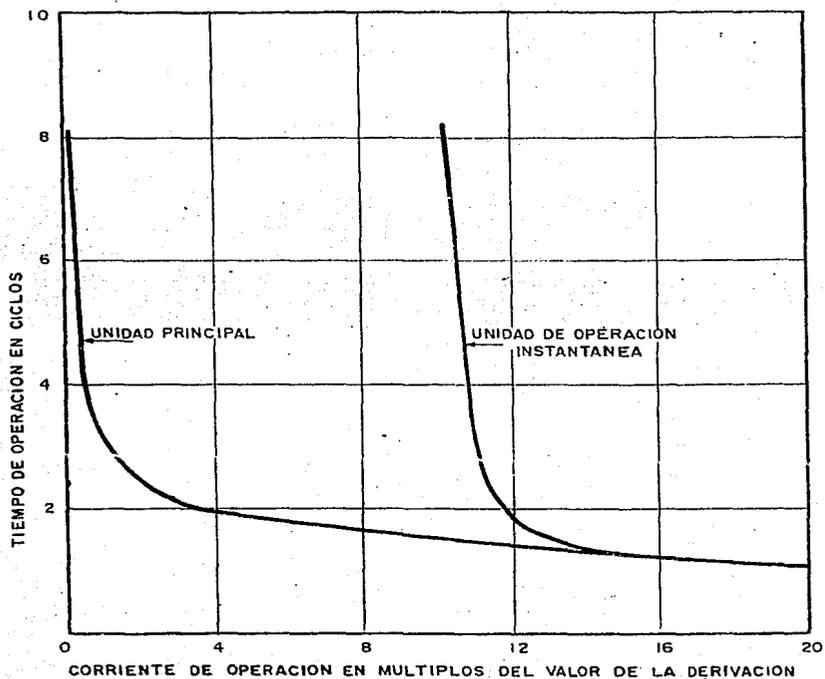


**FIGURA 3.3.**  
 EJEMPLO DE VARIACION DE LA CARACTERISTICA DEPENDIENTE PARA  
 MAS DE 2 BOBINAS DE RESTRICCIÓN  
 (TIPO HU-4)

FACULTAD DE  
 INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**

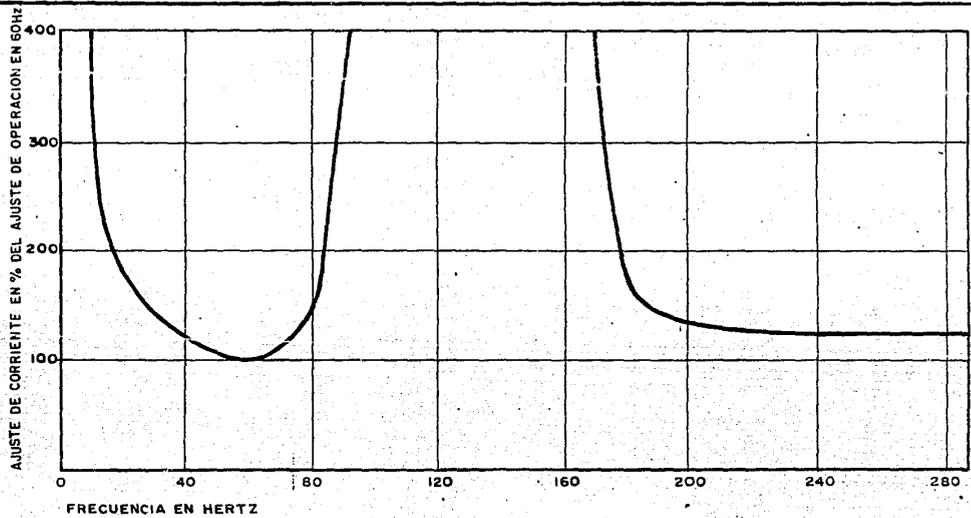
CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
 DIAZ ESPELETA LUIS.E  
 SANCHEZ MENDEZ GERARDO



**FIGURA 3.4**  
 CURVAS DE TIEMPOS DE OPERACION TÍPICAS DEL RELEVADOR  
 TIPO HU

FACULTAD DE  
 INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**  
 CRUZ RAMIREZ LUIS A  
 DIAZ ESPELETA LUIS E  
 SANCHEZ MENDEZ GERARDO



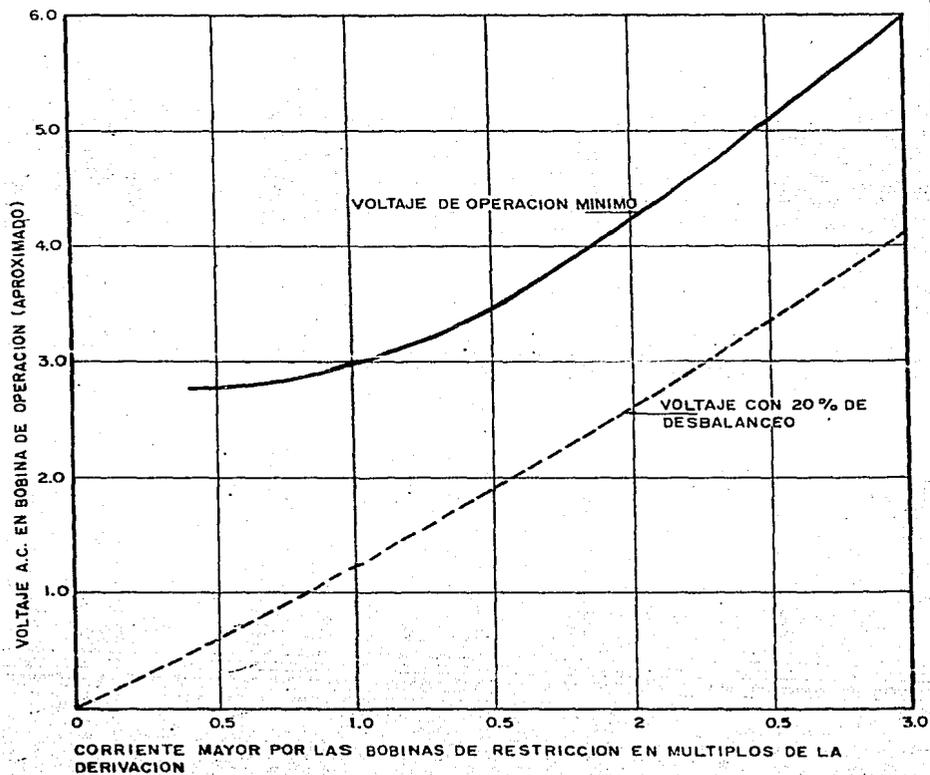
**FIGURA 3.5**

AJUSTE DE OPERACION PARA FRECUENCIA VARIABLE PARA EL RELEVADOR  
TIPO HU

FACULTAD DE  
INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**

CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
DIAZ ESPELETA LUIS.E  
SANCHEZ MENDEZ GERARDO



**FIGURA 3.6**  
 CARACTERISTICAS DEL VOLTAJE EN LA UNIDAD DIFERENCIAL DEL  
 RELEVADOR TIPO HU

FACULTAD DE  
 INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**  
 CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
 DIAZ ESPELETA LUIS.E  
 SANCHEZ MENDEZ GERARDO

asegurar que el relevador mande la señal de apertura a los interruptores.

Para entrar a las curvas mencionadas se debe hacer lo siguiente: Cuando se trate de corriente de restricción se tiene que tomar la mayor de las que circulen por cada bobina de restricción, dividirla por la derivación que se haya seleccionado y luego entrar con ese valor al eje correspondiente. Cuando se esté manejando corriente de operación, en forma similar hay que dividir la corriente de falla que circula por la bobina de operación por la derivación seleccionada y entrar con ese valor al eje que la mencione. Por ejemplo, para saber si el relevador opera con una corriente de falla interna de 1000 Amperes, de los cuales por una bobina de restricción circulan 8 Amperes y por la otra 6 Amperes y además se está usando una derivación de 3.2 Amperes, debemos entrar a la Figura de 3.2 así:

Para el eje horizontal:  $8 / 3.2 = 2.5$

Para el eje vertical:  $(8 + 6) / 3.2 = 4.375$

Si entramos con estos valores a la Figura indicada anteriormente nos encontramos en un punto por encima de la curva de pendiente, que corresponde a la operación del

relevador. De igual forma podemos entrar a las otras curvas.

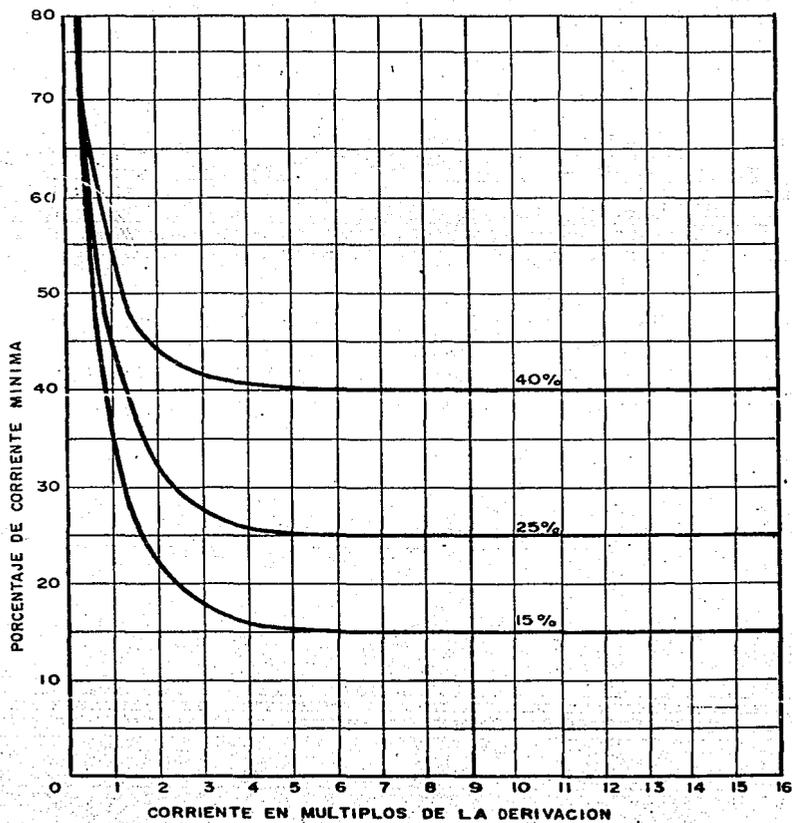
La fábrica General Electric también produce relevadores diferenciales con las mismas características de operación del HU. Sus denominaciones son:

- BDD15B para dos devanados.
- BDD16B para tres devanados.

Sus características principales se muestran en las Figuras 3.7 y 3.8. La primera difiere de la característica de pendiente del HU, en que en el eje vertical están directamente marcados los porcentajes de pendiente, mostrando además en forma real los tres tipos de porcentajes que maneja este tipo de relevador.

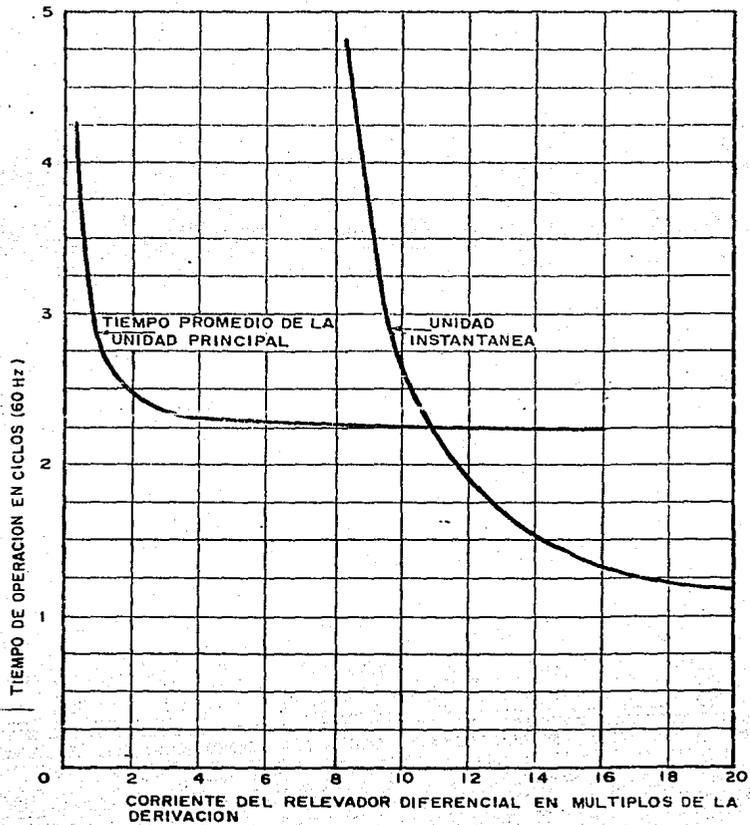
La segunda Figura corresponde al tiempo de operación del tipo BDD. Se puede observar que es casi idéntica a la Figura equivalente para el HU.

La Westinghouse también produce los relevadores diferenciales tipo CA, el cual es diseñado para dos devanados del transformador a proteger, con característica de porcentaje constante y operación de tiempo inverso.



**FIGURA 3.7**  
**CARACTERISTICAS DE OPERACION DEL RELEVADOR TIPO BDD**

|  |                        |
|--|------------------------|
| <b>FACULTAD DE<br/>         INGENIERIA<br/>         UNAM</b> | <b>TESIS</b>           |
|  | CRUZ RAMIREZ LUIS.A    |
|  | DIAZ ESPELETA LUIS.E   |
|  | SANCHEZ MENDEZ GERARDO |



**FIGURA 3.8**  
 CURVA TIEMPO-CORRIENTE TÍPICA PARA EL RELEVADOR TIPO BDD

FACULTAD DE  
 INGENIERIA  
**UNAM**

**TESIS**  
 CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
 DIAZ ESPELETA LUIS.E  
 SANCHEZ MENDEZ GERARDO

Estos son monofásicos, de tal forma que se deben usar tres relevadores para proteger un transformador trifásico. Con respecto a la operación es igual al tipo HU. La única excepción es que no tiene unidad de restricción de armónicas.

Existe también una fábrica Suiza llamada Brown Boveri que produce relevadores diferenciales con porcentaje variable, restricción de armónicas y tiempos de operación muy pequeños que los ajustan perfectamente a nuestro uso. Sus denominaciones son:

- ITE-87 para dos o tres devanados, monofásico. Por cuestión de diseño ocupa menor espacio que un tipo HU o BDD. Esto será un factor a considerar en la selección del relevador, ya que el sitio donde se va a instalarse es para un tamaño normal HU o BDD.

- Módulo DT-92, trifásico, para transformadores de dos devanados.

Sin embargo todos reúnen las características necesarias en la protección del transformador de potencia de nuestro caso.

#### 4. SELECCION DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

##### 4.1 CONSIDERACIONES

La selección del tipo de transformador de corriente que se utilizará para acoplar al transformador de potencia al relevador diferencial, se hace considerando el tipo de conexiones de este último y tomando en cuenta los requerimientos propios de la instalación además del buen funcionamiento y la precisión de la protección.

Un transformador de corriente se selecciona de hecho para que no se sature (o se sature hasta cierto punto), ante cualquier corriente de falla externa.

Por lo tanto, conociendo el desbalance máximo (mismatch o error que surge al igualar las corrientes secundarias en condiciones de carga máxima), la carga conectada a los transformadores de corriente y el valor máximo de falla externa, puede calcularse con exactitud el valor máximo de corriente diferencial que pasará por la bobina de operación.

A continuación se mencionan los principales puntos que se deben tomar en cuenta para una buena selección de los transformadores de corriente.

4.1.1 Elección del Nivel de Aislamiento y Tipo de Construcción del Transformador de Corriente. El nivel de aislamiento y el tipo de construcción del transformador de corriente, deben garantizar las medidas de seguridad especificadas. Para hacer una elección correcta debe tomarse en cuenta la altitud de la instalación, clima predominante en donde se instalen los transformadores de corriente y el medio ambiente que lo rodea.

4.1.2 Elección de la Relación de Transformación Nominal. Debe evitarse tomar una corriente primaria débil o escasa, porque ello equivaldría a hacer trabajar a los transformadores de corriente y a los relevadores en una región en que su precisión y su resistencia a los cortocircuitos serían desfavorables.

La relación de transformación se seleccionará tomando en cuenta la corriente primaria nominal, la corriente de cortocircuito mínima para la cual debe funcionar la protección y considerando un 25% de exceso sobre la corriente primaria nominal calculada, siguiendo las recomendaciones hechas por los fabricantes de relevadores.

Para el caso del transformador de potencia de la planta de papel se hará el cálculo de la relación de transformación al final del capítulo, para reunir las bases necesarias que nos permitan determinarla.

4.1.3 Elección de la Clase de Precisión. Esta se realiza con base en las clasificaciones ANSI normalizadas. Dicha norma indica que para una buena protección diferencial para transformadores de potencia se debe utilizar la clasificación "C" de precisión, la cual proporciona el valor del voltaje secundario que puede tener el transformador de corriente. Este voltaje es el valor máximo que puede adquirir la carga conectada a cada transformador de corriente para que no exceda el valor de error de relación especificado para dicha protección, el cual se define con la siguiente expresión:

$$e_i = ((I_s R_t - I_p) / I_p) \times 100$$

Para el caso del transformador de potencia que se analiza, se selecciona la clase "C200" donde la "C" corresponde a la clase de precisión y el 200, es el voltaje máximo que requiere o que puede adquirir la carga del Transformador de corriente.

4.1.4 Determinación del Cálculo del Burden (Carga). El cálculo del burden para los transformadores de corriente de todos los devanados del transformador de potencia se indica en la Tabla 1., para el caso en que se presente una falla en la peor condición de saturación. Dicha Tabla es proporcionada por los diferentes fabricantes de los relevadores diferenciales.

TABLA 1. ECUACIONES PARA EL CALCULO DEL BURDEN TOTAL EN FALLAS INTERNAS O EXTERNAS.

-----  
 FALLAS EXTERNAS  
 -----

|   |   |  |
|---|---|--|
| Transformadores de corriente conectados en estrella (lado delta del transformador). | Falla de fase a tierra (lado estrella del transformador). | $Z_t = 1.13R_1 + 0.15/T + Z_a + R_s$ (ohms). |
|---|---|--|

|  |   |  |
|--|---|--|
| Transformadores conectados en delta (lado estrella del transformador). | Falla de fase a fase (en cualquier lado del transformador). | $Z_t = 3(1.13R_1 + 0.15/T + Z_a) + 2R_s$ (ohms). |
|--|---|--|

-----

FALLAS INTERNAS

-----

|   |  |  |
|---|--|--|
| Transformadores<br>de corriente<br>conectados en<br>estrella. | Falla de fase a<br>tierra del lado<br>de un devanado<br>en estrella. | $Z_t = B +$<br>$+ (N_e + 2.5f) / 1000 +$<br>$+ 2.27R_1 + Z_a$<br>(ohms). |
|---|--|--|

|  |  |  |
|--|--|--|
| Transformadores<br>de corriente<br>conectados en<br>delta. | Falla de fase a<br>tierra del lado<br>de un devanado<br>en estrella. | $Z_t = 2B +$<br>$+ (N_e + 2.5f) / 1000 +$<br>$+ 2.27R_1 + 2Z_a$<br>(ohms). |
|--|--|--|

En donde:

$Z_t$  = Burden total secundario incluyendo la resistencia del devanado secundario del transformador de corriente y sus terminales ( $R_s$ ).

$R_1$  = Resistencia del cable de conexión entre el transformador de corriente y el relevador (una sola dirección).

$T$  = Derivación del relevador seleccionada.

$Z_a$  = Impedancia de algún otro relevador o medidor incluido en el circuito.

$R_s$  = Resistencia del devanado secundario del Transformador de corriente incluyendo sus puntas.

$B$  = Impedancia de un devanado de restricción más la impedancia de la bobina de operación del relevador (en la derivación usada).

$N$  = Número de vueltas en el secundario del transformador de corriente en la derivación usada.

$e$  = Resistencia por vuelta del devanado secundario, en miliohms.

$f$  = Resistencia de una terminal de conexión interna del transformador de corriente, en miliohms.

Nota: Los factores 1.13, 2.5 y 2.27 toman en cuenta la elevación de temperatura de las puntas internas del transformador de corriente y de los cables de conexión entre éstos y el relevador durante condiciones de falla.

Se recomienda no exceder el valor de la carga (Burden) porque se tendrían elevaciones de temperatura en los transformadores de corriente y en el relevador, disminuyendo consecuentemente su precisión. Por el

contrario, si en el secundario se tiene una carga insuficiente, podrá intercalarse una resistencia para adoptar el voltaje necesario en el relevador.

4.1.5 Adopción del índice de sobrecarga  $n$ . Se define el índice de sobre-intensidad, también llamado de sobrecarga, como el múltiplo de la corriente nominal primaria que como consecuencia de la saturación, motiva un error de corriente del 10%, tomando a  $Z_t$  como la impedancia de carga nominal.

El error de desfaseamiento no cambia en relación al índice de sobrecarga.

Normalmente, los transformadores de corriente pueden ser sobrecargados en un 20% (carga = 120% I p.u.) sin tener problemas en la precisión, ni en la elevación de temperatura.

4.1.6 Selección del Número de Núcleos del Transformador de Corriente. Es posible que el transformador de corriente pueda ser construido con dos núcleos para destinar uno de ellos a los aparatos de medición y el otro a la protección diferencial; lo conveniente es seleccionarlo con un sólo núcleo para destinarlo exclusivamente a la protección diferencial.

En ocasiones, será posible conectar el transformador de corriente y los aparatos de medición al mismo núcleo, pero con la condición de que satisfaga las condiciones impuestas por estos últimos.

Para nuestra protección diferencial se eligieron transformadores de corriente con un sólo núcleo.

Cumpliendo cada uno de los puntos anteriores se garantizará el buen funcionamiento de los transformadores de corriente para la protección de cualquier transformador de potencia.

#### 4.2 ERROR EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Existen dos condiciones fundamentales que deben ser previstas y evitadas en la operación de un relevador diferencial, debidas a la saturación de los transformadores de corriente. Estas son:

- Operación errónea por falla externa y
- Bloqueo para falla interna por generación excesiva de armónicas (por saturación).

Una forma de evitar la primera condición consiste en calcular y verificar que el error en la relación de

transformación del transformador de corriente sea inferior al 10% para el valor máximo de corriente de falla externa. Con esto se consigue una generación muy baja de armónicas.

El error calculado puede absorberse dando un margen de seguridad entre el 5% y el 15% del porcentaje de pendiente.

La forma de evitar la segunda condición consiste en verificar que el error en la relación de transformación del transformador de corriente sea menor del 20% para un valor de corriente igual al ajuste de operación de la unidad de disparo instantáneo (ocho veces el valor de la corriente por la derivación seleccionada). Si el error es inferior al 20%, la generación de armónicas no es tan alta como para bloquear la operación del relevador.

La corriente de excitación,  $I_0$ , es la causante de los errores de corriente y de ángulo. Se hace resaltar que para una corriente primaria  $I_p$  determinada y valores de carga  $Z_t$ , aumentan los errores (por aumento de  $I_0$ ); además, para una  $Z_t$  dada y valores elevados de corriente secundaria  $I_s$ , aumentarán también los errores.

Los errores de intensidad y desfase dependen de las características de la carga, por lo que se necesita definir el grado de precisión del transformador de corriente.

#### 4.3 METODOS PARA DETERMINAR EL ERROR EN LA RELACION DE TRANSFORMACION

Existen tres métodos muy usados para determinar el error en la relación de transformación:

4.3.1 Método algebraico o de la curva de saturación del transformador de corriente. En este método se necesita conocer la curva de saturación, a veces suministrada por el fabricante o determinada experimentalmente. Para obtener el error de relación debemos seguir los siguientes pasos:

4.3.1.1 Determinación del burden en cada transformador de corriente usando las siguientes expresiones para la peor condición de falla interna (ver Tabla 1.); para transformadores de corriente conectados en estrella:

$$Z_t = B + (N_e + 2.50f) / 1000 + 2.27R_l + Z_a \text{ (ohms).}$$

Para transformadores de corriente conectados en delta:

$$Z_t = 2B + (N_e + 2.50f) / 1000 + 2.27R_l + Z_a \text{ (ohms).}$$

4.3.1.2 Determinar la corriente secundaria para ocho veces (relevador BDD) o diez veces (relevador HU) la corriente en la derivación.

$I_s = 8 \times$  la corriente en la derivación (BDD)

$I_s = 10 \times$  la corriente en la derivación (HU)

4.3.1.3 Determinar el voltaje secundario requerido en el transformador de corriente.

$E_s = I_s \times Z_t$

4.3.1.4 De la curva de excitación correspondiente a la derivación usada en el transformador de corriente, determinar la corriente de excitación requerida  $I_o$ .

4.3.1.5 Determinar el porcentaje de error en cada transformador de corriente con la expresión:

$\% \text{ error} = (I_o / I_s) \times 100$

4.3.1.6 El error no deberá ser superior al 20% en cualquier grupo de transformadores de corriente. Si llegase a ser mayor, sería necesario elegir una relación de transformación mayor y luego repetir todos los cálculos

anteriores, incluyendo la selección del porcentaje de pendiente y la relaciones de los demás transformadores de corriente.

4.3.2 Método Utilizando las Curvas de Factor de Corrección de las Relaciones de Transformación. Este método da directamente el porcentaje de error entrando las curvas de factor de corrección proporcionadas por el fabricante, con los siguientes datos:

- Número de vueltas de la derivación usada.
- Corriente secundaria.
- Burden.

4.3.3 Método que Utiliza la Clasificación "C" ANSI de los transformadores de corriente (para la peor condición de falla externa). Para desarrollar este método se necesita seguir los siguientes pasos:

4.3.3.1 Determinar el burden de cada transformador de corriente usando las siguientes expresiones:

- Para devanados conectados en estrella,

$$Z_t = 1.13R_1 + 0.15 / T + Z_a \text{ (ohms)}.$$

Nota:  $R_s$  no se toma en consideración ya que la clasificación "C" ANSI especifica que el error será inferior al 10% para caídas de voltaje en el burden externo inferiores al voltaje de la clase de exactitud.

- Para devanados conectados en delta,

$$Z_t = 3.4R_1 + 0.45 / T + 3Z_a \text{ (ohms)}$$

4.3.3.2 El error en el transformador de corriente será inferior al 10% si se cumple la siguiente desigualdad:

$$((N_p \times V_{c1}) / I_{ext}) > Z_t, \text{ para } I_{ext} < 100 \text{ amperes.}$$

O bien,

$$((N_p \times V_{c1} - (I_{ext} - 100) \times R_s) / I_{ext}) > Z_t, \\ \text{para } I_{ext} > 100 \text{ amperes.}$$

Estas dos formas toman en cuenta lo dicho en la nota anterior, ya que la corrección  $(I_{ext} - 100) \times R_s$  sólo se aplica cuando la  $I_{ext}$  es superior a 100 amperes (20 veces la corriente nominal secundaria del transformador de corriente). Donde:

$$N_p = N / N_t, \text{ proporción de vueltas usadas.}$$

$V_{cl}$  = Voltaje de la clase "C" de precisión (C200, C400 o C800).

$I_{ext}$  = Corriente máxima simétrica externa en amperes secundarios.

$R_s$  = Resistencia secundaria del transformador de corriente en la derivación usada, incluyendo la resistencia de las puntas.

$Z_t$  = Burden calculado para cada transformador de corriente.

Con la anterior consideración se podrán elegir los transformadores de corriente requeridos para nuestra protección, habiendo tomado todos los aspectos importantes que se necesiten y que deben considerarse para su buen funcionamiento.

#### 4.4 CALCULOS PARA LA SELECCION DE LA RELACION DE TRANSFORMACION DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

##### 4.4.1 Datos.

###### LADO DE BAJA TENSION

(Transformadores de Corriente en Delta)

$$(KVA)_m = 16000$$

$$(KVA)_n = 12000$$

$$V_B = 13800 \text{ volts}$$

$$V_{c1} = 200 \text{ volts}$$

###### LADO DE ALTA TENSION

(Transformadores de corriente en estrella)

$$(KVA)_m = 16000$$

$$(KVA)_n = 12000$$

$$V_A = 115000 \text{ volts}$$

$$V_{c1} = 200 \text{ volts}$$

$$I_{ext} < 100 \text{ amperes}$$

##### 4.4.2 Cálculos.

###### 4.4.2.1 Para el lado de baja tensión.

$$I_{pb} = (KVA)_m / (KVB \times \sqrt{3}) = 16000 / (13.8 \times \sqrt{3}) = 669.4 \text{ amp}$$

$$I_{pb} = 669.4 \text{ amp.}$$

Considerando el 25% sobre la corriente nominal primaria del transformador de potencia se seleccionará un transformador de corriente de relación 1000 / 5 y se usará la derivación correspondiente a la relación de 800 / 5.

Luego,

$N_b = 140$  (relación de transformación del lado de baja)

$N_t = 200$  (relación de transformación total del lado de  
baja tensión).

$I_{sb} = I_{pb} / N_b = 669.4 / 140 = 4.78$  amperes.

$I_{rb} = I_{sb} \times \sqrt{3} = 4.78 \times \sqrt{3} = 8.28$  amperes.

4.4.2.2 Para el lado de alta tensión.

$I_{pa} = (KVA)_m / (KVA \times \sqrt{3}) = 16000 / (115 \times \sqrt{3}) = 80.33$

$I_{pa} = 80.33$  amperes

Considerando el 25% sobre la corriente nominal primaria del transformador de potencia se seleccionará un transformador de corriente de relación 200 / 5 y se usará la derivación correspondiente a la relación de 100 / 5.

Luego,

$N_a = 20$  (relación de transformación del lado de alta)

$N_t = 40$  (relación de transformación total del lado de  
baja tensión).

$I_{sa} = I_{pa} / N_a = 80.33 / 20 = 4.02$  amperes

$I_{ra} = I_{sa} = 4.02$  amperes

## 5. SELECCION DEL RELEVADOR DIFERENCIAL

### 5.1 REGLAS BASICAS

Hay dos reglas a seguir:

5.1.1 Incluir todos los requerimientos funcionales del relevador.

5.1.2 Excluir todo lo que no sea necesario e indispensable.

Enseguida se debe establecer el tipo de aplicación que se le dará al relevador:

- Industrial.
- Comercial.
- Control de potencia eléctrica.
- Otros.

### 5.2 REFIRIENDOSE A ESPECIFICACIONES GENERALES

En ocasiones, una especificación general contiene ambigüedades o cambios múltiples que deben ser aclarados

para cada especificación particular. Por ejemplo, la especificación general puede mencionar varios tipos de pruebas de vibraciones, humedad, etcétera. Pero la especificación particular detallada debe incluir qué tipo de pruebas se aplicaron. Es en este punto cuando se pueden hacer referencias a normas, lo cual ahorrará confusiones, tiempo y dinero.

### 5.3 REQUERIMIENTOS AMBIENTALES

Algunas de las condiciones que deben ser consideradas en las especificaciones del relevador son las siguientes:

- Alta temperatura.
- Baja temperatura.
- Cambios bruscos de temperatura.
- Humedad.
- Condiciones ambientales (atmósfera corrosiva, explosiva, sulfurosa, con contaminantes químicos en suspensión, etcétera.
- Campos magnéticos.

La temperatura ambiente del aire generalmente siempre es importante, pero hay tres condiciones que merecen igual atención:

5.3.1 Temperatura de la Superficie de Montaje.

5.3.2 Temperatura, tamaño y proximidad de cuerpos adyacentes que podrían absorber o ceder calor al relevador.

Si el relevador estuviera sujeto a varias temperaturas de operación sería económicamente ventajoso ver qué porcentaje de operación se requiere en cada temperatura.

Por otro lado, algunas veces los requisitos de operación por shock o vibraciones son despreciables, pero el embarque de componentes o equipo puede implicar algunos riesgos. Ante todo, debe tenerse presente qué tipo de funcionamiento se requiere del relevador.

#### 5.4 RANGO DE TEMPERATURAS

5.4.1 Especificar las condiciones del ambiente y la superficie de montaje.

5.4.2 Indicar la temperatura ambiente del aire, el clima, si la atmósfera es quieta o agitada.

Todos estos puntos son importantes para la especificación de un límite permisible de temperatura.

### 5.5 CARACTERISTICAS ELECTRICAS

La especificación de características eléctricas tales como resistencia de contacto, resistencia de aislamiento o esfuerzos dieléctricos, pueden estar relacionados a los requisitos funcionales del relevador. El esfuerzo dieléctrico inicial, por ejemplo, es muy importante para establecer otras condiciones mínimas que determinarán la vida útil del producto.

Para algunas aplicaciones no es necesario especificar altos niveles de resistencia de aislamiento, pues solo incrementaría el costo.

### 5.6 EFECTOS DE INTERFERENCIA MAGNETICA

Las características funcionales del relevador pueden resultar afectadas por las pérdidas magnéticas de un aparato o material que se encuentre cerca. La magnitud de estos efectos depende de:

- El circuito magnético del relevador.
- Los amperes-vuelta a que el relevador es energizado.
- Polaridad y proximidad de la interferencia.
- Tipo de empaque.

Los efectos de interferencia magnética solo se pueden evaluar reproduciendo las condiciones en que se va a encontrar trabajando el relevador.

### 5.7 EVALUACION DE UNA BUENA SUPERFICIE DE CONTACTO

La plata es el metal más ampliamente usado para contactos de relevadores ya que tienen la menor resistencia eléctrica y sus óxidos y sulfatos, aunque son fácilmente formados con el aire, son eliminados más rápidamente que los de otros metales.

Los contactos de cobre no son usados en relevadores debido a que los óxidos que se forman son muy difíciles de eliminar, lo cual eleva la resistencia cientos de veces.

Cuando se tienen que manejar grandes corrientes, se utilizan aleaciones especiales de plata tales como el óxido de cadmio de plata, la cual tiene una baja resistencia como la plata, pero no se sella ni se vuelve pegajosa.

En relevadores sensibles donde la presión de contacto es muy baja, se usan metales no corrosivos como el oro y paladio. Ya que estos metales no son propensos a la corrosión no hay necesidad de altas presiones para romper la película.

La exclusión de polvo es muy importante. La mayoría de las fallas en los contactos son causadas por pelusas o por partículas de polvo producto del barniz de las bobinas sobrecalentadas y de la contaminación ambiental. Sin embargo, este problema se evita utilizando polyester y barnices epóxicos.

#### 5.8 SELECCION DEL RELEVADOR

A través de todo el trabajo hemos hecho énfasis en que los transformadores de potencia de las subestaciones juegan un papel muy importante dentro de un sistema eléctrico de potencia. También hemos aseverado que este elemento puede ocasionar grandes pérdidas económicas si se mantiene mucho tiempo fuera de servicio. En general no hemos exagerado al reafirmar todo lo anterior, por el contrario sabiendo además que se trata de un equipo muy costoso, se hace necesario ser minuciosos, cautelosos y precisos al seleccionar las protecciones adecuadas de todos los elementos que los constituyen y que estén expuestos a deterioro por cualquier tipo de falla.

Aunque aquí sólo seleccionaremos la protección diferencial que no permita el deterioro de sus devanados cuando se

presente una falla franca, el adecuado funcionamiento del transformador dependerá también de la buena selección del resto de protecciones.

El transformador de potencia de la fábrica "Mexicana de Papel" es trifásico, de dos devanados, con capacidad de 12/16 MVA, 115 KV del lado de alta tensión y 13.8 KV del lado de baja tensión.

Sus características eléctricas y de instalación nos indican claramente que tendrá una aplicación industrial.

De otra parte diremos que el medio ambiente donde se instalará el transformador y el lugar donde funcionarán los relevadores, no presentan campos magnéticos elevados que interfieran en el buen funcionamiento de las protecciones diferenciales, ya que no existen elementos cercanos que generen flujos magnéticos indeseables. Lo anterior nos aclara que nuestros relevadores no deberán estar diseñados para evitar este tipo de interferencias.

Otro factor importante que puede cambiar, como se había dicho, las características de operación de los relevadores, son las temperaturas muy altas o extremadamente bajas. Aunque para nuestro problema los cambios de temperatura

se presentan, se consideran pequeños y su promedio no se desvía mucho de los extremos, en otras palabras no es un condicionante especial que nos exija un tipo de relevador que soporte sin afectarse, los cambios bruscos de temperatura.

La humedad puede afectar también a nuestros relevadores diferenciales, pero realmente no se tomará en cuenta por no ser un factor ambiental de nuestro problema.

En conclusión, el relevador diferencial que seleccionaremos será tomado de alguno de los mencionados en el capítulo tres, sin anotaciones especiales de diseño para el fabricante.

5.8.1 Requisitos. Estos se derivan de las condiciones de operación del transformador, las cuales a su vez dependen de la carga que se va a alimentar, es decir la carga define la funcionalidad del transformador, ya que no es lo mismo una ausencia de energía eléctrica momentánea que una prolongada. Para el caso tratado el relevador debe cumplir con lo siguiente:

5.8.1.1 Debe ser de alta velocidad de operación. No es útil para nuestro problema relevadores de baja velocidad,

a los cuales se les diseña con retraso de operación de aproximadamente 0.2 segundos con el fin de que los interruptores no se abran cuando ocurra una falla externa o cuando se presente la corriente de magnetización. Por el contrario debe tener una respuesta casi instantánea ante una falla interna.

5.8.1.2 Tener la sensibilidad adecuada para funcionar en forma segura durante fallas internas, de modo que otro tipo de fallas no saquen de operación a la planta cuando no sea extremadamente necesario. Para un relevador de alta velocidad esto se logra con la característica de porcentaje variable y con la unidad de restricción de armónicas, por lo que este requisito y el anterior están uno en función del otro.

5.8.1.3 Debe tener acoplamiento para dos devanados, ya que cuando se usa un transformador con tres devanados las características en las conexiones y en el diseño del relevador varían considerablemente, por ejemplo del lado de alta tensión deberán estar conectados dos transformadores de corriente en paralelo y el relevador diferencial deberá contener tres bobinas de restricción. Esto sirve para darse una idea de cómo varían los criterios de

selección de un mismo tipo de relevador cuando se cambian las características del elemento a proteger.

5.8.1.4 Deberá estar diseñado para operar a 60 hertz y ser además monofásico.

5.8.1.5 Deberá cumplir con las condiciones de costo mínimo.

En los cinco puntos anteriores se resumen los requisitos que debe cumplir la protección diferencial, ya que otros están implícitos dentro de los anteriores como por ejemplo la especificación de temperatura viene incluida dentro de la rapidez de operación.

5.8.2 Cómo Seleccionar el Relevador. En los siguientes párrafos seguiremos la secuencia que consideramos adecuada para seleccionar el relevador diferencial que utilizaremos. Para esto nos basaremos únicamente en los tipos de relevadores que describimos en el capítulo tres, aunque existan otras fábricas diferentes a las mencionadas que también produzcan estos tipos de relevadores.

Para seleccionar el relevador debemos apoyarnos en primer lugar en los requisitos que debe cumplir su diseño para

cubrir las necesidades de operación de la planta de papel y en segundo lugar haremos referencia a sus características de operación, las cuales serán finalmente las que permitirán seleccionar a uno entre los demás en caso de que todos cumplan cabalmente con los requerimientos señalados.

A continuación y tomando en cuenta lo descrito en el párrafo anterior, describiremos brevemente la utilidad de cada tipo de relevador en nuestro problema desechando aquellos que no nos puedan ser útiles.

5.8.2.1 Tipo CA. Este tipo de relevador de la fábrica Westinghouse cuenta con una unidad diferencial que funciona de acuerdo al ajuste de pendiente de fábrica, es decir tiene característica de porcentaje constante, lo cual lo hace menos sensible a variaciones en las corrientes de desajuste que circulan por sus bobinas de restricción y operación.

Es un relevador monofásico, a 60 hertz, 127 Volts, pero no cuenta con una unidad de restricción de armónicas; consecuentemente no es un relevador de alta velocidad ya que para no operar durante la energización del transformador, se diseña con un retraso en tiempo de respuesta.

De acuerdo a las características mencionadas podemos decir que no se adapta a nuestras necesidades.

5.8.2.2 Tipo ITE - 87T. Está diseñado para acoplarse a dos o tres devanados. Su tamaño, comparado con el HU o BDD es menor, por lo que sólo se puede utilizar en tableros de relevadores que permitan la instalación de dispositivos de su tamaño. Esto elimina su posible utilización en la protección del transformador estudiado, debido a que el diseño de los tableros donde se instalarán los relevadores corresponden a un tamaño tipo HU o BDD.

La Brown Boveri también produce los relevadores tipo DT - 92, son trifásicos y poseen las características necesarias para su aplicación en nuestro problema. Lamentablemente, debido a su sofisticación de diseño son dispositivos muy costosos como se puede ver en la Tabla 2., esto lo hace muy distantes de nuestros alcances económicos.

5.8.2.3 Tipo HU y BDD15B. Aunque corresponden a diferentes fábricas, contienen las mismas unidades que les proporcionan características de funcionamiento casi idénticas.

Cumplen con todos los requisitos planteados, pero habrá que seleccionar alguno de los dos.

Remitiéndonos a las características de operación, observamos que el tipo HU requiere un voltaje de operación un poco menor que el BDD y su respuesta ante una falla interna es de dos ciclos aproximadamente, mientras que el BDD opera en 2.25 ciclos aproximadamente.

Funcionalmente el BDD se diferencia del HU en que en el primero la unidad de restricción de armónicas y la unidad diferencial están en paralelo dentro del circuito de disparo de corriente directa, de tal forma que una puede funcionar independientemente de la otra; por el contrario el HU tiene las mismas unidades en serie, de forma que para que se cierre el circuito de disparo deberán funcionar estas dos unidades.

Debido a que los relevadores antes mencionados cumplen funcionalmente con nuestros requisitos, el costo será la característica en la que nos apoyaremos para definir la selección.

La Tabla 2. nos permite comparar éstos dos relevadores en términos de costo. Si observamos, el BDD15B es mucho más costoso que el HU, por lo que seleccionaremos éste último.

Cabe señalar como ventaja para el comprador, que la fábrica Westinghouse proporciona mantenimiento rápido, entrega el producto casi inmediatamente después de la compra y acepta un 30% de anticipo, mientras que la otra exige un 50%.

TABLA 2. TABLA COMPARATIVA DE COSTOS

| FABRICA          | TIPO      | COSTO (DOLARES)       |
|------------------|-----------|-----------------------|
| Westinghouse     | HU        | 1546                  |
|                  | HU - 1    | 1577                  |
|                  | CA        | 653                   |
| General Electric | BDD15B    | 5675                  |
|                  | BDD16B    | 7060                  |
| Brown Boveri     | ITE - 87T | 1120                  |
|                  | DT - 92   | 7100 (Francos Suizos) |

\*\* Dolar a 1553 pesos/dolar (1987).

\*\* Condiciones del mercado (Agosto-Septiembre de 1987).

## 6. CALIBRACIONES Y AJUSTES

Teniendo ya seleccionado el relevador diferencial se procede a instalarlo en el tablero de protecciones ubicado en la subestación de la planta de Mexicana de Papel Periódico.

El siguiente paso importante será la calibración y ajustes que se le darán al relevador para acoplarlo al transformador de potencia, cuyas características se muestran en la Figura 6.1.

Para ajustar el relevador se deben hacer ciertos cálculos. Cuando se determinan las derivaciones correctas, se debe hacer la conexión de los transformadores (bobinas) del relevador, colocando los tornillos de conexión en los huecos correspondientes de la placa que se encuentra al frente de éste. Solamente un tornillo de la derivación deberá insertarse en algún hueco de algunas de la hileras horizontales de la tablilla de derivaciones.

La unidad indicadora de cierre de contactos (ICS) no requiere ajustes, excepto en la selección de las derivaciones de 0.2 ó 2 amperes, en los relevadores HU.

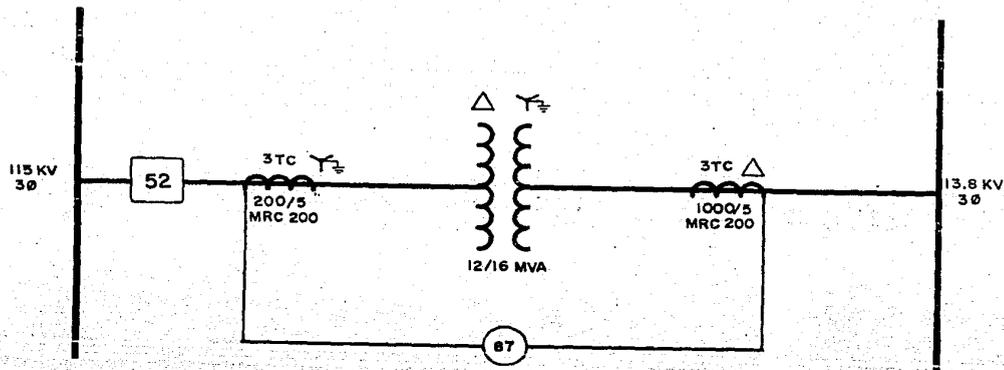


FIGURA 6-1

FACULTAD DE  
INGENIERIA  
**UNAM**

TESIS

CRUZ RAMIREZ LUIS.A  
DIAZ ESPELETA LUIS.E  
SANCHEZ MENDEZ GERARDO

La derivación de 0.2 amperes se utiliza cuando el voltaje del circuito de disparo es de 125 ó 250 volts de d.c. y la de 2 amperes para 48 volts de d.c..

Esta selección se hace para designar el ajuste, por medio de los tornillos conectores o de conexión y también para conectar el indicador que se localiza al frente de la tablilla de derivaciones.

La unidad indicadora de disparo instantáneo no requiere ajuste. Esta es ajustada en la fábrica para la siguiente operación:

- Los relevadores HU y HU-1 tienen un ajuste equivalente a diez veces el valor de la corriente en la derivación.
- El relevador HU-4 tiene un ajuste equivalente a quince veces el valor de la corriente en la derivación.

Ya no se requieren otros ajustes aparte de los anteriormente mencionados.

Para calcular el ajuste requerido de la derivación y la verificación del funcionamiento de los transformadores de corriente se requiere la siguiente información:

- Máxima capacidad del transformador de potencia (KVA)m.
- Corriente de falla externa máxima .

- Voltajes nominales del transformador de potencia en baja tensión y alta tensión (VA, VB).
- Relación de transformación de los transformadores de corriente, a plena derivación (Nt).
- Clase de precisión del transformador de corriente, "C" (o curva de excitación o factor de corrección de relación).
- Resistencia del cable de conexión entre el Transformador de corriente y el relevador en una sola dirección a 25 grados centígrados (R1) (cuando se usa la curva de excitación, incluir la resistencia del devanado del Transformador de corriente).
- Conexiones de los transformadores de corriente (estrella o delta).
- Resistencia del devanado secundario del transformador de corriente (Rs), proporcionada por el fabricante.

## 6.1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO

6.1.1 Seleccionar las derivaciones del transformador de corriente cuando sean, donde se usen con relaciones múltiples. Seleccionar una derivación para aproximadamente

cinco amperes secundarios para carga máxima conectada. Esto proporcionará gran sensibilidad y no producirá problemas térmicos al transformador de corriente, indicadores o al relevador. Una mejor sensibilidad puede ser lograda con la selección de una derivación que da más de cinco amperes si se tiene cuidado con la capacidad de los transformadores de corriente y el relevador. Para determinar la estabilidad del relevador, se debe usar durante dos horas con máxima carga, para que alcance su temperatura final y entregue una respuesta real.

La relación de transformación debe ser tal, que la corriente que circula por los relevadores pueda ser adecuadamente balanceada, por medio de las derivaciones del relevador (la corriente mayor debe ser inferior a tres veces la corriente menor).

6.1.2 Calcular las corrientes del relevador,  $I_r$ . Estas deberán ser proporcionales a la derivación seleccionada en el relevador para tener un valor aproximado.

6.1.3 El cálculo de la relación de corrientes del relevador se hará usando la corriente más pequeña como referencia.

6.1.4 Selección de la relación de las derivaciones. Esta se hace aproximadamente igual a la relación de corriente del relevador con base en la Tabla 3. Se escoge primero la relación de las derivaciones usando la relación de corrientes más grande que se calculó en el paso anterior; las otras relaciones serán determinadas usando la derivación más baja de la primera relación como referencia. Las corrientes del relevador ( $I_r$ ) no deberán exceder el valor continuo (D.C.) como se define en la Tabla de requerimientos del relevador. (Ver Tabla 3.).

6.1.5 Verificar la operación del indicador de disparo instantáneo. El ajuste de operación del indicador de disparo instantáneo es diez veces el valor de la derivación para el relevador HU y HU-1 o quince veces el valor de la derivación para el relevador HU-4. Por lo tanto el error máximo de corriente simétrica, el cual está fluyendo en el circuito diferencial durante la corriente de falla externa que es debida a la diferencia de saturación de los transformadores de corriente, no deberá exceder de diez a quince veces el valor de la derivación del relevador.

**TABLA 3. DERIVACIONES DISPONIBLES EN EL RELEVADOR  
DIFERENCIAL HU.**

|     | 2.9   | 3.2   | 3.5   | 3.8   | 4.2   | 4.6   | 5.0   | 8.7   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.9 | 1.000 | 1.103 | 1.207 | 1.310 | 1.448 | 1.586 | 1.724 | 3.000 |
| 3.2 |       | 1.000 | 1.094 | 1.188 | 1.313 | 1.438 | 1.563 | 2.719 |
| 3.5 |       |       | 1.000 | 1.086 | 1.200 | 1.314 | 1.429 | 2.486 |
| 3.8 |       |       |       | 1.000 | 1.105 | 1.211 | 1.316 | 2.289 |
| 4.2 |       |       |       |       | 1.000 | 1.095 | 1.190 | 2.071 |
| 4.6 |       |       |       |       |       | 1.000 | 1.087 | 1.890 |
| 5.0 |       |       |       |       |       |       | 1.000 | 1.740 |
| 8.7 |       |       |       |       |       |       |       | 1.000 |

6.1.6 Determinar el desbalance (mismatch). El desbalance de corriente en el relevador deberá ser lo más pequeño posible, ajustándolo con las derivaciones del relevador.

Para el transformador de potencia que se desea proteger, se define el porcentaje de desbalance como sigue:

Para  $IRA > IRB$ ,

$$\% \text{ desbalance} = (((IRB / IRA) - (TB / TA)) / S) \times 100$$

Para  $IRB > IRA$ ,

$$\% \text{ desbalance} = (((TB / TA) - (IRB / IRA)) / S) \times 100$$

Donde S es el término más pequeño de los  $(IRB / IRA)$  ó  $(TB / TA)$ .

Cuando se realizan cambios de derivación bajo carga, los relevadores deberán ser ajustados con base a la posición media o neutral de las derivaciones.

El desbalance total, incluyendo el cambio automático de la derivación, no deberá exceder el 15% teniendo 30% de sensibilidad y un 20% con 35% de sensibilidad en el relevador. Existen gráficas del fabricante del relevador con amplio margen de seguridad con estos niveles de desbalance.

6.1.7 Verificar el funcionamiento de los transformadores de corriente. El error de la relación de transformación no deberá exceder del 10% con máxima falla externa simétrica, como se dijo anteriormente. Un método correcto para determinar el error de relación, es usando las curvas del

factor de corrección de relación (RCF); un segundo método es utilizando la clasificación de precisión ANSI, como se mencionó al comienzo del capítulo.

#### 6.1.8 Cálculos para el ajuste del relevador HU.

##### 6.1.8.1 Selección de la relación de transformación.

| ECUACION                                  | LADO DE BAJA           | LADO DE ALTA          |
|---|------------------------|-----------------------|
| (KVA) <sub>m</sub>                        | 16000                  | 16000                 |
| $I_p = \frac{\text{-----}}{\text{-----}}$ | $= 669.4 \text{ A}$    | $= 80.3 \text{ A.}$   |
| $(KV) \times \sqrt{3}$                    | $13.8 \times \sqrt{3}$ | $115 \times \sqrt{3}$ |
| La relación es :                          | 800 / 5                | 100 / 5               |

##### 6.1.8.2 Cálculo de corrientes del relevador.

| ECUACION                                  | LADO DE BAJA                 | LADO DE ALTA            |
|---|------------------------------|-------------------------|
| $I_p$                                     | 669.4                        | 80.33                   |
| $I_s = \frac{\text{-----}}{\text{-----}}$ | $= 4.18 \text{ A.}$          | $= 4.02 \text{ A.}$     |
| N   | 160                          | 20                      |
| $I_r =$                                   | $IRB = 4.18 \times \sqrt{3}$ | $IRA = 4.02 \text{ A.}$ |
|   | $IRB = 7.2463 \text{ A.}$    |                         |

6.1.8.3 Cálculo de la relación de corrientes.

IRB 7.2463

---- = ----- = 1.81

IRA 4.02

6.1.8.4 Selección de la relación de derivaciones de la Tabla 3.

TB 8.7

-- = ---- = 2.071.

TA 4.2

| ECUACION                          | LADO DE BAJA | LADO DE ALTA |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Ir > valor continuo del relevador | No           | No           |

6.1.8.5 Verificar la operación de la unidad indicadora de disparo instantáneo (ITT).

| ECUACION  | LADO DE BAJA | LADO DE ALTA |
|---|--------------|--------------|
| Error máximo de corriente simétrica debe ser mayor que diez veces la derivación del relevador | No           | No           |

6.1.8.6 Determinar el porciento de desbalance.

$$\% \text{ desbalance} = \frac{(TB / TA) - (IRB / IRA)}{(IRB / IRA)} \times 100$$

$$\% \text{ desbalance} = \frac{2.071 - 1.81}{1.81} \times 100 = 14.42$$

Se cumple que : %desbalance < 15%

6.1.8.7 Verificar el funcionamiento de los transformadores de corriente.

| ECUACION        | LADO DE BAJA              | LADO DE ALTA                    |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
|                 | 0.45                      | 0.15                            |
| Zt =            | 3.4R1 + -----<br>TB       | 1.13R1 + -----<br>TA            |
|                 | 0.45                      |                                 |
| R1 = 0.215 ohms | 3.4(0.215) + -----<br>8.7 | 1.13(0.215) +<br>+ (0.15 / 4.2) |
|                 | Zt = 0.738 ohms           | Zt = 0.278 ohms                 |
| N               | 160                       | 20                              |
| Np = -----      | ----- = 0.8               | ----- = 0.5                     |
| Nt              | 200                       | 40                              |

|                     |                  |                  |
|---------------------|------------------|------------------|
| $N_p \times V_{c1}$ | $0.8 \times 200$ | $0.5 \times 200$ |
| ----- =             | ----- = 1.6      | ----- = 1        |
| 100                 | 100              | 100              |

|                     |    |    |
|---------------------|----|----|
| $N_p \times V_{c1}$ |    |    |
| ----- > Zt          | 8i | 5i |
| 100                 |    |    |

Finalmente las derivaciones seleccionadas son para baja y alta tensión, respectivamente:

$$TB = 8.7$$

$$TA = 4.2$$

## 6.2 COMENTARIOS.

Los cálculos se hicieron con las derivaciones de los transformadores de corriente correspondientes a las corrientes nominales del transformador de potencia.

El relevador con 30% de sensibilidad es adecuado para nuestras necesidades. R1 se calculó con base en un conductor por fase de calibre 12 AWG con una longitud de 40 metros y apoyándonos en los manuales de Condumex.

De la misma manera se hacen los siguiente ajustes para la utilización de otro tipo de relevador, dependiendo de la marca y calidad. Cada fabricante proporciona al comprador, un instructivo de ajustes y calibraciones.

## 7. CONCLUSIONES

La importancia de proteger un transformador de potencia es muy considerable, ya que es un elemento que trabaja continuamente a diferentes niveles de carga y por consiguiente está expuesto a fallas inoportunas.

Para transformadores de potencia relativamente pequeños se utilizan generalmente como elementos de protección a los fusibles, porque la capacidad del transformador lo permite y además porque su costo es menor que el de una protección diferencial. Además, hablando técnicamente, el relevador diferencial presenta amplias ventajas sobre los fusibles ya que éstos no distinguen entre las fallas internas y las externas ni detectan corrientes de magnetización.

Hay que destacar, que existen otros fabricantes de relevadores diferenciales aparte de los que se mencionaron, con características de diseño que nos permitirían utilizarlos en nuestra aplicación, pero existe una

limitante real que consiste en que algunos representantes de las transnacionales de los equipos eléctricos no proporcionan toda la información solicitada para ningún equipo, si el solicitante no es un comprador formal. Esto constituye indudablemente una restricción para una persona que esté haciendo un análisis funcional y de costos entre varios fabricantes de un mismo dispositivo, pero creemos que finalmente con la información obtenida de tres fabricantes diferentes fué suficiente para la selección hecha, ya que la Westinghouse, General Electric y Brown Boveri han creado un gran radio de extensión de sus productos, que los hacen en la actualidad las grandes empresas de la producción de equipos de protección para sistemas eléctricos de potencia en México.

Cuando ya se tienen los candidatos que representen los productos a utilizar, hay que hacer dos consideraciones especiales para elegir uno de ellos:

**Mantenimiento, montaje y tiempo de entrega del producto.**

En este sentido las fábricas norteamericanas conservan una pequeña ventaja sobre las europeas para consumidores latinoamericanos, debido a que los lugares originales de fabricación se encuentran distantes uno del otro por lo que la diferencia en el tiempo de entrega del producto y el

mantenimiento del mismo pueden ser considerables, sólo para ciertos casos, ya que generalmente estas empresas poseen sucursales en toda América Latina. Es por esto que se recomienda antes de comprar un relevador, investigar y comparar el tiempo normal de su mantenimiento, montaje y entrega y luego elegir la opción más conveniente.

**Selección del tablero de protecciones.** Estos constituyen los soportes donde se colocarán los relevadores de protección para la subestación eléctrica.

Cuando se desarrolla un proyecto general sobre las protecciones de los elementos de una subestación, se acostumbra a designar a una determinada empresa como responsable del diseño y la selección del tablero de protecciones y a otra diferente o al equipo de ingenieros encargados del diseño general, para que seleccionen los tipos y las marcas de los relevadores de protección. Si éstos dos equipos de trabajo no realizan sus funciones en coordinación mutua, puede originarse que uno sea limitante del otro; por ejemplo si al seleccionar los relevadores, los tableros de protección ya han sido diseñados y montados, dicha selección estará restringida a dispositivos que ocupen el espacio designado para ellos en

el tablero y que además puedan conectarse fácil y adecuadamente al circuito de disparo de los interruptores.

Finalmente, el criterio ingenieril será definitivo para la selección de los elementos de protección. Esta decisión última se hace entre todo el grupo encargado, para integrar conocimientos y experiencias de costos de los equipos que concluyan en un final acertado del proyecto.

Consideramos que este trabajo será de suma importancia para toda persona que tenga problemas en la selección de la protección diferencial para cualquier transformador de potencia, sirviéndole como guía o referencia en un proyecto de protecciones de un sistema eléctrico de potencia.

**BIBLIOGRAFIA.**

**WESTINGHOUSE.** Manual de Relevadores Diferenciales HU, HU-1,  
HU-4. Diciembre, 1984.

**GENERAL ELECTRIC.** Manual de Relevadores Diferenciales  
BDD15B y BDD16B.

**BROWN BOVERI.** Boletín del Relevador ITE - 87t y del  
módulo diferencial DT - 92.

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS .** Engineers Relay  
Handbook.

**COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.** Protección de  
Transformadores de Potencia.

**I.E.E.E..** Transactions on Power Apparatus and Systems.  
Diciembre, 1985.

**I.E.E.E..** Libro Red Norma Ansi. Electric Power.  
Std 141-1976

**WEEDY, B.M..** Sistemas Eléctricos de Potencia.

ZOPETTI. Estaciones Transformadoras y de Distribución.

RAVINDRANATH, B y CHANDER, M. Protección de Sistemas de  
Potencia.

RUSSEL MASON, C. El Arte y la Ciencia de la Protección  
por Relevadores. Editorial Cecsa. Noviembre, 1984.  
Decimoprimer Edición.

**ANEXO 1. SIMBOLOGIA.**

**IA, IB, IC** = Corrientes del transformador de potencia del lado primario de las fases A, B, C respectivamente.

**IA; IB; IC'** = Corrientes secundarias de los transformadores de corriente del lado primario del transformador de potencia, de las fases A, B, C respectivamente.

**Ia, Ib, Ic** = Corrientes del transformador de potencia del lado primario de las fases a, b, c respectivamente.

**Ia; Ib; Ic'** = Corrientes del transformador de potencia de lado primario de las fases a, b, c respectivamente.

**Bo** = Bobina de operación del relevador.

**BR** = Bobina de restricción del relevador.

**ID** = Corriente diferencial.

**Io** = Corriente de excitación de los transformadores de corriente.

**Ip** = Corriente primaria de los transformadores de corriente.

- $I_s$**  = Corriente secundaria de los transformadores de corriente.
- $Z_t$**  = Impedancia o burden total de carga en los transformadores de corriente.
- $R_{ta}$**  = Relación de transformación nominal de los transformadores de corriente conectados en el lado de alta tensión del transformador de potencia.
- $R_{tb}$**  = Relación de transformación nominal de los transformadores de corriente conectados en el lado de baja tensión del transformador de potencia.
- $n$**  = Índice de sobreintensidad o sobrecarga en los transformadores de corriente
- $R_l$**  = Resistencia del cable de conexión entre el transformador de corriente y el relevador (una sola dirección).
- $Z_r$**  = Impedancia de una de las bobinas de restricción en la derivación usada.
- $Z_a$**  = Impedancia de algún otro relevador o medidor incluido en el circuito.
- $R_s$**  = Resistencia del devanado secundario del transformador de corriente, incluyendo sus puntas.
- $B$**  = Impedancia de un devanado de restricción mas la impedancia de la bobina de operación del relevador (en la derivación usada).

- N = Número de vueltas en el secundario del transformador de corriente en la derivación usada.
- Nt = Número de vueltas totales en el transformador de corriente (secundarias)
- Np = Proporción de vueltas usadas en el transformador de corriente.
- e = Resistencia por vuelta del devanado secundario, en miliohms.
- f = Resistencia de una punta de conexión interna del transformador de corriente, en miliohms.
- Vs = Voltaje secundario requerido en el transformador de corriente.
- Vcl = Voltaje clase "C" de precisión.
- Iext = Corriente máxima simétrica externa en amperes secundarios.
- IRB = Corriente dirigida al relevador por el lado de baja tensión del transformador de potencia.
- IRA = Corriente dirigida al relevador por el lado de alta tensión del transformador de potencia.
- VA = Voltaje nominal entre fases del lado de alta tensión del transformador de potencia.
- VB = Voltaje nominal entre fases del lado de baja tensión del transformador de potencia.

- TB = Ajuste de la derivación para el relevador del lado de baja tensión.
- TA = Ajuste de la derivación para el relevador del lado de alta tensión.
- ei = Error de relación del transformador para cada transformador de corriente.