

**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD
Y COMPUTACION**

**" DISPOSITIVOS OPTICOS DIGITALES PARA MEDICION
Y PROTECCION EN SISTEMAS DE ALTA TENSION "**

TESIS DE GRADO

**PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE :
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

ESPECIALIZACION : POTENCIA

PRESENTADA POR:

JORGE JOSE ALVARADO SALCEDO

GUAYAQUIL – ECUADOR

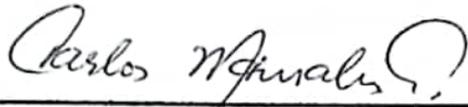
2002

DEDICATORIA

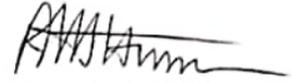
A Dios y a mis Padres, quienes con su invaluable ayuda , hicieron posible la realización de este proyecto a lo largo de toda mi carrera.

AGRADECIMIENTO

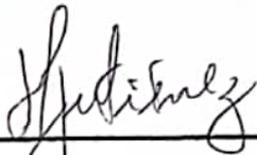
AL ING. ALBERTO HANZE BELLO,
Director de Tesis, por la valiosa colaboración
y ayuda prestada a la realización de esta Tesis



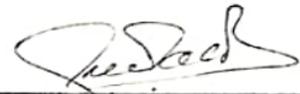
Ing. Carlos Monsalve A.
SUBDECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



Ing. Alberto Hanze B.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Hernán Gutierrez V.
MIEMBRO PRINCIPAL

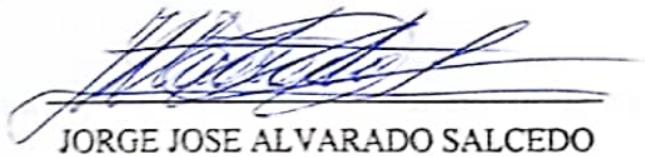


Ing. Juan Gallo G.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).



JORGE JOSE ALVARADO SALCEDO

DECLARACION EXPRESA

“LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y , EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**”.

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).

JORGE JOSE ALVARADO SALCEDO

RESUMEN

Los dispositivos ópticos han estado constantemente evolucionando y tomando fuerza con el paso de los años, pese a que en su concepción fueron descubiertos en base a principios físicos muchos años atrás, en los últimos tiempos su aplicación se ha acrecentado. Estos elementos tienen múltiples aplicaciones en diferentes campos, pero en lo que concierne a sistemas de alta tensión estos dispositivos han cambiado en su totalidad la forma convencional de medición y protección en Subestaciones Eléctricas.

Transformadores Convencionales de Voltaje y Corriente para medición y protección son los comúnmente usados en los actuales momentos en estos Sistemas, pero están dando paso a los nuevos Transformadores denominados ópticos, que utilizan una metodología totalmente diferente a la anterior utilizada dentro de la cual los efectos ópticos son la base de los mismos. Complementados por un sistema de comunicación vía Fibra Óptica estos instrumentos se convierten en sistemas totalmente digitalizados con enormes ventajas para el usuario.

En base a lo establecido, el presente trabajo se inicia realizando un análisis de los Fundamentos Físicos en los cuales se basan los dispositivos ópticos digitales.

Definidos estos efectos que son la base de estos dispositivos ópticos se hace un estudio de los Transductores Ópticos de Voltaje y Corriente en las cuales se establecen sus características, principios de operación, componentes, etc. Además de

un breve complemento de la unión de estos dos Transductores como un solo elemento, característica que lo diferencia de los instrumentos convencionales.

Establecida la funcionalidad de estos instrumentos, se procede a detallar el sistema de comunicación mediante elementos denominados Fibras Ópticas bajo los cuales el Sistema se convierte totalmente en digital, con menos pérdidas, mayor precisión para medición y protección y un alto grado de confiabilidad.

Además de todos estos aspectos se realiza un análisis comparativo de este tipo de instrumentos (Transformadores Ópticos digitales de Voltaje y Corriente) frente a los Convencionales, tanto técnico como económico para profundizar más acerca del tema.

Para finalizar se realiza un estudio de ciertos instrumentos que utilizan en un mismo elemento tanto la tecnología Convencional así como la óptica, además se analiza otro tipo de instrumentos ópticos estableciendo conclusiones y recomendaciones.

INDICE GENERAL

| | Pág |
|-------------------|------|
| RESUMEN | VI |
| INDICE GENERAL | VIII |
| INDICE DE FIGURAS | XII |
| INTRODUCCION | 14 |

| | |
|--|----|
| • CAPITULO I | |
| FUNDAMENTOS FISICOS ACERCA DE LOS DISPOSITIVOS OPTICOS DIGITALES | |
| 1.1 Aspectos Generales | 17 |
| 1.2 Fenómenos Físicos en que se basan los dispositivos Opticos Digitales | 19 |
| 1.2.1 Efecto de Rotación de Faraday | 19 |
| 1.2.2 Ley de Ampere | 24 |
| 1.2.3 Efecto Kerr | 25 |
| 1.2.4 Celdas de Pockels | 27 |
| 1.3 Consideraciones Básicas acerca de las Fibras Opticas | 30 |
| • CAPITULO II | |
| TRANSDUCTORES OPTICOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE | |
| 2.1 Transductores Eléctricos | 33 |
| 2.2 Transductor Optico de Corriente | 34 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.2.1 | Principio de Operación del Transductor Optico de Corriente | 34 |
| 2.2.2 | Componentes del Transductor Optico de Corriente | 38 |
| 2.2.3 | Ventajas del Transductor Optico de Corriente | 42 |
| 2.3 | Transductor Optico de Voltaje | 45 |
| 2.3.1 | Principio de Operación del Transductor Optico de Voltaje | 45 |
| 2.3.2 | Componentes del Transductor Optico de Voltaje | 49 |
| 2.3.3 | Diseño del Transductor Optico de Voltaje | 50 |
| 2.3.4 | Tecnología de las Celdas de Pockels aplicadas al Transductor Optico de Voltaje | 53 |
| 2.3.5 | Ventajas del Transductor Optico de Voltaje | 55 |
| 2.4 | Transductor Optico de Voltaje-Corriente | 58 |
| <ul style="list-style-type: none"> • CAPITULO III <p style="text-align: center;">FIBRAS OPTICAS</p> | | |
| 3.1 | Generalidades | 62 |
| 3.2 | Características de un Sistema de medición con Fibra Optica | 63 |
| 3.2.1 | Elementos Básicos de un Sistema de medición con Fibra Optica | 66 |
| 3.2.2 | Sistemas de Comunicación con Fibra Optica | 67 |
| 3.2.3 | Ventajas y Desventajas del Uso de Fibra Optica | 69 |
| 3.2.4 | Inmunidad a las Interferencias de las Fibras Opticas | 71 |

| | |
|---|-----|
| <ul style="list-style-type: none"> • CAPITULO IV | |
| <p style="text-align: center;">APLICACION DE LOS SENSORES OPTICOS DE CORRIENTE EN UNA SUBESTACION.</p> | |
| 4.1 Aspectos Generales | 75 |
| 4.2 Opciones para la interconexión de los sensores ópticos de corriente | 77 |
| 4.2.1 Salida digital hacia un medidor o relé digital | 78 |
| 4.2.2 Salida análoga de baja energía hacia un medidor o relé análogo | 80 |
| 4.2.3 Salida análoga de alta energía hacia un medidor análogo | 81 |
| 4.3 Selección del sensor óptico de corriente para medición. | 84 |
| 4.4 Sensores ópticos de corriente para medición. | 87 |
| <ul style="list-style-type: none"> • CAPITULO V | |
| <p style="text-align: center;">ANALISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSDUCTORES OPTICOS VS. CONVENCIONALES</p> | |
| 5.1 Transductor Optico de Corriente vs. Transformador Convencional de Corriente | 93 |
| 5.2 Transductor Optico de Voltaje vs. Transformador Convencional de Voltaje | 95 |
| 5.3 Análisis económico de los Sensores Opticos vs. Sensores Convencionales | 96 |
| 5.3.1 Sensores Opticos de Corriente vs. Sensores Convencionales de Corriente | 98 |
| 5.3.2 Sensores Opticos de Voltaje vs. Sensores Convencionales de Voltaje | 103 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.3 Sensores de Corriente-Voltaje vs. Sensores Convencionales | 107 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 111 |
| ANEXOS | 114 |
| BIBLIOGRAFIA | 118 |

INDICE DE FIGURAS

| No. | | Pág |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Efecto de rotación de Faraday | 23 |
| 1.2 | Ley de Ampere | 24 |
| 1.3 | Efecto Kerr | 26 |
| 1.4 | Celda Pockels | 29 |
| 2.1 | Descripción del transductor óptico de corriente | 38 |
| 2.2 | Componentes del transductor óptico de corriente | 39 |
| 2.3 | Funcionamiento del transductor óptico de corriente | 40 |
| 2.4 | Transductor óptico de corriente | 44 |
| 2.5 | Celda Pockels para medición del campo eléctrico | 52 |
| 2.6 | Celda Pockels aplicadas al transductor óptico de voltaje | 54 |
| 2.7 | Transductor óptico de voltaje | 57 |
| 2.8 | Transductor óptico de voltaje y corriente | 61 |
| 3.1 | Característica de la fibra óptica | 64 |
| 3.2 | Elementos básicos de un sistema de medición con Fibra óptica | 67 |
| 4.1 | Sensor óptico de corriente con salida digital hacia medidor digital o relé | 79 |
| 4.2 | Sensor óptico de corriente con salida análoga de baja energía hacia medidor análogo o relé | 81 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.3 | Sensor óptico de corriente con salida análoga de alta energía hacia medidor análogo | 82 |
| 4.4 | Sensor óptico de corriente con salida análoga de alta Energía sumada con un CT convencional | 83 |
| 4.5 | Diferentes tipos de potencia eléctrica | 86 |
| 4.6 | Valores medidos con un sensor de corriente con determinado número de vueltas | 89 |
| 4.7 | Componentes físicos del sensor de corriente | 89 |

1) INTRODUCCION

Desde los inicios de la Generación eléctrica, sistemas convencionales han estado rigiendo la misma, mecanismos tales como generadores propios de las Centrales eléctricas, líneas de Transmisión en alta y Baja Tensión , Transformadores de Voltaje y Corriente, etc

Son sistemas convencionales que se han mantenido y que han tenido gran porcentaje de efectividad. Si citamos el caso de una Subestación eléctrica, sus componentes internos han evolucionado pero manteniendo los mismos parámetros convencionales, hoy en día la tecnología ha variado a favor de nuevos elementos que revolucionan este campo. Dentro de estos términos podremos citar el caso particular de la medición de parámetros dentro de una Subestación, la cual hasta los actuales momentos se ha definido mediante Transformadores de Corriente y de Voltaje con sus características básicas de acuerdo al rango de voltaje que se manejen, nivel de Aislamiento, etc , estos son los llamados instrumentos de medición indirecta convencionales, los cuales tienen un alto rendimiento pero tienen algunas desventajas como el rango de precisión . Aprovechando estos avances de la ciencia y utilizando conocimientos antiguos y modernos, investigadores han desarrollado nuevos métodos de medición indirecta basándose en los mismos parámetros como son los transformadores de corriente y voltaje pero usando una nueva tecnología, bajo los métodos convencionales pero aplicando además sistemas electrónicos y ópticos para mayor precisión de

lectura. En Subestaciones típicas de Alta Tensión la precisión en cuanto a la medición es muy importante y significativa. Esta es la razón del porque del progreso de estos instrumentos y sus múltiples ventajas en comparación con los anteriores.

Estos sistemas se han perfeccionado con el paso de los años, hasta llegar a los actuales momentos, donde su utilización es muy considerada en varios países del mundo dejando a lado muchas veces el costo de esta tecnología porque los réditos que obtendrán compensarán los mismos.

El objetivo principal de este trabajo es la difusión de estos elementos cuya tecnología ha innovado el campo de la medición indirecta a nivel de Sistemas de Alta Tensión, además de los sistemas de comunicación y sus respectivas aplicaciones.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS FISICOS ACERCA DE LOS DISPOSITIVOS OPTICOS DIGITALES

Los métodos ópticos para la medición de corriente y voltaje en los sistemas de alta tensión han estado atrayendo más interés en los años recientes. Esto es debido a las ventajas que estos métodos ofrecen sobre los transformadores convencionales para instrumentos de medición. Estos nuevos instrumentos son inmunes a las interferencias electromagnéticas, son mucho más ligeros y fáciles de transportar e instalar.

El método de convertir la señal análoga medida a una forma digital es ampliamente usada en todos los campos donde la adquisición de datos es empleada. La precisión de una señal digital es determinada cuando esta puede ser transmitida, almacenada y procesada sin errores adicionales. Esta propiedad es de gran importancia en subestaciones de Alta Tensión debido a que el ambiente electromagnético puede producir inconvenientes como errores en la lectura final y la habilidad de monitorear valores debe ser precisa y segura.

Las señales luminosas son insensibles a las perturbaciones electromagnéticas y además excelentes para propósitos de transmisión de datos. Para reducir estas perturbaciones en la señal medida se utilizan fibras ópticas para la transmisión de la

señal desde el transductor al equipo de interface ubicado en el cuarto de control de la subestación.

Si consideramos específicamente acerca de estos nuevos instrumentos de medición basados en sensores ópticos (sensor de corriente – sensor de voltaje) se puede recalcar que durante los últimos 15 años, hablando de los sensores ópticos de corriente, han recibido una significativa atención por un grupo de investigadores alrededor del mundo, han catalogado a estos instrumentos como la nueva generación de elementos de medición para sistemas de Alto Voltaje, con una visión actual para reemplazar la industria de la energía eléctrica.

1.1. ASPECTOS GENERALES

Mediciones convencionales en sistemas de alto voltaje y corriente confiaban años atrás en la medida de consumo de una pequeña cantidad de energía desde el sistema. Por ejemplo, un divisor resistivo representaba algunas pequeñas cantidades de corriente.

En vez de la medición directa de la cantidad de interés se puede medir los cambios en las propiedades de algunos materiales como resultado de la energía eléctrica circundante o campo magnético. La energía requerida para la realización de la medición es provista por el propio equipo de medición. Un grupo de estas técnicas confió en los cambios de las propiedades ópticas de ciertos materiales en campos eléctricos y magnéticos: El efecto de KERR, el efecto de POCKELS y el efecto de FARADAY.

Estas técnicas, las cuales están basadas en fenómenos físicos conocidos, determinaron que un material cambia o rota el plano de polarización de la onda luminosa que pasa a través del mismo. La cantidad de rotación depende del campo eléctrico o magnético. La ejecución está determinada por la precisión en que se pueda medir el cambio de polarización de la onda luminosa.

Si se desea medir el campo eléctrico alrededor de una Bobina Tesla en operación así como las formas de ondas, el sensor electro-óptico podría ser montado sobre una barra larga aislada con cables de fibra óptica para enviar emisiones de Luz desde y hacia la celda de medición. Un esquema alternativo podría ser usar un láser y un apropiado prisma o espejo para enviar la onda luminosa hacia la celda a lo largo del soporte y retornar de nuevo hacia un detector.

En lo que se refiere al medio de comunicación para la aplicación de estos efectos ópticos están las denominadas Fibras Ópticas, que es una aplicación interesante de la reflexión interna total, la cual establece que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, principalmente a las barras de vidrio ó plástico transparente para llevar la luz de un lugar a otro. La luz está confinada a viajar dentro de la barra aún cuando esta tenga doblamientos suaves, debido a la reflexión interna total. Si una línea óptica de transmisión es construida con un haz de fibras paralelas, es posible transmitir imágenes de un extremo a otro. Esta técnica se utiliza en las industrias y se la conoce con el nombre de Fibras Ópticas. Existen pocas pérdidas en la intensidad de la luz debido a la reflexión interna.

Cualquier pérdida de intensidad se debe esencialmente a la reflexión en los dos extremos y a la absorción por el material de las fibras. El campo de las fibras ópticas está incrementando su utilización en las telecomunicaciones con mayor eficiencia que los conductores eléctricos y su utilización está cada día más en auge.

1.2. FENOMENOS FISICOS EN QUE SE BASAN LOS DISPOSITIVOS OPTICOS DIGITALES.

1.2.1. EFECTO DE ROTACION DE FARADAY

Michael Faraday en 1845 descubrió que la manera en que se propaga la luz a través de un medio material puede influenciarse por la aplicación de un campo magnético externo. En particular encontró que el plano de vibración de la luz lineal incidente en un pedazo de vidrio giraba cuando se aplicaba un campo magnético fuerte en la dirección de propagación.

Este efecto magneto-óptico fue una de las primeras indicaciones de la interrelación entre el electromagnetismo y la luz. Aunque recuerda la actividad óptica, hay sin embargo, como veremos, una distinción importante entre los dos efectos.

El ángulo Beta (medido en minutos de arco) que gira el plano de vibración está dado por la expresión determinada empíricamente ($\beta = V \cdot B \cdot d$).

En la que B es la densidad de flujo magnético estático, generalmente en Tesla, d es la longitud del medio atravesado en mm y V es un factor de proporcionalidad conocido como la constante de Verdet.

DESCRIPCION MATEMATICA .

$$\beta = V * B * d$$

Donde

β = Angulo de Rotación (Radianes)

B = Campo Magnético (Tesla)

V = Constante de VERDET (Radianes/(Tesla*mm))

d = Longitud (milímetros)

• *Constante de Verdet (Si la longitud está en milímetros y el campo magnético en Tesla.)*

| | |
|-------------------|--------|
| a) Cuarzo Fundido | 0,004 |
| b) Cristal Denso | 0,11 |
| c) Benceno | 0,0087 |

Ejemplo:

Si se tiene una muestra de 1 cm de largo de H₂O (agua) , dentro de un campo magnético de 1 Tesla (el campo de la tierra es de alrededor de $5 * 10^{-5}$ Tesla) . Cuál es el ángulo de rotación del plano de polarización de la muestra debido al campo magnético?.

Datos:

$$B = 1 \text{ Tesla}$$

$$V_{H_2O} = 0.0131 \text{ (Rad/(Tesla} \cdot \text{mm))}$$

$$d = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

$$\beta = B \cdot V \cdot d$$

$$\beta = (1 \text{ Tesla}) \cdot (0.0131 \text{ (Rad/(Tesla} \cdot \text{mm))}) \cdot 10 \text{ mm}$$

$$\beta = 0.131 \text{ Rad.}$$

El efecto de Rotación de Faraday es un efecto magnético, notable en conductores de vidrio de Alta densidad (grado de Luminosidad), el grado de rotación es proporcional al campo magnético. Un pedazo de fibra de vidrio de 1" de espesor y 2" de diámetro necesitaría un campo de 0.5 Teslas (5000 Gauss) para cambiar o rotar la polarización 90 grados. La rotación es proporcional a la longitud de el camino óptico y al campo magnético, tanto que una pieza de vidrio mucho más larga se constituirá en un mejor detector sensitivo.

El efecto de Rotación de Faraday provee una vía conveniente para medir la intensidad de corriente eléctrica en subestaciones de Alta Tensión. Un pedazo de Fibra de Vidrio es ubicado cerca del cable de energía y un láser polarizado es usado para medir la rotación. En una bobina Tesla, los sensores de fibra de

vidrio conectados por cables de fibra óptica podrían ser usados para medir la corriente en varias partes de la bobina, por ese suceso una fibra de vidrio de apropiado material puede ser usado en el propio sensor.

Hay numerosas aplicaciones prácticas del efecto Faraday. Se puede usar para analizar mezclas de hidrocarburos, ya que cada constitutivo tiene una rotación magnética característica.

Desde la llegada del láser a comienzos de la década de 1960, se ha hecho gran esfuerzo en un intento de utilizar el enorme potencial de la luz láser como un medio de comunicaciones . Una componente esencial de tal sistema es el modulador, cuya función es imprimir información en el haz. Tal dispositivo debe tener la capacidad de variar la onda de luz de alguna manera a altas velocidades y en una forma controlada. Podría, por ejemplo, alterar la amplitud, polarización, dirección de propagación, la fase o la frecuencia de la onda de una manera relacionada con la señal que se va a transmitir. Ya que la rotación de Faraday depende de la componente axial de la magnetización, la corriente de la bobina controla a β . El analizador, que es una segunda lámina polarizadora forma un ángulo θ con el eje de polarización, convierte entonces esta modulación de la polarización a modulación de la amplitud por medio de la ley de Malus, **en la que la intensidad transmitida varía con el cuadrado de la amplitud transmitida**, se puede concluir que la intensidad transmitida varía con

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

Donde I_0 es la intensidad de la onda polarizada que incide sobre el analizador. En resumen, la señal que se va a transmitir se introduce en la bobina como un voltaje modulador y el haz de láser emergente transporta esa información en la forma de variaciones de amplitud.

Una peculiaridad del efecto de rotación de Faraday es que este cambia o rota en la misma dirección (Ej: a favor de las manecillas del reloj o en contra) sin importar en que dirección la onda de luz está viajando. Esto puede ser usado para hacer una válvula de una vía de luz con dos polarizadores a 45 grados uno del otro.

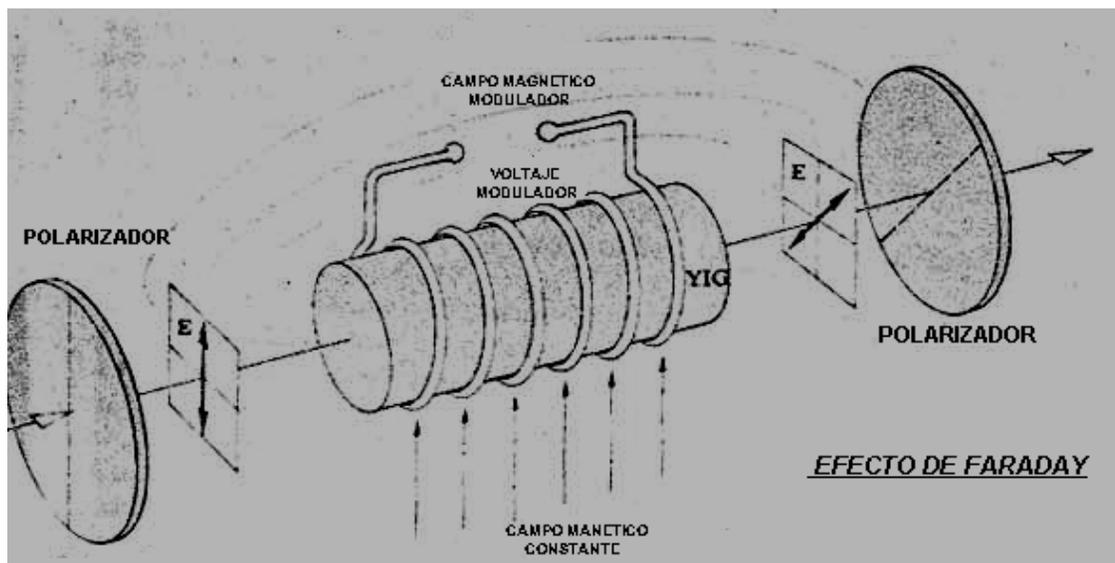


Figura 1.1 Efecto de rotación de Faraday

1.2.2. LEY DE AMPERE

André Marie Ampère nació en 1775, fue un matemático, químico y filósofo francés quién fundó la ciencia del electromagnetismo. Se acredita a Ampère el descubrimiento del electromagnetismo, la relación entre corriente eléctrica y el campo magnético, sus trabajos en este campo fueron influenciados por lo que descubrió el físico danés Hans Oersted. Ampère presentó una serie de trabajos exponiendo la teoría y las leyes básicas del electromagnetismo que él llamaba electrodinámica, para diferenciarlo del estudio de las fuerzas eléctricas estacionarias, el cual llamaba electrostática.

La ley de Ampere expresa que si la onda luminosa es uniformemente sensitiva al campo magnético a lo largo del camino sentido y este camino sentido define un lazo o bucle cerrado, entonces la rotación acumulada del plano de polarización de la onda luminosa debido al campo es directamente proporcional a la corriente fluyendo en el conductor encerrado por el lazo.



Figura 1.2 Ley de Ampere

1.2.3. EFECTO KERR

El primer efecto electro-óptico fue descubierto por el físico escocés John Kerr (1824-1907) en 1875. Encontró que una sustancia transparente isotrópica se hace birrefringente cuando se coloca en un campo eléctrico E. El medio toma las características de un cristal uniaxial cuyo eje óptico corresponde a la dirección del campo aplicado. Los dos índices n_2 y n_1 están asociados con las dos orientaciones del plano de vibración de la onda, esto es, paralela y perpendicular al campo eléctrico aplicado respectivamente. Su diferencia, es la birrefringencia y se encuentra que es:

$$n_2 - n_1 = \lambda * K * (E)^2$$

donde K es la constante de Kerr. Cuando K es positiva, que es lo más común. $n_2 - n_1$ es positiva y la sustancia se comporta como un cristal uniaxial positivo.

El efecto Kerr es proporcional al cuadrado del campo y a menudo se dice que es el efecto electro-óptico cuadrático.

Estas celdas son generalmente usadas para crear obturadores, dispositivos que impiden el paso de la onda luminosa excepto durante los intervalos de exposición deseado, de Alta Velocidad. El efecto Kerr es un cambio anisótropo, dicese de los cuerpos cuyas propiedades tales como radiación, transmisión, etc varían en función de la dirección, en el índice de refracción de una sustancia en

respuesta a un campo eléctrico. Una práctica implementación tiene la sustancia Kerr (por lo general nitrobencono, el cual tiene una constante Kerr muy alta) entre dos polarizadores cruzados (Polarización en dos direcciones en ángulo recto). La polarización de la onda luminosa es cambiada en proporción al cuadrado del campo eléctrico, permitiendo que alguna onda luminosa pase a través de los polarizadores. Como un obturador el tiempo de respuesta de la celda de Kerr es limitado principalmente por cuan rápido el campo eléctrico puede ser cambiado.

Los problemas con una celda de Kerr son: El nitrobencono es un solvente volátil el cual es remarcablemente tóxico, el efecto es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, el cual no es problema para una aplicación de un obturador pero no es apropiado para una aplicación de medición.

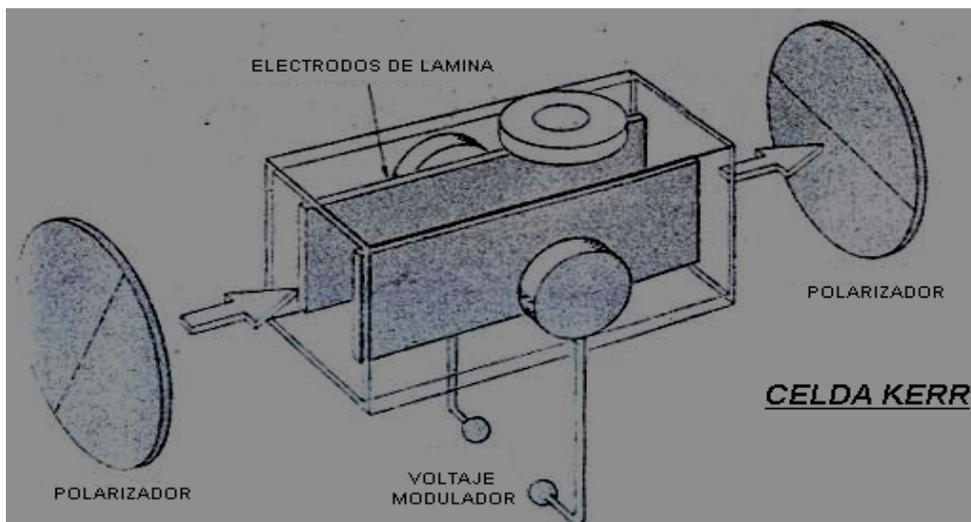


Figura 1.3 Efecto Kerr

1.2.4. CELDAS DE POCKELS

Hay aún otro efecto electro-óptico muy importante conocido como efecto Pockels en honor al físico alemán Friedrich Carl Alwin Pockels (1865-1913), quién lo estudió ampliamente en 1893. Es un efecto electro-óptico lineal ya que la birrefringencia inducida, que es una característica propia de determinados elementos en la cual las propiedades ópticas del mismo se vuelven diferentes en cada una de sus partes constitutivas a causa de un fenómeno de inducción electromagnético, lo cual es proporcional al campo eléctrico E aplicado y por consiguiente del voltaje aplicado. El efecto Pockels existe solamente en ciertos cristales desprovistos de un centro de simetría, en otras palabras, cristales que no tienen un punto central en el que cada átomo se pueda reflejar en un átomo idéntico.

La primera celda Pockels práctica, que pudo funcionar como un obturador o modulador, tuvo que esperar hasta que se produjera el desarrollo de cristales adecuados en la década del cuarenta. Una celda Pockels es simplemente un monocristal orientado sin centro de simetría apropiado y sumergido en un campo eléctrico controlable.

El efecto Pockels es similar al efecto Kerr, excepto que el cambio en el índice de refracción es linealmente proporcional al campo eléctrico. Sustancias tales como KDP (Potasio Dehidrógeno Fosfato), KD*P (Deuterizado KDP) y LiNbO₃ (Litio Nobio Oxígeno), que son cristales sin centro de simetría,

muestran largos efectos Pockels y son muy populares como moduladores electro-ópticos para trabajos con láser.

Un problema con los sensores Pockels es el costo de los cristales, particularmente en tamaños largos. Un pequeño cristal de 1 cm de diámetro adecuado para activar o desactivar un haz láser no es particularmente caro (varios cientos de dólares). Pero uno mucho más largo para un obturador Fotográfico sería prohibitivamente caro. Para una aplicación de medición de Alto Voltaje, las celdas estarían en la escala de los milímetros, particularmente si cables de fibra óptica son usados.

DESCRIPCION MATEMATICA

* CELDAS DE POCKELS

$$(\eta_2 - \eta_1) = P * E$$

Donde

$\eta_2 - \eta_1$ = Birrefringencia inducida

E = Campo eléctrico aplicado (voltio/metro)

P = Constante de Proporcionalidad (metro/voltio)

Un cálculo similar a este puede ser usado para la celda de Kerr determinando el voltaje de media onda para la celda.

A continuación se dan las constantes P de algunos elementos

| | | |
|-----------------|---------|---------------|
| KDP | 3.6E-11 | metros/voltio |
| Deuterizado KDP | 8E-11 | metros/voltio |
| LiNbO3 | 3.7E-10 | metros/voltio |

Hay dos configuraciones comunes de celdas Pockels denominadas transversal y longitudinal dependiendo si el campo E aplicado es perpendicular o paralelo a la dirección de propagación, respectivamente. El tipo longitudinal se ilustra en su forma más básica en la figura a continuación:

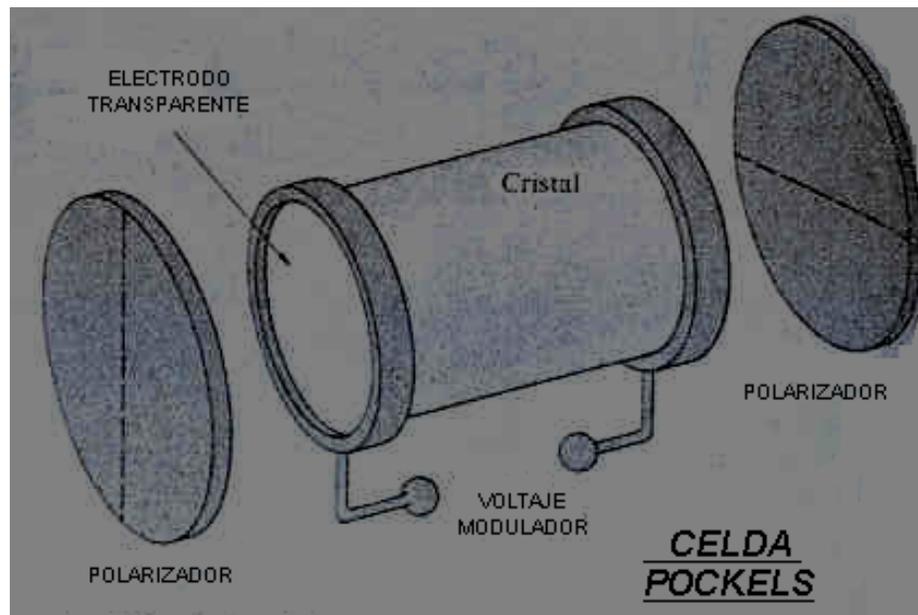


Figura 1.4 Celda Pockels

1.3 CONSIDERACIONES BASICAS ACERCA DE LAS FIBRAS OPTICAS

Haciendo una breve historia acerca de la fibra óptica, en 1870 Tyndall demostró que la luz, por el fenómeno de la reflexión interna total, podía guiarse dentro de un chorro de agua . Se iniciaron estudios serios de Ingeniería de la más amplia clase de estructuras llamadas antenas de onda viajera poco antes de la Segunda Guerra Mundial, cuando apenas se desarrollaba las fuentes de microondas de alta frecuencia. La primera guía de onda dieléctrica que se estudió a las frecuencias ópticas fue la fibra de vidrio recubierta de vidrio desarrollada para aplicaciones de formación de imágenes por fibra óptica. El diseño básico es el mismo, cualquiera que sea su uso; o sea, hay un núcleo central de vidrio que conduce la luz y un vidrio con recubrimiento exterior que hace mínima la fuga de luz hacia fuera del material del núcleo. El efecto se debe a las diferencias del índice de refracción de los dos materiales. En 1966, el Dr. Charles Kao postuló que las fibras ópticas podían utilizarse para las comunicaciones si se lograba reducir a un nivel satisfactorio la (entonces) grande atenuación de las fibras (200 dB/km).

Hablando conceptualmente la fibra es un medio de transmisión de información analógica o digital. Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio a la velocidad de la luz.

Es un filamento de vidrio sumamente delgado y flexible (de 2 a 125 micrones) capaz de conducir rayos ópticos (señales en base a la transmisión de luz). Las fibras ópticas poseen capacidades de transmisión enormes, del orden de miles de millones de bits por segundo. Se utilizan varias clases de vidrios y plásticos para su construcción.

Básicamente, la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica, por la cual se efectúa la propagación, denominada núcleo y coaxial con él, totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación y que se denomina envoltura o revestimiento.

Las Fibras Ópticas son una aplicación interesante de la reflexión interna total, el cual ocurre cuando la luz intenta pasar de un índice de refracción mayor a una que tiene un índice de refracción menor. Los rayos refractados se desvían alejándose de la normal ya que n_1 es mayor que n_2 . Debe recordarse que cuando la luz se refracta en la interfase entre dos medios, también hay una reflexión parcial. En resumen:

La reflexión interna total ocurre sólo cuando la luz intenta pasar de un medio de mayor índice de refracción a un medio de menor índice de refracción.

Considérese un rayo de luz que se propaga en el aire y que incide con una inclinación sobre una superficie plana y lisa. Los rayos incidente y reflejado forman ángulos θ_1 y θ'_1 , con una recta que se traza en forma perpendicular a

la superficie en el punto donde el rayo incidente choca con la superficie. A esta recta se llama normal a la superficie. Los experimentos han mostrado que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, principio básico en que se basan las fibras ópticas.

CAPITULO II

TRANSDUCTORES OPTICOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE

2.1 TRANSDUCTORES ELECTRICOS

Básicamente un transductor es un dispositivo en el cual las variaciones de energía de una forma producen variaciones correspondientes en energía de otra forma.

Estos dispositivos se han definido como componentes que pueden utilizarse para interconectar sistemas similares ó distintos y para transmitir energía entre ellos. Una definición con una mayor aceptación entre los ingenieros eléctricos es que un transductor es un dispositivo utilizado para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica . La conversión puede ser a través de una etapa intermedia, es decir, la variable medida se convierte primero en una señal eléctrica. La conversión mecánica se realiza mediante métodos esencialmente distintos.

En este capítulo hablaremos acerca del denominado transductor óptico, el cual es un dispositivo básico que hace posible el sistema de medición y control por métodos muy diferentes y con una mayor eficiencia que los convencionales. En la norma S37.1-1969, Nomenclatura y Terminología del transductor eléctrico, la sociedad Americana de Instrumentos define al transductor como un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a un mensurando “específico”; y la salida como “la cantidad eléctrica, producida por un transductor, la cual es una función del mensurando aplicado”.

Los transductores se pueden clasificar según el método de transducción ó según la variable que son capaces de medir, por ejemplo: corriente, voltaje, frecuencia, aceleración, desplazamiento, etc.

2.2 TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE

2.2.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE

Los sensores ópticos de corriente brindan en los actuales momentos significativas ventajas en comparación a los sistemas convencionales, su utilización es de gran importancia dentro de la medición de parámetros eléctricos en base a sistemas modernos .

Los sensores ópticos de corriente trabajan bajo el principio del efecto de Rotación de Faraday. La corriente que fluye en un conductor induce un campo magnético el cual según el efecto de Faraday cambia el plano de polarización de la onda luminosa viajando a través de un camino determinado el cual rodea al conductor. La ley de Ampere establece que si la onda luminosa es uniformemente sensible a todo el campo magnético a lo largo de un camino determinado, y este define un lazo cerrado, entonces el cambio acumulado del plano de polarización de la onda luminosa es directamente proporcional a la corriente fluyendo en el conductor, como se lo expresó anteriormente .

Estos sensores de corriente con fibras ópticas trabajan en el principio que el campo magnético, más que rotar o cambiar una onda de luz linealmente

polarizada, cambia la velocidad de una onda de luz circularmente polarizada dentro de un sensor de fibra envuelto (lazo) alrededor del conductor que lleva la corriente. El efecto es el mismo efecto Faraday pero formulado diferentemente. Se ha demostrado que es mucho más fácil medir con precisión cambios en la velocidad de la onda luminosa que cambios en el estado de polarización.

Los transductores ópticos de corriente son tanto intrínsecos como extrínsecos, son intrínsecos porque la fibra óptica es usada para sensar la corriente y a su vez son extrínsecos porque la fibra transmite la onda luminosa hacia y desde el grupo de elementos sensores de corriente.

El circuito óptico es mostrado en la Figura. La onda luminosa, procedente de un LED, es enviada hacia una fibra óptica donde es polarizada y dividida en dos ondas de luz ortogonalmente polarizadas. Estas dos ondas viajan a través de la fibra de mantenimiento de polarización hasta el sensor principal. Una fibra óptica de placa de cuarto de onda convierte las dos ondas en: una onda de polarización elíptica, la cual es una onda electromagnética transversal en la que la rotación del vector del campo eléctrico es hacia la derecha respecto a un observador que mira en la dirección y sentido de la propagación de la onda, y en una onda electromagnética de polarización elíptica cuyo vector del campo eléctrico gira hacia la izquierda respecto a un observador que mira en la dirección y sentido de la propagación respectivamente. Estas dos ondas viajan a través de la fibra óptica la cual envuelve en un número específico de vueltas

alrededor del conductor de corriente (lazo de Fibra óptica). Las dos ondas viajan a través de la fibra a diferentes velocidades, la diferencia es proporcional a la intensidad de campo magnético alineado con la fibra que sensa. Al final de la región de sensado las dos ondas se reflejan en un espejo. Debido a la reflexión el sensado de las dos ondas con polarización elíptica es cambiado y las dos ondas ahora viajan en una dirección contraria con respecto al campo magnético. Las dos ondas mantienen su diferencia de velocidad para el viaje de retorno alrededor de la fibra sensada.

Una vez que la onda luminosa ha regresado por la misma vía alrededor de la región sensada, las dos ondas de nuevo se encuentran con la placa de cuarto de onda donde son convertidas de nuevo al estado de polarización lineal. Ahora la onda luminosa que viajó destinada en la fibra PM (Mantenimiento de Polarización) como polarización-X (polarización elíptica) regresa al estado de polarización-Y (polarización lineal) y viceversa. Las dos ondas son recombinadas en el polarizador y desviadas a un fotodetector (Detector que responde a la energía radiante).

Un análisis de los caminos de propagación de las dos ondas luminosas revelan que han atravesado el mismo camino solo que en un orden inverso. La primera onda de luz viajó con una polarización-X desde la fibra PM y regresó con una polarización-Y de retorno en la fibra PM. La única cantidad física que puede afectar la diferencia del tiempo de recorrido entre las dos ondas luminosas es el

campo magnético actuando en el sensor principal , según el efecto de Rotación de Faraday. Sin embargo, una medición de la diferencia del tiempo de recorrido entre las dos ondas luminosas produce una medición precisa de la corriente fluyendo en el conductor pasando a través del sensor principal.

La diferencia de tiempo de recorrido a ser medida es muy pequeña, hablamos de valores tales como 10^{-21} a 10^{-15} segundos, es el rango para típicas corrientes de 100 mA a 100 KA . La idea básica es que la diferencia del tiempo de recorrido es medida como un desfase entre las dos ondas luminosas y un modulador ubicado al comienzo de la fibra PM convierte la información de desfase en una onda portadora de alta frecuencia. La señal en el fotodetector es digitalmente desmodulada y las señales de control como la fuente de luz (láser ó LED) y el modulador son reutilizados. La salida del sensor es inherentemente digital, típicamente la corriente fluyendo en el conductor es descrita por 16 BIT.

A causa de que la información de la corriente viene dada en ondas portadoras de alta frecuencia (320 KHz en prototipos de hoy), la respuesta de la frecuencia del sensor es limitada según la importancia. Este tipo de sensor posee una señal de procesamiento el cual produce una respuesta de frecuencia igual a $\frac{1}{4}$ de la onda portadora de alta frecuencia. El tiempo que toma un evento para que la corriente se muestre en el sensor de salida es 11,25 microsegundos. La

incertidumbre en este atraso es menos que 100 nanosegundos. Lo cual corresponde a 0,13 minutos de incertidumbre de fase a 60 Hz.

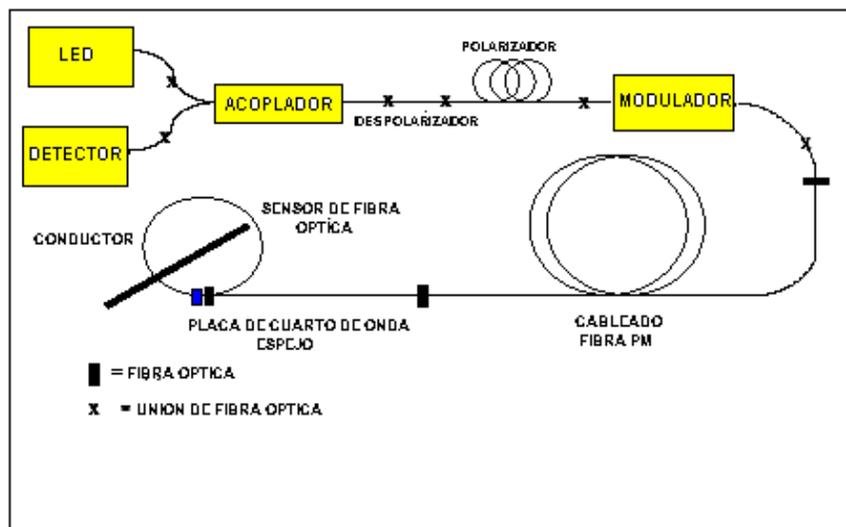


Figura 2.1 Descripción del Transductor Optico de Corriente

2.2.2 COMPONENTES DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE

El transductor óptico digital de corriente se divide en tres elementos separables como se indica la Figura. El armazón metálico o llamado también chasis opto-electrónico, el cableado de fibra óptica, el sensor principal y el soporte. El armazón opto-electrónico contiene todos los elementos electrónicos como la fuente de luz (Láser) y demás componentes ópticos. El armazón opto-

electrónico para un sistema trifásico incluye la fuente de poder y está en el cuarto de control de la subestación.

El cableado de fibra óptica, un cable de fibra PM para cada sensor, está conectados en ambos extremos tanto que el chasis opto-electrónico, el sensor principal y el soporte pueden ser transportados independientemente.

El sensor principal y la columna que funciona como aislador tienen una estructura dieléctrica y suficientemente liviana para ser soportado por la línea propiamente e integrada a una estructura de soporte existente.

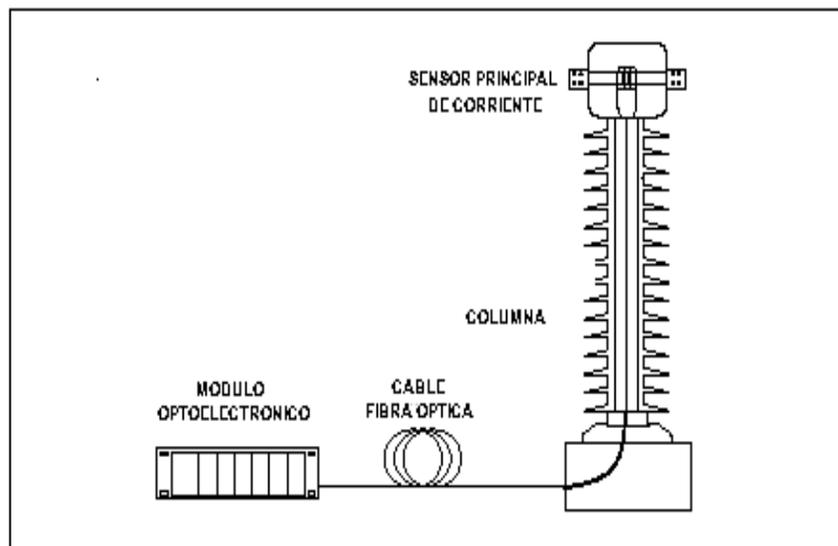


Figura 2.2 Componentes del Transductor Óptico de Corriente

El sensor principal de este instrumento es el sensor de corriente de fibra óptica, el cual es el núcleo del transductor óptico de corriente. Consiste de una fuente de luz (Láser), fotodetector (detector que responde a la energía radiante), elementos ópticos y electrónicos acoplados a un sensor envuelto alrededor del conductor. El modulador, es el “corazón” de este instrumento junto a la demás tecnología (óptico-electrónico) permite una medición de corriente con muy alta precisión. Valores de corriente que van desde el rango de 1 A. (rms) hasta 63 KA. (rms). Su reducido tamaño y peso comparado con los equipos convencionales permiten ubicarlos en subestaciones compactas, también en aplicaciones donde el espacio puede ser muy limitado.

Explicando más detalladamente el proceso:

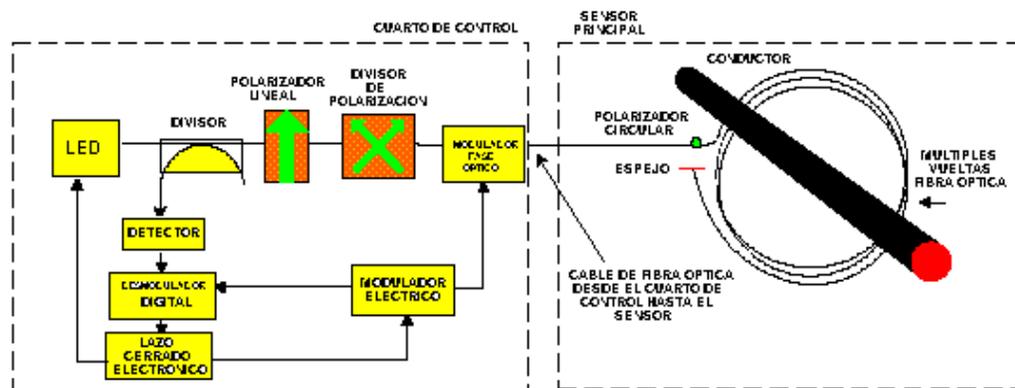


Figura 2.3 Proceso detallado del funcionamiento del Transductor Óptico de Corriente

1.- Una fuente de luz envía ondas luminosas a través de una guía de onda hacia un polarizador lineal, pasando por un divisor de polarización (creando dos ondas de luz linealmente polarizadas) y finalmente hacia un modulador de fase óptico.

2.- Esta onda luminosa es entonces enviada desde el cuarto de control hasta el sensor principal por medio de una fibra óptica.

3.- La onda luminosa pasa a través de una placa de cuarto de onda creando dos ondas circularmente polarizadas a partir de las ondas linealmente polarizadas.

4.- Las dos ondas luminosas atraviesan el lazo de fibra sensor alrededor del conductor, se refleja en un espejo al final de la fibra óptica y retorna a través del mismo camino.

5.- Mientras encierra el conductor, el campo magnético inducido por la corriente fluyendo en el conductor crea un diferencial óptico de desplazamiento entre las dos ondas luminosas debido al efecto Faraday, el cual describe cambios en el estado de polarización de la onda luminosa en presencia de un campo magnético.

Ley de Rotación de Faraday

“ Si un haz de luz polarizada en un plano atraviesa ciertas substancias transparentes en dirección paralela a las líneas de campo magnético intenso, el plano de polarización experimenta un giro o cambio. “

6.- Las dos ondas ópticas viajan de regreso a través del circuito óptico y son finalmente dirigidas hacia el detector óptico donde los circuitos electrónicos desmodulan las ondas luminosas para determinar el desplazamiento.

7.- El desplazamiento entre las dos ondas luminosas es proporcional a la corriente y una señal análoga ó digital representa la corriente por medio de circuitos electrónicos hacia el usuario final.

2.2.3 VENTAJAS DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE

a) *Precisión para medición y protección*

El diseño de estos instrumentos permite mediciones que se pueden realizar con la más alta precisión y estabilidad. Excede las normas básicas acerca de los estrictos requerimientos sobre medición y protección. A su vez el mismo elemento puede ser usado para aplicaciones de medición y protección, eliminando la necesidad de utilizar elementos por separado para tales fines.

b) *Amplio Rango dinámico*

La especificación sobre precisión es mantenida sobre un amplio intervalo dinámico, desde 5% hasta 200% de la corriente nominal. Esto permite la eliminación de transformadores de corriente para intervalos altos y bajos respectivamente.

c) *Amplio Ancho de Banda*

La reproducción precisa de la forma de onda de DC hasta 10 KHz permite un análisis a potencia máxima de armónicos y transientes sin las limitaciones de los sensores convencionales.

d) *Composición de los aisladores con peso liviano*

El montaje de la columna y la línea emplean aisladores con un peso muy ligero reduciendo costos por transportación, requerimientos de estructura de soporte para subestaciones e instalación de equipos demandados. El diseño de estos aisladores permite su ubicación en áreas sísmicamente activas.

e) *Seguridad intrínseca, diseño ambientalmente favorable.*

Los aisladores no contienen aceite mineral ó aislaciones con celulosa , tampoco gas SF₆. No hay mecanismos internos para fallas violentas que puedan dañar al personal o equipos adyacentes. No hay problemas

ambientales o gas que reciclar. Con un diseño óptico no hay consecuencia con secundarios abiertos.

f) *Bajo Mantenimiento*

Estos instrumentos no tienen componentes activos en la línea de alimentación, eliminando la necesidad de costosos cortes para mantener los circuitos electrónicos. Ya que no hay aislamiento en aceite o papel no hay complicación en los procedimientos de mantenimiento. La columna del aislador polímero emplea materiales como silicona y caucho que no requieren lavado frecuente.



Figura 2.4 Transductor Optico de Corriente

2.3 TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

2.3.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

Los Métodos ópticos para la medición de voltaje en sistemas de Alta Tensión han estado atrayendo más y más atención en los años recientes. Muchos sensores Ópticos de Voltaje emplean sensores de campo eléctrico que operan usando el efecto lineal electro-óptico (Pockels). Este instrumento utiliza múltiples sensores de campo eléctrico en miniatura dentro de un aislador de alta calidad, además, este transductor usa propiamente el método de medición de campos eléctricos en varios puntos y combina dinámicamente los resultados para obtener la diferencia de Voltaje a través de sus terminales. Consiste de un aislador de Alta tensión vacío con pequeños sensores de campo eléctrico instalados en el interior de la columna del aislador.

La ubicación de los sensores de campo eléctrico en el interior del aislador y la utilización de las Funciones matemáticas combinando las mediciones para obtener el voltaje, son determinadas por cambios en el ambiente y otros aspectos en sistema trifásico, influencias externas particulares, que no afectarán el voltaje medido. Los campos eléctricos medidos pueden cambiar sustancialmente debido a estas influencias externas, sin embargo, la manera en la cual las mediciones son combinadas y la posición de los sensores de campo

eléctrico, resulta en la medición de un voltaje, el cual es virtualmente insensible a estas influencias.

Influencias externas tales como las otras dos fases de voltaje en un sistema trifásico ó el movimiento de un objeto metálico muy cerca del instrumento (Ej. Trailer-Cabezal) pueden afectar el campo eléctrico presente en un punto. Para demostrar la inmunidad de las mediciones de voltajes para tales influencias, una malla de Puesta a Tierra (Artificial) fue usada para perturbar severamente el campo eléctrico bajo prueba. Este particular disturbio representa una perturbación que es mucho peor que el típicamente permitido en una subestación de Alto Voltaje. En la primera prueba la malla de puesta a Tierra fue localizada aproximadamente a 1.5 mts del centro de la columna (aislador) y aproximadamente a 50 cm desde los anillos corona (pantalla corona), pantalla destinada a prevenir el efecto corona redistribuyendo las líneas electrostáticas de fuerza en un punto de elevado potencial, en la parte superior máxima del instrumento. El Transductor fue energizado a 170 KV rms (Línea a Neutro) el cual representa aproximadamente el 120% del Voltaje Nominal. La Tabla muestra los resultados de los campos eléctricos medidos por cada sensor en su respectiva ubicación. Los valores son dados en porcentajes de sus respectivos valores cuando la malla de puesta a tierra no estaba presente. Aún cuando la distribución del campo eléctrico es severamente perturbado, el cambio en el voltaje medido es menos que el 1%.

Con una malla de puesta a tierra artificial como perturbación
(porcentajes de valores medidos)

| | |
|------------------|---------|
| V | 100,6 % |
| Esuperior | 119,1 % |
| Emedio | 95,4 % |
| Einferior | 77,1 % |

*Valores medidos de Voltaje y campo eléctrico bajo severos disturbios de campo
Se los comparó con los respectivos valores bajo condiciones de no disturbio
(normales). La precisión de la prueba fue de aproximadamente el 1%*

La lluvia y el flujo de agua pueden también afectar la distribución del campo alrededor de la línea de Alto Voltaje. La tabla que se muestra a continuación incluye los resultados de las mediciones usando las normas ANSI y las IEEE (ambas) y especificaciones IEC. Esta misma tabla muestra los resultados de mediciones cuando la columna estaba húmeda sin efectos de lluvia simulada. Como se demuestra, la presencia de agua no causó cambios significativos en la calibración (dentro de la precisión de las mediciones), esto se debe

principalmente porque hubo efectos muy mínimos en la distribución del campo eléctrico en comparación a una condición seca.

| | Húmedo, sin Flujo de agua | Húmedo, con Flujo de agua (IEC) | Húmedo, con Flujo de agua (ANSI) |
|------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| V | 100,1 % | 100,0 % | 99,9 % |
| Esuperior | 100,6 % | 99,9 % | 100,4 % |
| Emedio | 100,1 % | 100,2 % | 100,0 % |
| Einferior | 99,7 % | 100,1 % | 99,6 % |

Valores medidos de voltaje y campo eléctrico por un transductor de Voltaje NXVT bajo perturbaciones relatadas se las compara con los respectivos valores bajo parámetros normales (sin disturbios). Precisión de prueba fue aproximadamente del 1%.

Pruebas similares fueron repetidas en otros transductores ópticos de voltaje usando una columna mucho más delgada. Los resultados fueron similares a los obtenidos del primer transductor, confirmando que la precisión es mantenida dentro de un rango de diámetros de columna.

2.3.2 COMPONENTES DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

Después de una gran cantidad de modelos numéricos acerca de estos instrumentos, prototipos a 230 KV han sido fabricados y examinados para probar la teoría acerca de estos dispositivos. Este prototipo desarrollado por la firma NXTPHASE. CORP consistía de un aislador polímero de alta calidad (2,3 mts) con electrodos metálicos y bridas o acoples con sus dos terminaciones y dentro del aislador tres sensores de campo eléctrico . A los sensores de campo eléctrico utilizados les fueron integrados celdas ópticas de Pockels. Estas celdas fueron ubicadas en posiciones específicas en el interior de la columna, una cerca de la parte superior del transductor, otra en la mitad y la tercera en la parte más baja de la columna del aislador, la cual fue llenada con aire.

El prototipo del transductor fue examinado por Laboratorios POWERTECH en abril de 1999. Este tipo de Laboratorio se encarga de las pruebas de ciertos dispositivos de Alta Tensión, así como de generación y de sustancias químicas. Los circuitos electrónicos análogos y digitales fueron ubicados en el interior de un módulo, por debajo de la columna, la cual fue montada sobre una estructura de soporte de aproximadamente 2,5 mts. Las fibras ópticas desde los sensores en el interior de la columna, pasan a través de una cavidad en la parte más baja de la misma y son conectadas a los circuitos electrónicos. Los datos digitales representan los campos eléctricos medidos por los tres sensores y el voltaje medido (obtenido desde la medición de los campos eléctricos) por los circuitos

electrónicos digitales es transmitido a un computador de adquisición de datos a una razón de aproximadamente 66 KHz. Para referencia, una señal medida desde un divisor capacitor standard de alta precisión fue digitalizado usando un circuito convertidor análogo o digital calibrado (por precisión a 60 Hz) y transmitida al computador de adquisición de datos simultáneamente y sincronizadamente. Un software desarrollado por laboratorios Powertech fue usado para comparar los resultados con la referencia. *Debe ser enfatizado que la intención de estas pruebas fue demostrar que el modelo es exitoso. Por ejemplo, los campos eléctricos medidos pueden cambiar sustancialmente sin cambios significativos en el voltaje medido. Las pruebas y los circuitos electrónicos usados no intentaron una precisión absoluta. Por ejemplo, se pueden introducir variaciones de aproximadamente el 1%.*

2.3.3 DISEÑO DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

Los Transductores Opticos de Voltaje utilizan tres sensores de campo eléctrico en miniatura, cada uno aproximadamente de 20 mm de longitud, posicionado dentro de un tubo resistivo, el cual es en cambio posicionado dentro de un aislador polímero de Alto Voltaje. La resistencia de la pantalla resistiva es elegida para ser aproximadamente 90 Megaohmios tanto que esta lleva menos que 1 mA cuando el transductor es energizado a la tensión especificada (80.5 KV Línea a Neutro).

El aislador tiene 1,525 m de largo, con los tres sensores ópticos localizados a 1,232 m, 0,748 m y 0,260 m desde la base del aislador. El aislador es llenado con nitrógeno seco a aproximadamente 12 PSI. Un cable de fibra óptica multifilar conecta los sensores ópticos al circuito electrónico del Transductor. En este módulo, los campos eléctricos en las ubicaciones de los

$$V = - \int_0^h E_x(x) dx = - \sum_{i=1}^N \alpha_i E_x(x_i)$$

sensores ópticos son calculados y combinados usando una fórmula que conlleva la Sumatoria de todos los campos eléctricos presentes.

Para obtener V, el voltaje aplicado al Transductor de Voltaje, en este caso N=3, $E_x(x_i)$ es esencialmente la componente vertical del campo eléctrico medido en la ubicación de cada sensor y alfa es un apropiado factor de peso usando el método de cuadratura. Aquí $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$. Los circuitos electrónicos proveen señales de salida digitales y analógicas a baja energía. El dato es provisto a una alta velocidad y el tiempo de retardo de la llegada de información es de aproximadamente 50 microsegundos.

El Transductor óptico de Voltaje utiliza los valores de los campos eléctricos medidos espaciados entre los dos conductores entre los cuales el voltaje va a ser determinado. Este transductor está diseñado para que cambios prácticos en la distribución del campo eléctrico alrededor del transductor no causará un error

significativo en la medición del Voltaje. Este transductor utiliza una pantalla resistiva para mantener su precisión en todas sus condiciones de perturbación. Estas perturbaciones generalmente pueden ser causadas, por ejemplo, por la presencia de una fase muy cercana a la estructura en una subestación trifásica, contaminación sobre el aislador, o algún otro cambio climático como nieve o lluvia. Para mostrar la efectividad de el diseño y la inmunidad del transductor a estas perturbaciones, una serie de pruebas fueron realizadas para comprobar esta eficiencia.

Básicamente el núcleo de este sensor de Voltaje es una celda de Pockels en miniatura. El sensor mide con precisión el campo eléctrico teniendo como referencia que es inmune a la temperatura, vibración, y cambios en intensidad desde la fuente de Luz.

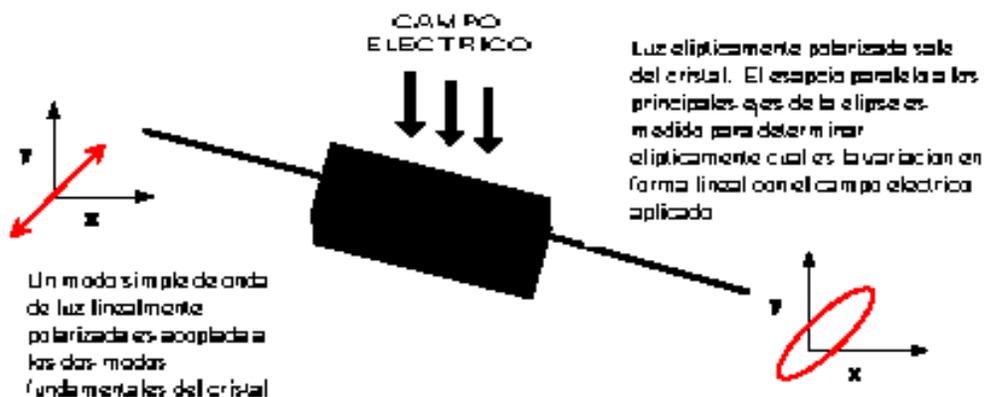


Figura 2.5 Celda Pockels en miniatura para medición del campo eléctrico

Un modo simple de onda luminosa linealmente polarizada es acoplada dentro de un cristal electro-óptico. Igual que el sensor de corriente, la velocidad de propagación de la onda luminosa es influenciada diferencialmente, esta vez basada en la intensidad de campo eléctrico. El resultado desde el sensor es una onda de luz elípticamente polarizada. El estado de polarización es medido lo cual deriva el campo eléctrico.

2.3.4 TECNOLOGIA DE LAS CELDAS DE POCKELS APLICADAS AL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

Los sensores de campo eléctrico forman la base para los transformadores ópticos de Voltaje para instrumentos, desarrollado por NXVT-Nxt-Phase Corp.. Este innovativo elemento patentado, utiliza el efecto Pockels (cambio lineal en el índice refractivo de un cristal en directa proporción al campo eléctrico aplicado). Basado en que la onda luminosa atraviesa un cristal, el sensor es usado con una guía de onda compuesto de titanio-difuso acoplado a un integrado de fibras ópticas.

La onda de Luz linealmente polarizada es acoplada en 45 grados a las dos formas fundamentales del cristal. El cristal es polarizado de tal manera que la onda luminosa que sale el cristal es circularmente polarizada sin ningún campo presente; se vuelve elíptica en tanto el campo es aplicado. Entonces una precisión mucho más alta de la representación lineal de ese campo es derivada de la medición de las dimensiones de la elipse.

Aún más significativo, este método deriva la medición de un voltaje con una precisión extremadamente alta desde un sensor de campo sin aplicar el voltaje completo a través del cristal. NxtPhase construye columnas ópticas con electrodos ampliamente separados y *no necesita de un divisor con capacitor ó aislamiento con gas SF6*.

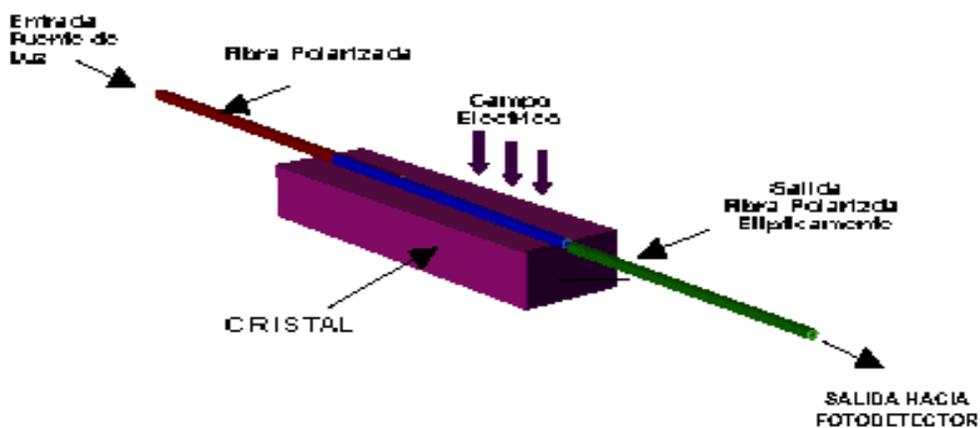


Figura 2.6 Celdas Pockels aplicadas al Transductor Optico de Voltaje

2.3.5 VENTAJAS DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE

El transductor óptico de Voltaje es un sensor único de voltaje que mide con precisión voltajes sobre el rango de transmisión desde 69 KV. A 765 KV. El sensor emplea un arreglo de celdas ópticas de Pockels dentro de un avanzado aislador (núcleo – hueco). La amplia separación de las líneas de Alto Voltaje y los electrodos aterrizados reducen los esfuerzos dieléctricos y elimina la necesidad de aceite mineral y celulosa o aislamiento SF6.

Su reducido tamaño y peso comparado al convencional equipo (llenado de aceite) permite ubicarlo en subestaciones compactas o en aplicaciones de reemplazo donde el espacio puede ser limitado.

a) *Precisión para medición y protección*

El diseño de estos instrumentos permite mediciones que se pueden realizar con la más alta precisión y estabilidad. Esta performance excede las normas acerca de los requerimientos sobre precisión y a su vez para los estrictos requerimientos de medición. También excede la normas IEC sobre precisión permitiendo al mismo elemento ser usado para aplicaciones de medición y protección, eliminando la necesidad de utilizar elementos por separado (transductores) para tales fines.

b) *Amplio Rango dinámico*

La especificación sobre precisión es mantenida sobre un amplio intervalo dinámico, desde 5% hasta 200% de el voltaje nominal.

c) *Amplio Ancho de Banda*

La reproducción precisa de la forma de onda de DC hasta 6 KHz permite un análisis a potencia máxima de armónicos y transientes sin las limitaciones de los sensores impuestos.

d) *Composición de los aisladores con peso liviano*

El montaje de la columna y la línea emplean aisladores con un peso muy liviano reduciendo costos por transportación, requerimientos de estructura de soporte para subestaciones . El diseño de estos aisladores permite su ubicación en áreas sísmicamente activas.

e) *Seguridad intrínseca, diseño ambientalmente favorable.*

Los aisladores no contienen aceite mineral ó aislaciones con celulosa , tampoco gas SF6 y las líneas de Alta Tensión y los electrodos aterrizados están ampliamente separados en la parte superior e inferior respectivamente de la columna. No hay mecanismos internos para fallas violentas que puedan dañar al personal o equipos adyacentes. No hay problemas

ambientales o gas que reciclar. Con un diseño óptico no hay efecto de ferresonancia.

f) *Bajo Mantenimiento*

Estos instrumentos no tienen componentes activos en la línea de alimentación eliminando la necesidad de costosos cortes para mantener los circuitos electrónicos. Ya que no hay aislamiento en aceite o papel no hay complicación en los procedimientos de mantenimiento. La columna del aislador polímero emplea materiales como silicona y caucho que no requieren lavado continuo.

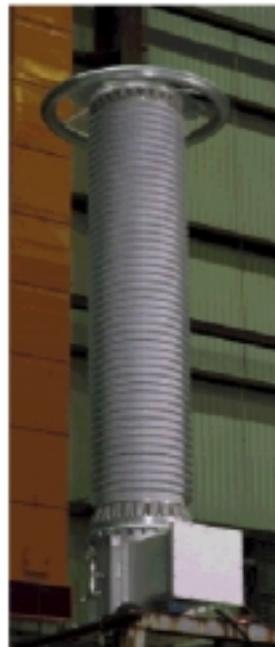


Figura 2.7 Transductor Optico de Voltaje

2.4 TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE Y CORRIENTE

El Transductor óptico de Voltaje y Corriente combina las ventajas del transductor óptico de voltaje y el transductor óptico de corriente en un sólo instrumento sobre el rango de transmisión de voltaje que va desde 69 KV hasta 765 KV.

El reducido tamaño y peso comparado al convencional equipo (llenado en aceite) permite ubicarlo en subestaciones compactas, o en aplicaciones de reemplazo donde el espacio puede ser limitado. El instrumento combinado reemplaza varios elementos convencionales y permite un diseño con mayor flexibilidad.

2.4.1 VENTAJAS DEL TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE Y CORRIENTE.

a) *Precisión para medición y protección*

El diseño de estos instrumentos permite mediciones que se pueden realizar con la más alta precisión y estabilidad. Esta performance excede las normas acerca de los requerimientos sobre precisión y a su vez para los estrictos requerimientos de medición. También excede la norma IEC sobre precisión permitiendo al mismo elemento ser usado para aplicaciones de medición y protección, eliminando la necesidad de utilizar elementos por separado (transductores) para tales fines.

b) *Amplio Rango dinámico*

La especificación sobre precisión es mantenida sobre un amplio intervalo dinámico, desde 5% hasta 200% de el voltaje nominal.

c) *Amplio Ancho de Banda*

La reproducción precisa de la forma de onda de DC hasta 10 KHz en corriente y aproximadamente 6 KHz en voltaje permite un análisis a potencia máxima de armónicos y transientes sin las limitaciones de los sensores impuestos.

d) *Composición de los aisladores con peso liviano*

El montaje de la columna y la línea emplean aisladores con un peso muy liviano reduciendo costos por transportación, requerimientos de estructura de soporte para subestaciones . El diseño de estos aisladores permite su ubicación en áreas sísmicamente activas.

e) *Seguridad intrínseca, diseño ambientalmente favorable.*

Los aisladores no contienen aceite mineral ó aislaciones con celulosa , tampoco gas SF6 y las líneas de Alta Tensión y los electrodos aterrizados están ampliamente separados en la parte superior e inferior respectivamente de la columna. No hay mecanismos internos para fallas violentas que

puedan dañar al personal o equipos adyacentes. No hay problemas ambientales o gas que reciclar.

f) *Bajo Mantenimiento*

Estos instrumentos no tienen componentes activos en la línea de alimentación eliminando la necesidad de costosos cortes para mantener los circuitos electrónicos. Ya que no hay aislamiento en aceite o papel no hay complicación en los procedimientos de mantenimiento. La columna del aislador polímero emplea materiales como silicona y caucho que no requieren lavado continuo.



Figura 2.8 Transductor Optico de Voltaje y Corriente

CAPITULO III

FIBRAS OPTICAS

3.1 GENERALIDADES

Las Fibras Opticas son una aplicación interesante de la reflexión interna total , el uso que se ha dado a las barras de vidrio ó plástico transparente para llevar la luz de un lugar a otro. La luz está confinada a viajar dentro de la barra de vidrio, aún cuando esta tenga doblamientos suaves, debido a la reflexión interna total. Si una línea óptica de transmisión es construida con un haz de fibras paralelas, es posible transmitir imágenes de un extremo a otro.

Existen pocas pérdidas en la intensidad de la luz en el interior de las fibras como resultado de la reflexión en las caras interiores. Cualquier pérdida de intensidad se debe esencialmente a la reflexión en los dos extremos y a la absorción por el material de las fibras. Estos dispositivos resultan particularmente útiles cuando se desea ver una imagen producida en lugares inaccesibles. El campo de las fibras ópticas está incrementando su utilización en las telecomunicaciones ya que por ella se puede transmitir mayores volúmenes de información que en los alambres eléctricos.

En la década de los ochenta nace la comunicación con ondas de luz. Estados Unidos y otras naciones industrializadas instalaron una gran cantidad de cables que contenían fibras ópticas. A esta época se la conoce como la “década del vidrio” . Sólo en Estados Unidos se instalaron más de tres millones de kilómetros

de estos cables. En este proceso , miles de millas de cables de cobre – ambos coaxiales y trenzados en parejas – se hicieron obsoletos en lo concerniente a las comunicaciones a larga y media distancia. Los cables de cobre han sido desplazados ya que no tienen la misma capacidad para transportar información, llamada ancho de banda, como en el caso de una fibra óptica.

Con estos anchos de banda, los sistemas de fibra óptica, pueden transmitir un gran número de señales en tan sólo uno ó dos hilos flexibles de vidrio ultrapuro, del grueso de un cabello, llamados fibras ópticas.

3.2 CARACTERISTICA DE UN SISTEMA DE MEDICION CON FIBRA OPTICA

El recubrimiento de las fibras ópticas tiene propiedades ópticas diferentes de las del núcleo y la cubierta exterior que absorbe los rayos ópticos sirve para proteger el conductor del medio ambiente así como para darle resistencia mecánica.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales :

- a) Del diseño geométrico de la fibra
- b) De las propiedades de los materiales empleados
- c) De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esta anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra.



Figura 3.1 Características de la Fibra Optica

Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 ó 10 mm. y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos.

Hay dos materiales que se emplean para hacer las fibras modernas, estas son de plásticos ó de vidrios. Las fibras de plástico no son adecuadas para aplicaciones de distribución, en vista de que su elevada pérdida (1000 dB/Km), intervalo limitado de temperatura de operación, baja resistencia mecánica y bajo ancho de banda limitan su uso a distancias de 50 a 200 m. Las fibras de vidrio transmiten con mayor eficiencia en la porción infrarroja cercana y alejada del espectro (800 a 1550 nm) por lo cual se utilizan diodos emisores de luz (LED, por Light Emitting Diodes) y laser semiconductores como transmisores electrópticos. El intervalo de trabajo de los dispositivos de fibra óptica es de +5 dBm a – 50 dBm. *La fibra óptica es un cristal puro (el núcleo está constituido de sílice con*

germanio revestido de impurezas) que proporciona un camino bajo en pérdidas para las señales de onda luminosa.

Hay tres tipos de fibra de vidrio que se describen de acuerdo a la construcción de su núcleo central de vidrio así como del índice de paso o de escalón, del índice graduado y de modo único. Las fibras de índice de paso y de índice graduado son fibras multimodales. Todas las fibras de vidrio tienen una cubierta exterior de vidrio a la que se conoce como el recubrimiento. La fibra de índice de paso es útil para distancias cortas (menores de 2 Km), por tener la pérdida más alta y el ancho de banda más reducido. La fibra recubierta con sílice dura (HCS), con un núcleo de 200 micrómetros tiene un ancho de banda de 20 MHz/Km y se utiliza en LAN (Redes) de oficina.

El sílice tiene un amplio margen de funcionamiento en lo referente a temperatura, pues funde a 600C. La fibra óptica presenta un funcionamiento uniforme desde -550 C a +125 C, sin degradación de sus características.

El sílice es una materia prima abundante en comparación con el cobre, con unos Kilogramos de vidrio pueden fabricarse aproximadamente 43 Kilómetros de fibra óptica.

3.2.1 ELEMENTOS BASICOS DE UN SISTEMA DE MEDICION CON FIBRA OPTICA

Hay tres elementos primarios en un sistema de fibra óptica para comunicaciones:

1.- El transmisor, es decir, la unidad que debe generar los rayos de luz, que puede ser conectada y desconectada muy rápidamente y/o modulada por algún tipo de señales que representen información.

2.- La fibra óptica, el cual debe tener una cubierta y un "encapsulamiento", así como una pureza que le hagan fuerte y transparente a las frecuencias de luz que se van a utilizar. Debe poder ser empalmada y reparada cuando sea necesario y tener capacidad para llevar los rayos de luz a una distancia razonable antes de que una estación repetidora tenga que reamplificar la luz para hacer posible que ésta atraviese la distancia casi total en la cual debe viajar. En algunos casos hay que usar muchas estaciones repetidoras.

3.- Receptor, se encarga de reconvertir esos rayos de luz en voltajes y corrientes analógicas o digitales de forma que la estación del usuario pueda separar y utilizar las señales de información que se habían transmitido.

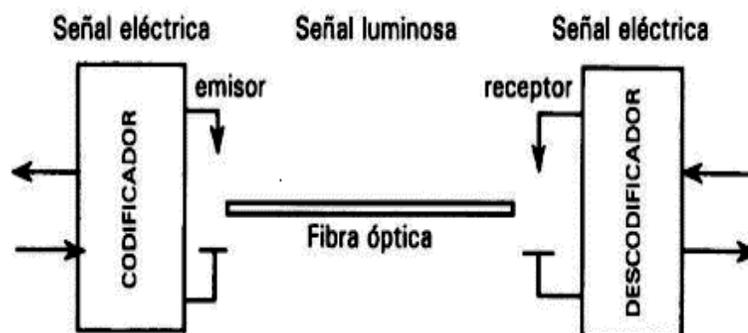


Figura 3.2 Elementos básicos de un sistema de medición con fibra óptica

3.2.2 SISTEMAS DE COMUNICACION DE FIBRA OPTICA

Los bloques principales de un enlace de comunicaciones de fibra óptica son: transmisor, receptor y guía de fibra. El transmisor consiste de una interfase analógica o digital, un convertor de voltaje a corriente, una fuente de luz y un adaptador de fuente de luz a fibra. La guía de fibra es un vidrio ultra puro o un cable plástico. El receptor incluye un dispositivo conector detector de fibra a luz, un fotodetector, un convertor de corriente a voltaje un amplificador de voltaje y una interfase analógica o digital. En un transmisor de fibra óptica la fuente de luz se puede modular por una señal análoga o digital. El convertor de voltaje a corriente sirve como interface eléctrica entre los

circuitos de entrada y la fuente de luz. La fuente de luz puede ser un diodo emisor de luz LED o un diodo de inyección láser ILD, la cantidad de luz emitida es proporcional a la corriente de excitación, por lo tanto el conversor voltaje a corriente convierte el voltaje de la señal de entrada en una corriente que se usa para dirigir la fuente de luz. La conexión de fuente a fibra es una interface mecánica cuya función es acoplar la fuente de luz al cable. La fibra óptica consiste de un núcleo de fibra de vidrio o plástico, una cubierta y una capa protectora. El detector de luz generalmente es un diodo PIN o un APD (fotodiodo de avalancha). Ambos convierten la energía de luz en corriente. En consecuencia, se requiere un conversor corriente a voltaje que transforme los cambios en la corriente del detector a cambios de voltaje en la señal de salida. Por otra parte, debido a la atenuación de la luz a lo largo de la fibra, cada cierta distancia hay que colocar un "repetidor"; esto es, un dispositivo que recibe los pulsos de luz, los convierte en pulsos eléctricos, los amplifica y los convierte nuevamente en pulsos luminosos para inyectarlos en el siguiente tramo de fibra. Mientras que con el sistema de cables de cobre se requieren repetidores cada dos kilómetros, con el sistema de fibra óptica se pueden instalar tramos de hasta 70 km. Con suficientes repetidores, este sistema puede transmitir los mensajes o los datos a cualquier distancia a lo largo y ancho de nuestro planeta.

3.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE FIBRA OPTICA

Capacidad de transmisión: La idea de que la velocidad de transmisión depende principalmente del medio utilizado, se conservó hasta el advenimiento de las fibras ópticas, ya que ellas pueden transmitir a velocidades mucho más altas de lo que los emisores y transmisores actuales lo permiten, por lo tanto, son estos dos elementos los que limitan la velocidad de transmisión.

- * Mayor capacidad debido al ancho de banda mayor disponible en frecuencias ópticas
- * Inmunidad a transmisiones cruzadas entre cables, causadas por inducción magnética
- * Inmunidad a interferencia estática debido a las fuentes de ruido.
- * Resistencia a extremos ambientales. Son menos afectadas por líquidos corrosivos, gases y variaciones de temperatura.
- * La seguridad en cuanto a instalación y mantenimiento. Las fibras de vidrio y los plásticos no son conductores de electricidad, se pueden usar cerca de líquidos y gases volátiles.

VENTAJAS

- Acceso ilimitado y continuo las 24 horas del día, sin congestiones.
- Es inmune al ruido y las interferencias.
- Las fibras no pierden luz, por lo que la transmisión es también segura y no puede ser perturbada.
- Carencia de señales eléctricas en la fibra.
- Presenta dimensiones más reducidas que los medios preexistentes.
- El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos.
- La materia prima para fabricarla es abundante en la naturaleza.

DESVENTAJAS

- Sólo pueden suscribirse las personas que viven en las zonas de la ciudad por las cuales ya esté instalada la red de fibra óptica.
- El costo es alto en la conexión de fibra óptica, las empresas no cobran por tiempo de utilización sino por cantidad de información transferida al computador, que se mide en megabytes.
- El costo de instalación es elevado.
- Fragilidad de las fibras.
- Disponibilidad limitada de conectores.
- Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.

3.2.4 INMUNIDAD A LAS INTERFERENCIAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

El uso de medios transparentes para la propagación de ondas electromagnéticas en forma de luz hace que la fibra óptica no necesite voltajes ni de corrientes, esto lo convierte en un medio de comunicación 100% inmune a todo tipo de interferencias electromagnéticas a su alrededor y, por lo tanto, es un medio de comunicación altamente confiable y seguro. Este es uno de los principales factores que motivaron su uso militar ya que para poder obtener información de ella hay que provocarle un daño, daño que podría detectarse fácilmente con equipo especializado. Esto no sucede con el cobre basta con dejar el cobre al descubierto.

El hecho de no necesitar corrientes ni voltaje hace que la fibra óptica sea idónea para aplicaciones en donde se requiere de una probabilidad nula de provocar chispas, como el caso de pozos petroleros y las industrias químicas, en donde existe la necesidad de transportar la información a través de medios explosivos.

Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables sin ningún componente conductor y pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión. Tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no hay problemas debido a los cortos circuitos Tienen un gran ancho de banda, que

puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el costo por canal; De esta forma es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre.

Con un cable de seis fibras se puede transportar la señal de más de cinco mil canales o líneas principales, mientras que se requiere de 10,000 pares de cable de cobre convencional para brindar servicio a ese mismo número de usuarios, con la desventaja que este último medio ocupa un gran espacio en los ductos y requiere de grandes volúmenes de material, lo que también eleva los costos.

Comparado con el sistema convencional de cables de cobre donde la atenuación de sus señales , (decremento o reducción de la onda o frecuencia) es de tal magnitud que requieren de repetidores cada dos kilómetros para regenerar la transmisión, en el sistema de fibra óptica se pueden instalar tramos de hasta 70 km. Sin que halla necesidad de recurrir a repetidores lo que también hace más económico y de fácil mantenimiento este material.

Las líneas de alta tensión tienen un alambre que no es conductor de corriente - llamado de guardia y se tiende en la parte más alta de las torres que la sustentan. Su misión es la de soportar las descargas atmosféricas y proteger a los cables principales. Para el tendido existen dos posibilidades: instalar la fibra óptica en el alma de este cable, esto es cuando se está construyendo la línea o

hacerlo a posteriori, enroscando el cable de fibra óptica alrededor del cable de guardia. Para este caso existen dispositivos a control remoto que efectúan la operación, girando alrededor del alambre de guardia, y solamente es necesario que un hombre efectúe a mano el salto en cada torre para que el equipo pueda seguir operando. Este sistema es muy conveniente en zonas montañosas, debido a las torres de alta tensión- cuando existen- solucionan fácilmente la instalación. Se reduce substancialmente los costos del enterrado, ya que las zonas montañosas tienen sus rutas de comunicación con la roca a la vista, siendo muy dificultoso el tendido de la fibra óptica. En casos de falta de seguridad, puede representar un soporte mas seguro.

Las fibras ópticas se están usando en aplicaciones tradicionales de comunicación de datos, en donde se necesita el mayor ancho de banda tanto para la capacidad de corriente como para la futura para el crecimiento a largo plazo. Algunas compañías de servicio están en condiciones, por intermedio de los reglamentos de operación de servicios públicos, de vender o rentar su exceso de capacidad en fibra a terceros , y al hacerlo, pagar los costos del sistema. La naturaleza no conductora de la fibra se traduce en medios de comunicación con muy poco ruido y excelente inmunidad natural a las interferencias electromagnéticas, esta es una solución para los problemas en las subestaciones. La fibra tiene ventajas similares sobre los conductores metálicos

ya que las instalaciones de la compañía de servicio donde ya existen líneas de transmisión y distribución, y , por supuesto no hay requisito de licencia.

CAPITULO IV

APLICACION DE LOS SENSORES OPTICOS DE CORRIENTE EN UNA SUBESTACION

4.1 ASPECTOS GENERALES

Los sensores ópticos de corriente están obteniendo en los actuales momentos un incremento en su aceptación en subestaciones de alto voltaje debido a su precisión, ancho de banda amplio y rango dinámico. Estos sensores han elevado su acción a un nivel que excede los parámetros de los transformadores convencionales (CT'S).

Las diferencias entre los transformadores convencionales y los sensores ópticos es amplia. Estas diferencias , además de las técnicas, incluyen desde las personas que se encargan del proyecto, los ingenieros de instrumentos, los diseñadores de subestaciones, personal de mantenimiento y operadores.

La interconexión de los sensores ópticos con los relés y medidores que ya existen en la subestación es un aspecto muy importante que será discutido en este capítulo .

Proveer un método simple de interconexión entre la tecnología anterior y la nueva es un paso necesario y requerido en el camino hacia la aceptación de estos nuevos sensores , y una vez dada esta metodología será mucho más fácil la transición dentro de una subestación.

Con cualquier nueva tecnología existe la interrogante de como evolucionará y si es capaz de superar a la tecnología ya existente.

Sin embargo, una vez que esta tecnología ha sido comprendida, los recursos para su ejecución hayan sido provistos y el personal haya sido entrenado, existen los problemas concernientes a la integración de esta tecnología dentro de una infraestructura ya existente.

Cuando el problema de integrar la tecnología existente con equipos avanzados, los cuales tienen salidas digitales y sistemas de comunicación de gran capacidad, sea superado, esta tecnología ingresará en el mercado con grandes beneficios.

Con esta meta en mente, dentro de la cual las salidas electrónicas representan un determinado valor de medición, el cual varía desde una señal digital hasta una salida de alta energía (1 A), se proveerá de una solución que no requiere de un cambio completo de la tecnología existente.

Dentro de este capítulo se dará una variedad de interconexiones disponibles, las cuales son aplicables a subestaciones de 138 KV y 230 KV muy comunes en nuestro medio. Los beneficios de esta nueva tecnología pueden ser combinados con equipos convencionales en subestaciones ya existentes.

4.2 OPCIONES PARA LA INTERCONEXION DE LOS SENSORES OPTICOS DE CORRIENTE.

La interconexión de los sensores ópticos de corriente con los relés y medidores convencionales requieren de una adecuada metodología para llevar una determinada señal hacia estos elementos. En transformadores convencionales de corriente (CT'S) las salidas son tanto para 1A como 5A , ya sea para aplicaciones de medición o protección . Estos niveles de salida son fáciles de ejecutar desde transformadores convencionales, pero a su vez difíciles y costosos de ejecutar en circuitos electrónicos basados en una señal inherentemente digital. Se ha llegado a un grado de aceptación dentro de la cual las señales digitales para elementos de medición dominarán las futuras subestaciones. La solución a corto plazo requiere una interconexión de estos nuevos elementos con la infraestructura de una subestación ya existente. Una subestación totalmente digitalizada estará disponible en el futuro. La mayoría de las piezas están en los actuales momentos a disposición, pero la dificultad radica en la interconexión con tecnología mucho más antigua de la existente. Los fabricantes de medidores y relés requieren un tiempo prudencial para fabricar entradas completamente digital.

Los diseñadores de subestaciones requieren de una inmediata solución que sea lo suficientemente flexible para competir con un equipo ya existente. Una solución a este problema es la evolución por determinadas etapas. La transición hacia una subestación completamente digital puede desarrollarse utilizando varios métodos

simples que integren la tecnología antigua con la nueva. Esta última encontrará aplicación en tanto existan opciones de interconexión que sean fáciles de implementar, similar a la tecnología existente.

Cuando los ensayos de interconexión digital sean aceptados en su totalidad, los sensores ópticos estarán en una posición adecuada para proveer estas señales digitales como una interfase digital. Las opciones de interfase que existen en los actuales momentos incluyen salidas digitales, salidas análogas de baja energía y de alta energía. Este rango de interconexiones es flexible en sus diseños.

4.2.1. SALIDA DIGITAL HACIA UN MEDIDOR O RELE DIGITAL

La salida digital desde un sensor óptico de corriente representa la corriente primaria fluyendo, es utilizada y disponible dentro de un formato establecido. Esta señal se genera desde una unidad de fusión mostrada en la Fig 4.1 . La función de esta unidad es recoger información desde aproximadamente siete transductores de corriente (3 para medición, 3 para protección, y uno para el neutro) además de cinco transductores de voltaje (3 para medición/protección, uno para la barra de distribución y uno para el neutro).

Utilizando una señal digital tanto para medición o protección se provee de una señal con mayor precisión. El hecho de convertir un señal con dominio análogo hacia una señal digital y con la posibilidad de amplificar esta señal, da como

resultado una excelente performance y exactitud desde el sensor con un costo mucho más bajo.

A continuación se detalla gráficamente un sensor de corriente con salida digital hacia un medidor o relé digital el cual es alimentado por una fuente de energía de 130 Vdc. El módulo ópto electrónico es el corazón del sistema porque es donde se procesa la información que proviene del transductor.

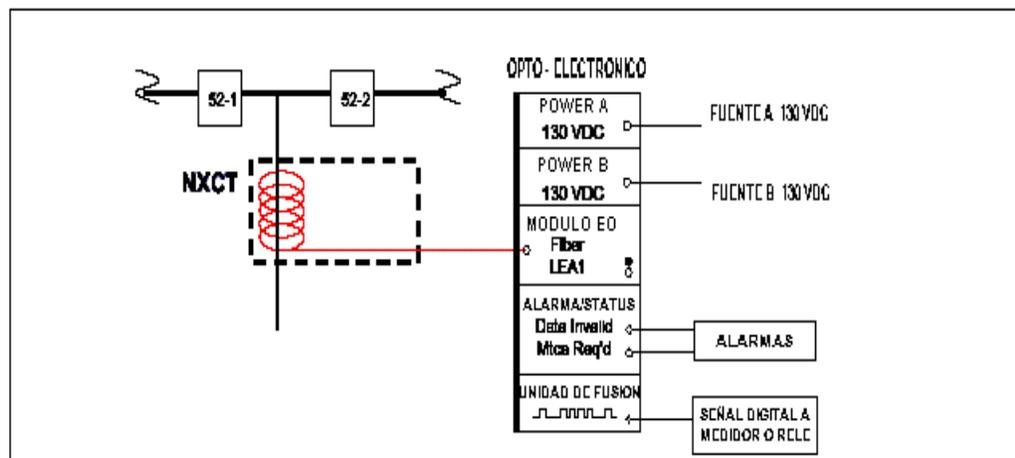


Figura 4.1 Sensor Optico de corriente con salida digital hacia medidor digital o relé

LEYENDA (Figura 1)

Power A : Fuente de Voltaje A (130 VDC)

Power B : Fuente de Voltaje B (130 VDC)

EO Module : Módulo Opto-electrónico

Merging Unit: Unidad de Fusión

4.2.2. SALIDA ANALOGA DE BAJA ENERGIA HACIA UN MEDIDOR O RELE ANALOGO

Una salida análoga de baja energía desde los circuitos electrónicos es seleccionable dentro de varios rangos dependiendo de los requerimientos de una subestación. Para aplicaciones de medición, la señal análoga representando la corriente primaria puede ser 2 Vrms ó 4 Vrms (nominal). La selección dependerá de la interconexión con el medidor. En lo que respecta a la protección, la corriente estaría representada por una señal de 200 mVrms propia de una señal de 11,3 V (Voltaje de pico). Este Voltaje de pico da un valor máximo instantáneo consistente con la peor condición de falla que es 40 veces la corriente del primario.

La figura 4.2 detalla una solución análoga de baja energía tanto para medición o protección. Esta opción, que es aplicable para ambas, es ajustada para aplicaciones de protección.

Este tipo de señal, la cual no es tan precisa como la señal digital establece un paso intermedio hasta la subestación completamente digital. La reducción en la precisión cuando se la compara con una señal digital está en el orden del 0,1% .

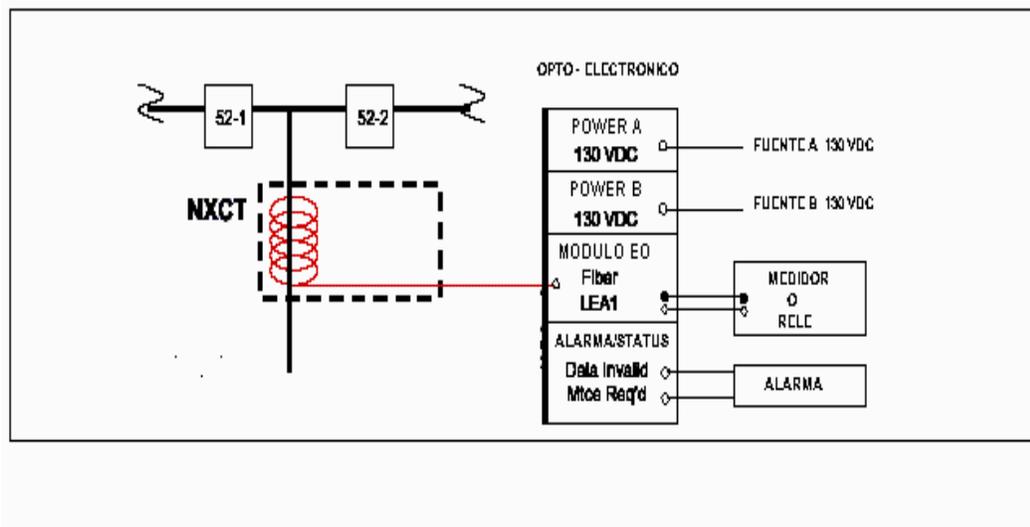


Figura 4.2 Sensor Optico de corriente con salida análoga de baja energia hacia medidor análogo o relé

LEYENDA (Figura 2)

Power A : Fuente de Voltaje A (130 VDC)

Power B : Fuente de Voltaje B (130 VDC)

EO Module : Módulo Opto-electrónico

Status/Alarm: Estado / alarma

4.2.3 SALIDA ANALOGA DE ALTA ENERGIA

Con el propósito de interconectar los nuevos sensores ópticos con los medidores convencionales existentes en una subestación, una señal digital del módulo opto-electrónico es convertida a una señal análoga amplificada de 1 Amp. La cual puede alimentar varios medidores, como se muestra en la

fig.4.3. Este tipo de señal es solamente compatible con medidores que puedan reproducir una señal de 1 A. para protección, lo cual la hace impráctica y costosa. Similarmente una señal análoga de 5 A no es utilizada ni para medición o protección por las mismas causas. La señal análoga puede ser utilizada por varios tipos de medidores y es el paso intermedio hacia una digitalización del sistema lo cual permitiría el uso de los sensores ópticos dentro de una subestación. El amplificador de potencia permite una conexión en paralelo, con esta característica, un sensor óptico puede sumar señales en un nodo. En la Fig. 4.4, una señal análoga amplificada es integrada con un transformador de corriente convencional.

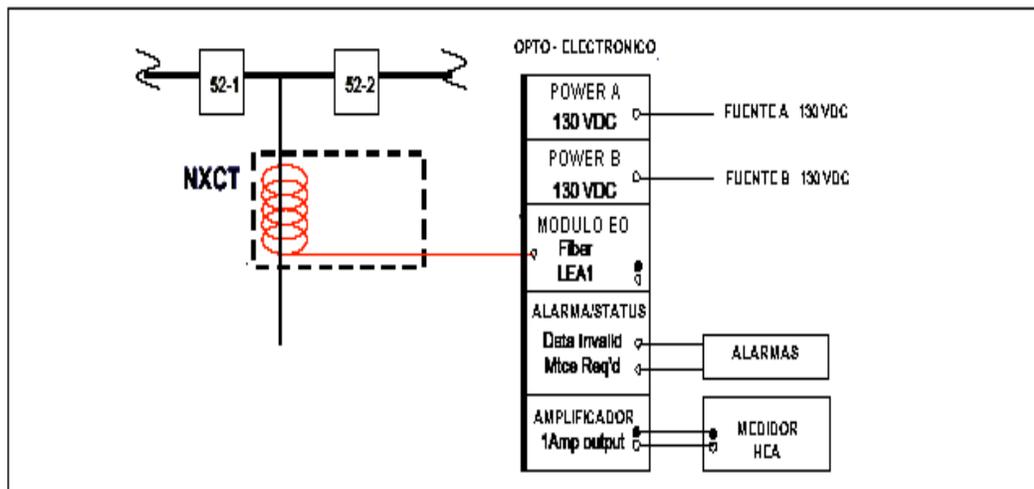


Figura 4.3 Sensor Optico de Corriente con salida análoga de alta energía
hacia medidor análogo

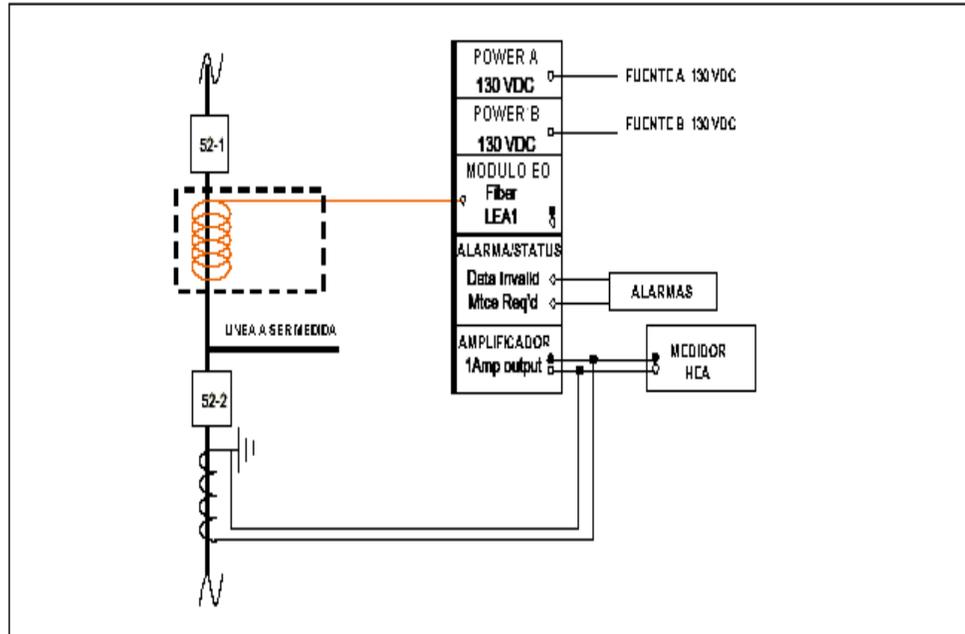


Figura 4.4 Salida analógica de alta energía sumada con un CT convencional

LEYENDA (Figura 3 - 4)

Power A : Fuente de Voltaje A (130 VDC)

Power B : Fuente de Voltaje B (130 VDC)

EO Module : Módulo Opto-electrónico

Status/Alarm: Estado / alarma

Amplifier: Amplificador

4.3 SELECCION DEL SENSOR OPTICO DE CORRIENTE PARA MEDICION

Los sensores ópticos son diferentes de los transformadores convencionales de núcleo de hierro. Estos sensores miden la corriente primaria basada en una detección óptica de parámetros y crea una representación digital de la corriente. Esta señal puede ser convertida en una señal análoga y posiblemente amplificada. Cuando se utilizan los sensores ópticos hay la posibilidad de que existan resultados peculiares desde sus medidores, especialmente en bajas corrientes primarias. Estas particularidades y su dependencia al diseño del sensor óptico son debido primero a la cantidad de ruido (perturbación con origen en aparatos e instalaciones eléctricas) contenida dentro de la señal digital y segundo al método de calcular ciertos valores dentro de la construcción de un medidor. Lo primero puede ser controlado por los constructores del sensor, lo segundo puede variar de medidor a medidor y aún así, tener limitada la capacidad de ser modificado. Para ejecutar un exitoso sistema de medición el ruido desde el sensor debe ser reducido.

La contribución del ruido, o alternativamente, la sensibilidad de un sensor óptico de corriente es importante porque los medidores pueden reportar resultados incorrectos, tales como valores altos de potencia reactiva, factores de potencia incorrectos o altas distorsiones debido a corrientes armónicas. Estas lecturas incorrectas aparecerán en bajos niveles de corrientes, pero dependiendo del diseño del sensor, corrientes bajas pueden significar 100 A o más fluyendo en el primario. Dependiendo de la sensibilidad del sensor, el

ruido puede ser reducido a un nivel por debajo de los 5 amperios primarios donde resultará insignificante.

Los sistemas de medición han aparecido como un componente en la desregulación de los sistemas de potencia como generación, transmisión, distribución y operación, los cuales están siendo separados hacia compañías independientes. La medición ha aparecido con mayor importancia y se la asocia con la compra y venta de energía, la cual se desea medir con una precisión determinada y con un mejor costo efectivo.

El personal de medición comúnmente desea saber cuanta energía está fluyendo en el interior y exterior del sistema y que determina el factor de potencia existente. Una explicación gráfica de los diferentes tipos de potencia existentes está explicada en Fig. 4.5, cuanto de la potencia aparente es debido a la potencia de distorsión o ficticia . Estos tipos de potencia no son comunes, pero muy relevantes cuando se desea medir señales con alto contenido armónico.

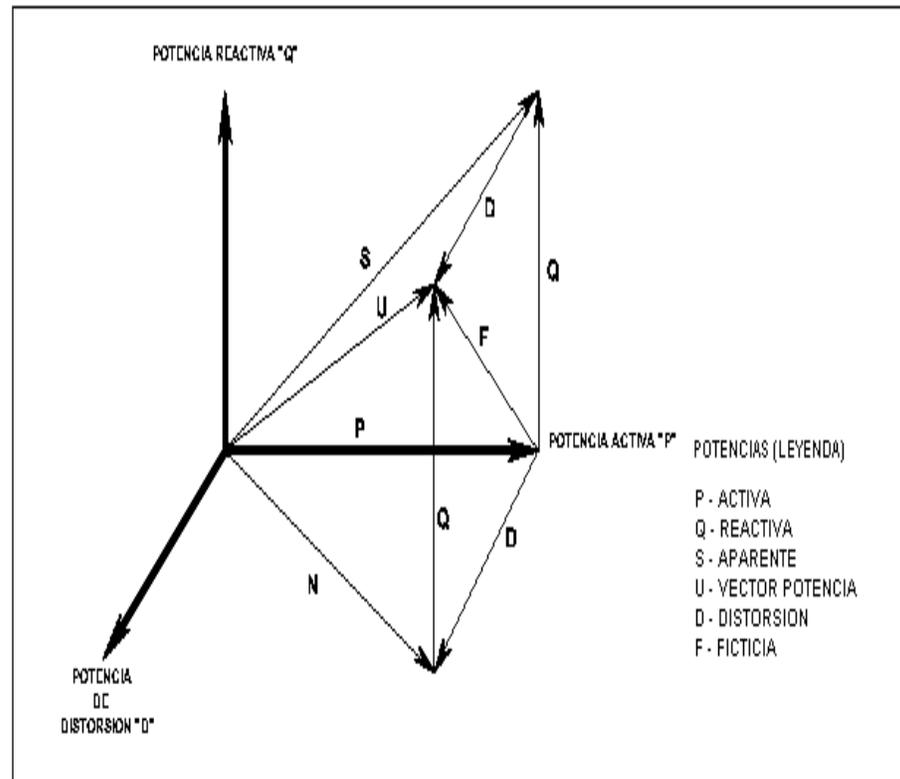


Figura 4.5 Diferentes tipos de Potencia Eléctrica

Donde:

$$P = (S^2 - Q^2)^{1/2}$$

$$Q = (S^2 - P^2)^{1/2}$$

$$S = (P^2 + Q^2)^{1/2}$$

$$U = S \text{ (Es un vector)}$$

$$D = (U^2 - P^2 - Q^2)^{1/2}$$

$$F = (Q^2 + D^2)^{1/2}$$

Por ejemplo, la potencia dentro de un medidor puede ser dada por fase o una lectura total polifásica. Para algunos medidores, la potencia por fase es la potencia aparente por fase, pero todos son referidos como potencia. Similarmente un factor de potencia puede también ser dado por fase o total y ambos son referidos como factor de potencia, pero el factor de potencia por fase es un factor de potencia aritmético y el total es el vector factor de potencia.

La información acerca de las distintas potencias y del factor de potencia puede ser típica para muchos medidores, sin embargo, con un determinado conocimiento de armónicos y sabiendo que componente de vector de potencia es mostrado por el medidor, el resultado será mucho más fácil de comprender.

4.4 SENSOR OPTICO DE CORRIENTE PARA MEDICION

Para reducir las perturbaciones en las señales a causa del ruido en un sensor óptico de corriente, un método práctico y exitoso es hacer un devanado de múltiples vueltas de fibra óptica alrededor del conductor, esto a su vez incrementa la sensibilidad del elemento y reduce el nivel del ruido hacia un nivel donde se vuelve insignificante. Incrementando las vueltas con fibra el resultado será una señal que llegará hasta los módulos opto-electrónicos y a su vez a los medidores, con una señal muy superior o una señal con perturbaciones debido al ruido. Reduciendo la componente del ruido cualquier sensor óptico podrá ser utilizado con cualquier medidor.

La fig.4.6 ilustra la magnitud de esta componente con una sola vuelta de fibra y en un sensor con 16 vueltas. El sensor con una sola vuelta de fibra tendrá una significativa componente de ruido, lo cual puede causar lecturas mucho mas altas en el medidor de las que realmente están fluyendo en el primario. Un sensor con varias vueltas de fibra lleva esta componente por debajo a niveles por debajo del sensor anterior. Las implicaciones de un sensor con una avanzada sensibilidad radica en que puede haber interconexión con cualquier medidor.

Cuando un sensor con altos contenidos de ruido es interconectado con medidores, las lecturas comenzarán a elevarse progresivamente hasta el peor de los casos.

Sin embargo, a menos que el medidor examine señales puras a 60 Hz, el medidor puede registrar valores incorrectos. Usando múltiples vueltas de fibra en unión de avanzados circuitos ópticos y electrónicos, esta limitación podrá ser superada.

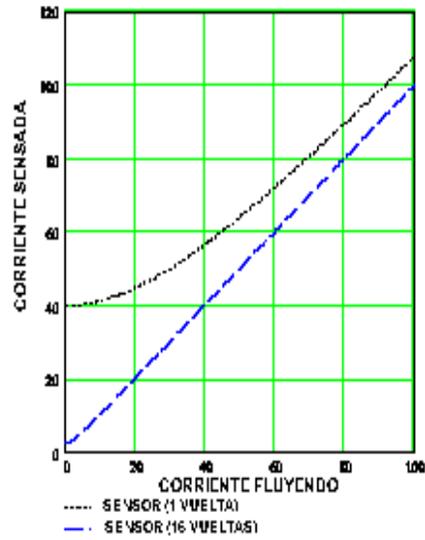


Figura 4.6 Valores medidos con un sensor de corriente con determinado número de vueltas

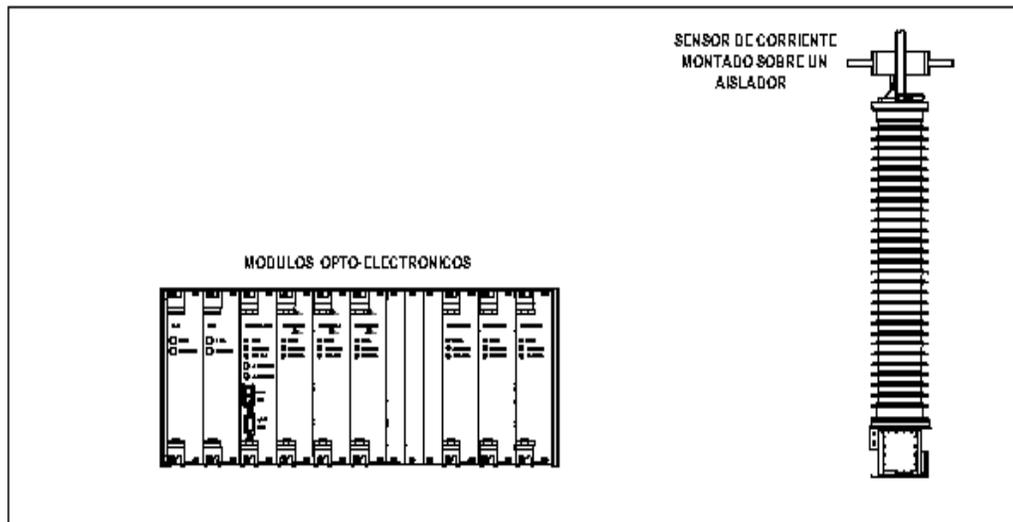


Figura 4.7 Componentes físicos del sensor de corriente

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSDUCTORES OPTICOS VS. CONVENCIONALES

Existen en la actualidad aplicaciones y casos certificados en que los transductores ópticos ofrecen beneficios superiores tanto económicos como técnicos sobre los convencionales. Los transformadores convencionales son de precio más económico que los ópticos a niveles de voltaje de 230 KV ó menores, pero en ciertas aplicaciones los transductores ópticos son la mejor solución económica a largo plazo aún en niveles de voltaje menores a 230 KV.

El transductor óptico es el eslabón que falta para crear la subestación totalmente digital. Este elemento moverá la frontera del convertidor análogo digital al corazón del mismo instrumento. Esto aliviará pérdidas y errores en precisión que se acumulan al transmitir los datos en forma analógica así como obtendrá beneficios en eficiencia y en efectividad .

Actualmente los sensores ópticos de NxtPhase, que es la casa fabricante de estos instrumentos de medición a los que nos referimos, ofrecen interfase analógica de bajo nivel (0 – 200mV y 0 – 2 V) para protecciones y alto nivel (0 – 1 amp y 100 V) para medición, además ofrecen la ventaja de que el mismo elemento es usado en aplicaciones de medición y protección .

Un amplio ancho de banda permite un análisis completo de la calidad de potencia, armónicas y transitorios. Además cada dispositivo contiene nitrógeno que elimina la posibilidad de daño ambiental y reduce el peligro de falla violenta.

Los dispositivos ópticos eliminan el peligro a la seguridad del personal y al sistema por secundarios abiertos o ferroresonancia.

Las aplicaciones de estos instrumentos son numerosas. Entre ellas se encuentran:

Productores Externos de Energía.- Requieren un rango de medición muy amplio. Cuando están aportando energía al sistema pueden estar generando 2000 Amps pero al estar en stand by consumen un par de amperes. El transductor de corriente de NxtPhase ofrece una precisión del 2% hasta 3000 amps y alrededor de 0,3% al medir en el rango bajo a 2 amp.

En la actualidad no hay sensor que pueda leer con tal precisión un rango bajo de medición sin saturarse en el rango alto. El consumo de estos productores externos de energía cuando están en servicio generalmente es menospreciado pero puede representar un monto anual elevado que bien puede validar la instalación de un sensor óptico. El sensor óptico evitaría disputas por la estimación de pérdidas en el transformador al hacer la medición en el lado de baja tensión. El sensor óptico disminuiría el número de dispositivos necesarios. Una sola columna de medición puede medir voltaje y corriente así como proveer salida con precisión tanto para medición como para protección. También se reduciría el número de juegos transformadores de instrumentos y medidores de facturación de 2 a 1. Un solo

sistema (transductor de corriente + voltaje) reemplazaría a dos sistemas: uno en el lado de alta y el otro en el lado de baja tensión.

Se considerará el siguiente ejemplo que aclarará las dudas que se podría tener con respecto a la importancia de estos dispositivos.

Ejemplo: Un productor externo de energía con capacidad de 300 megawatt que opere 5000 hrs al año y considerando un precio bajo por megavatiohora de \$40. Cada 0.1% de mejoría en la precisión representa \$60,000 USD ($300\text{MW} * 5000\text{hrs} * 40 \text{ dlr} * 0.1\%$) al año.

Medición en puntos estratégicos.- Esta aplicación es muy importante donde los ahorros encontrados al medir con mayor precisión puede representar una recuperación de la inversión de unos cuantos meses. Tradicionalmente los transformadores de corriente y voltaje tienen una precisión de 0.3% cada uno, el medidor de energía añade otro 0.2% y el cable puede añadir otro 0.1% para una precisión total del sistema de 0.9%. En contraste un transductor óptico con interfase digital tiene el potencial de reducir el error a 0.3% (precisión TC óptico = 0.1%, TP óptico = 0.2%). Con interfase analógica el sistema óptico puede ofrecer una precisión de 0.6%.

Medición de corriente continua (DC).- La tecnología de fibra óptica de NxtPhase se puede utilizar tanto para medir AC como DC tanto en aplicaciones generales como líneas de transmisión de DC.

5.1 TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE VS. TRANSFORMADOR CONVENCIONAL DE CORRIENTE.

Técnicamente los transductores ópticos de corriente ofrecen considerables ventajas en comparación con los transformadores convencionales de corriente.

Estas son algunas de estas ventajas:

- Los sensores ópticos de corriente mantienen un rango de precisión que exceden las especificaciones dadas por las normas standards, y por las típicas normas dadas por los transformadores para instrumentos de medición. Estos sensores también tienen la cualidad de operar a temperaturas que van desde -50°C hasta 50°C .
- Los sensores ópticos de corriente tienen la particularidad que pueden adaptar la relación de vueltas del sensor hacia varias condiciones de carga y comunicarse hacia elementos secundarios por medio de un contacto de salida. Esta característica permite al medidor cambiar su rango previamente ajustado basado en la información del sensor, superando las limitaciones de los medidores de sensor con precisión corrientes por debajo del 1% al 5% del rango establecido. Esto permite un sistema simple de medición con un amplio rango dinámico. Los transformadores convencionales de corriente podrían requerir dos medidores y posiblemente dos núcleos de hierro o transformadores ya sea para el lado de alta como para el lado de baja con sus respectivas pérdidas.

- Los transformadores convencionales de corriente requieren sistemas de reserva con rangos específicos para las muchas alternativas que podrían suscitarse. Las unidades ópticas son configuradas con rapidez y el número de sistemas de reserva puede ser minimizado.
- Un amplio ancho de banda que va desde DC hasta 6 KHz. Permite mediciones de energía de excelente calidad con una respuesta de frecuencia totalmente conocida. Los transformadores de corriente convencionales tienen una información muy limitada acerca de la respuesta de frecuencia.
- Las salidas de los sensores ópticos de corriente son inherentemente limitadores de corriente por medio de circuitos electrónicos. No hay el riesgo de secundarios abiertos debido a corrientes de falla muy altas.
- La máxima carga continua está limitada solamente por las características térmicas de los terminales no por el sensor óptico de corriente. El rango de corriente standard es 3000 A. Los transformadores convencionales de corriente requieren un nuevo diseño.
- Las Fibras ópticas aíslan eléctricamente el cuarto de control del equipo de campo. Una aislación completa del cuarto de control puede ser considerada usando tecnología óptica.

5.2 TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE VS. TRANSFORMADOR CONVENCIONAL DE VOLTAJE.

Técnicamente los transductores ópticos de voltaje ofrecen significativas ventajas en comparación con los transformadores convencionales de voltaje. Estas son algunas de estas ventajas:

- Los sensores ópticos de voltaje no contienen aceite o aislamiento SF₆. Están montados dentro de un aislador compuesto llenado con nitrógeno a baja presión. Los transformadores convencionales de voltaje usan aislamiento en aceite o gas SF₆ a alta presión. El sistema de gas SF₆ requiere una reducción de la presión del gas durante el envío y debe ser rellenado antes de la energización. Las unidades ópticas de NxtPhase, que son elementos que se están analizando, son entregados totalmente sellados y listos para energizar.
- Estos dispositivos son elementos puramente ópticos, no existe núcleo de hierro, capacitores ni cobre en el diseño del sensor. Esto elimina el riesgo de ferresonancia además de proveer estabilidad en la temperatura. El estudio de ingeniería es reducido a partir de que no hay saturación del transductor, ni cálculos de calibre del conductor. Después de la instalación, todos los cambios de relación de vueltas o reconfiguraciones son hechas en el cuarto de control por medio de los módulos opto-electrónicos.
- Los transformadores convencionales de voltaje requieren sistemas de reserva con rangos específicos para las muchas alternativas que pudieran existir. Las

unidades ópticas son configuradas con rapidez y el número de sistemas de reserva puede ser minimizado.

- Los sensores ópticos de voltaje, tanto como los de corriente son aproximadamente del 10% al 20% de el peso de los transformadores convencionales. Los sensores ópticos son sísmicamente estables debido a su peso liviano. Esta característica también minimiza la cantidad de equipos y el tiempo requerido para la instalación.
- El espacio para el surcado de los cables puede ser drásticamente reducido usando sensores ópticos debido a que el cableado es más compacto.

5.3 ANALISIS ECONOMICO DE LOS SENSORES OPTICOS VS. SENSORES CONVENCIONALES.

En lo que se refiere al aspecto económico, los sensores ópticos ofrecen muchas ventajas en comparación a los sensores convencionales. Dichas ventajas serán analizadas en el siguiente estudio.

a) Costos en la subestación

- Se reducen los costos en trabajos civiles y estructuras de soporte debido al reducido peso de estos instrumentos.
- Se reducen los costos en diseños eléctricos y mecánicos debido a su flexibilidad en el uso de un sistema combinado de CT's y PT's.

- Se reduce el costo en el tendido de cables.
- Se reducen los costos en el tamaño de la subestación debido a la combinación de los CT's y PT's en un sólo instrumento.
- Se reducen los costos a causa de la reducción de las unidades en la subestación.

b) Costos de instalación.

- Se reducen costos de transportación y manejo debido a su peso ligero.
- Se reducen los costos debido a que no hay manejo de aceite ó SF6.

c) Costos de mantenimiento

- Se reducen los costos en mantenimiento del aislamiento en aceite ó SF6.
- Se reducen los costos que ocasiona la disposición del llenado de aceite ó SF6.

d) Costos de limpieza y mitigación de explosiones.

- Se reducen los costos debido al riesgo de una falla eventual.
- Se reducen los riesgos de ferresonancia.

e) Seguridad ambiental

- Estos elementos que están libres de aceite ó Sf6 reducen la necesidad de mediciones que puedan afectar el medio ambiente.

- No hay riesgos de secundarios abiertos, lo cual provee un ambiente de trabajo seguro.
- Las fibras ópticas aíslan eléctricamente el cuarto de control del equipo de campo impidiendo daños desde que está siendo instalado hacia su envío al cuarto de control.

f) Operación

- Utilidad de una precisión mejorada en cargas elevadas.
- Mejoras en la precisión sobre un amplio rango de temperaturas.
- Se reducen responsabilidades legales concernientes a la precisión y a la estimación de las pérdidas del transformador.
- Se reducen las responsabilidades legales a través de una mejor medición de la calidad de la energía.

5.3.1 SENSORES OPTICOS DE CORRIENTE VS. SENSORES CONVENCIONALES DE CORRIENTE

Los sensores convencionales de corriente son de precio más económico que los sensores ópticos de corriente a niveles de voltaje de 230 KV. ó menores, pero estos instrumentos son la mejor solución económica a largo plazo aún en niveles de voltaje menores a 230 KV.

Estos dispositivos disminuirán pérdidas y errores en precisión que se acumulan al transmitir los datos en forma analógica así como en eficiencia y efectividad.

Antes de realizar un estudio económico de estos dos instrumentos anteriormente mencionados se realizará una breve introducción acerca de los mismos:

Los transformadores convencionales de corriente cuyo devanado primario está conectado en serie en la línea sirven de doble propósito: 1) La medición conveniente de grandes corrientes y 2) el aislamiento de instrumentos, medidores, relés de circuitos de altos voltajes.

Los sensores ópticos de corriente son totalmente diferentes a los convencionales porque basan sus efectos en fenómenos físicos ópticos los cuales generan una muy alta precisión.

Como se analizó en el capítulo IV, este sensor encierra (un determinado número de vueltas) un conductor, el cual porta una determinada corriente y detecta el campo magnético. De acuerdo a la ley de Ampere este campo es directamente proporcional a la corriente fluyendo a través del conductor.

Esta corriente es inmune a la vibración, efectos de temperatura, proporcionan un completo aislamiento del sistema, no tienen límites de saturación, no

presentan daños debido a la posibilidad de un secundario abierto y permite la medición de señales desde 0,1 A. a 100,000 A.

Considerando el aspecto económico se realizó un estudio de los costos de los transformadores convencionales de corriente para voltajes de 138 KV. y 230 KV. (propios de nuestro medio) versus sensores ópticos de corriente para los mismos voltajes y se llegó a los siguientes resultados:

- *Transformador convencional de corriente (138 KV).*

| | |
|---|----------|
| Voltaje Nominal | 138 KV. |
| Corriente nominal primaria | 1200 A. |
| Corriente nominal secundaria | 5 A. |
| Corriente máxima permanente | 1440 A. |
| Corriente nominal de corta duración, 1s. | 31,5 KA. |
| Corriente dinámica, según IEC | 79 KA. |
| Corriente nominal primaria en sobrecarga como porcentaje de la corriente nominal | 120% |
| Niveles nominales de aislamiento | |
| a) Voltaje soportable a onda de impulso | 550 KV. |
| b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min | 230 KV. |
| VALOR (\$/ Por fase) | 8,000 |

* *Sensor óptico de corriente 138 KV. (NXCT)*

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- a) Tres columnas aislantes con el sensor de corriente ubicado en la parte superior.
- b) Un chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto-electrónico para el sensor de corriente.
- c) Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.
- d) Se proveen salidas analógicas de alto nivel (HEA) como interfase para aplicaciones de medición.

| | |
|---------------------|--------|
| VALOR (\$/Por fase) | 23,000 |
|---------------------|--------|

• *Transformador convencional de corriente (230 KV).*

| | |
|--|----------|
| Voltaje Nominal | 230 KV. |
| Corriente nominal primaria | 1200 A. |
| Corriente nominal secundaria | 5 A. |
| Corriente máxima permanente | 1440 A. |
| Corriente nominal de corta duración, 1s. | 31,5 KA. |
| Corriente dinámica, según IEC | 79 KA. |
| Corriente nominal primaria en sobrecarga | |

| | |
|--|----------|
| como porcentaje de la corriente nominal | 120% |
| Niveles nominales de aislamiento | |
| a) Voltaje soportable a onda de impulso | 1050 KV. |
| b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min | 460 KV. |
| VALOR (\$/ Por fase) | 13,000 |

* *Sensor óptico de corriente 230 KV. (NXCT)*

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- e) Tres columnas aislantes con el sensor de corriente ubicado en la parte superior.
- f) Un chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto-electrónico para el sensor de corriente.
- g) Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.
- h) Se proveen salidas analógicas de alto nivel (HEA) como interfase para aplicaciones de medición.

| | |
|---------------------|--------|
| VALOR (\$/Por fase) | 26,000 |
|---------------------|--------|

Vale recalcar que los datos fueron proporcionados (técnicos-económicos) para los transformadores convencionales por TRANSELECTRIC y para los sensores ópticos por NEXTPHASE CORP. (pionera en la elaboración de estos dispositivos ópticos).

Estos valores nos demuestran que los transformadores convencionales de corriente son mucho más accesibles que los sensores ópticos de corriente, pero esta suele resultar una economía de muy corto plazo, debido a que los sensores ópticos tienen una vida útil mucho más larga que la de los instrumentos convencionales.

El hecho de que estos dispositivos ópticos disminuyan las pérdidas y errores en la precisión, el aspecto económico queda relegado a un segundo plano ya que la inversión se paga por sí misma.

El sensor óptico de corriente ofrece una precisión de 0,2% hasta 3000 A. y 0,3% en rangos menores a 2 A. . En el caso de una compañía generadora de energía por cada 0,1% que mejore la exactitud de medición de la energía puede ahorrarse mucho dinero recuperando en muy corto tiempo la inversión.

5.3.2 SENSORES OPTICOS DE VOLTAJE VS. SENSORES CONVENCIONALES DE VOLTAJE.

Económicamente los sensores convencionales de voltaje son más accesibles que los sensores ópticos de voltaje para voltajes de 230 KV. ó menores.

Constitutivamente los sensores ópticos de voltaje basan sus resultados en fenómenos físicos ópticos como las celdas de Pockels, detalladas anteriormente, mientras que los transformadores convencionales de voltaje basan sus resultados en un divisor capacitor de voltaje.

Como en el caso anterior se hará un estudio económico acerca de estos dos tipos de sensores.

- *Transformador de Tensión capacitivo 138 KV.*

| | |
|--|---------------|
| Voltaje nominal primario (fase-Tierra) | 138/1.732 KV. |
| Capacitancia (fase-Tierra) | 1600 PF |
| Voltaje nominal de salida | 115/66.4 V. |
| Factor de Voltaje | 120 % |
| Niveles nominales de aislamiento | |
| a) Voltaje soportable a onda de impulso | 650 KV. |
| b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min | 275 KV rms |
| Capacitancia mínima (fase-Tierra) | 1600 PF |
| | |
| VALOR (\$/Por fase) | 7000 |

- * *Sensor óptico de voltaje 138 KV. (NXVT)*

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- Tres columnas aislantes con el sensor de voltaje ubicado internamente a la columna.
- Dos chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto-electrónico para el sensor de voltaje.
- Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.

| | |
|---------------------|--------|
| VALOR (\$/Por fase) | 23,000 |
|---------------------|--------|

- *Transformador de Tensión capacitivo 230 KV.*

| | |
|--|---------------|
| Voltaje nominal primario (fase-Tierra) | 230/1.732 KV. |
| Capacitancia (fase-Tierra) | 1600 PF |
| Voltaje nominal de salida | 115/66.4 V. |
| Factor de Voltaje | 120 % |
| Niveles nominales de aislamiento | |
| a) Voltaje soportable a onda de impulso | 650 KV. |
| b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min | 275 KV rms |
| Capacitancia mínima (fase-Tierra) | 1600 PF |
| VALOR (\$/Por fase) | 12000 |

- * *Sensor óptico de voltaje 230 KV. (NXVT)*

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- d) Tres columnas aislantes con el sensor de voltaje ubicado internamente a la columna.
- e) Dos chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto-electrónico para el sensor de voltaje.
- f) Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.

| | |
|---------------------|--------|
| VALOR (\$/Por fase) | 26,000 |
|---------------------|--------|

Comparativamente ha quedado demostrado que los transformadores convencionales de voltaje son mucho más económicos que los sensores ópticos de voltaje, la posibilidad de hacer una inversión que justifique un costo elevado radica en el hecho de que los beneficios técnicos que brinda esta tecnología son insuperables, además la inversión es 100% recuperada en muy corto tiempo, lo cual es la principal base sustentable para que se considere la adquisición de estos dispositivos.

Una mayor precisión en la medición puede representar la recuperación de la inversión en unos cuantos meses. Tradicionalmente un transformador de corriente y un transformador de voltaje tienen una precisión de 0.3% cada uno, el medidor de energía añade otro 0.2% y el cable añade otro 0.1% para una precisión total del sistema de 0.9%. En contraste un sensor óptico con interfase digital tiene el potencial de reducir el error a 0.3% (precisión transformador de corriente óptico= 0.1%; precisión transformador de voltaje óptico= 0.2%). Con interfase analógica el sistema óptico puede ofrecer una precisión del 0.6%.

Considerando el siguiente ejemplo se demostrará el ahorro que se produce debido a la mejora en la precisión:

Una compañía generadora de energía con capacidad de 300 megawatt que opera 5000 horas al año y considerando un precio bajo por megawatthora de \$40 dólares. Cada 0.1% de mejoría en la precisión representa \$60,000 dólares (300 MW x 5000 hrs x 40 dólares/megawatthora x 0.1%) al año.

5.3.3 SENSORES OPTICOS CORRIENTE – VOLTAJE VS. SENSORES CONVENCIONALES

Los sensores ópticos tienen la particularidad de que en un solo dispositivo se puede realizar aplicaciones de medición y protección así como para medición de voltaje y corriente. En los dispositivos convencionales se necesita en elemento tanto para medición como para protección situación que le da una gran ventaja a estos elementos en comparación a los convencionales.

Considerando el aspecto económico se puede detallar lo siguiente:

* *Sensor óptico de Voltaje y Corriente 138 KV. (NXVCT)*

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- a) Tres columnas aislantes con el sensor de voltaje ubicado internamente a la columna
- b) Dos chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto electrónico para el sensor de voltaje.
- c) Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.

- d) Se proveen salidas analógicas de alto nivel (HEA) como interfase par aplicaciones de medición.

VALOR (\$/Por fase) 40,000

* *Transformador convencional (corriente + voltaje) 138 KV.*

Voltaje nominal primario (fase-Tierra) 138/1.732 KV.

Capacitancia (fase-Tierra) 1600 PF

Voltaje nominal de salida 115/66.4 V.

Factor de Voltaje 120 %

Niveles nominales de aislamiento

a) Voltaje soportable a onda de impulso 650 KV.

b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min 275 KV rms

Capacitancia mínima (fase-Tierra) 1600 PF

VALOR (\$/Por fase) 15,000

• Sensor óptico de Voltaje y Corriente 230 KV. (NXVCT)

El sistema trifásico se compone de lo siguiente:

- b) Tres columnas aislantes con el sensor de voltaje ubicado internamente a la

columna

- b) Dos chasis para montaje en rack de 1,9 pulgadas con los módulos opto electrónico para el sensor de voltaje.
- c) Cable y caja de interconexión con cable y fibra de 100 mts de longitud.
- d) Se proveen salidas analógicas de alto nivel (HEA) como interfase par aplicaciones de medición.

VALOR (\$/Por fase) 50,000

* *Transformador convencional (corriente + voltaje) 230 KV.*

Voltaje nominal primario (fase-Tierra) 230/1.732 KV.

Capacitancia (fase-Tierra) 1600 PF

Voltaje nominal de salida 115/66.4 V.

Factor de Voltaje 120 %

Niveles nominales de aislamiento

a) Voltaje soportable a onda de impulso 650 KV.

b) Voltaje soportable a frecuencia industrial, 1 min 275 KV rms

Capacitancia mínima (fase-Tierra) 1600 PF

VALOR (\$/Por fase) 25,000

Se debe considerar todos los beneficios tanto técnicos como económicos que estos dispositivos ofrecen a largo plazo con una recuperación segura de la inversión, muy al contrario de los elementos convencionales que con el paso de los años su precisión va deteriorándose debido a múltiples factores como antigüedad o depreciación, fallas mecánicas, fallas eléctricas, calibración de los equipos, etc, lo que suele conllevar pérdidas significativas . De ahí que el tema amerita un exhaustivo análisis porque muchas veces la relación de valores que pudiera existir , comparativamente, puede determinar que a simple vista se tomen decisiones incorrectas con el ánimo de ejecutar acciones en base a una economía falsa que con el tiempo resulta ser perjudicial.

CONCLUSIONES

- 1.- Los sensores ópticos de voltaje y corriente constituyen la nueva era y tecnología en lo que se refiere a medición indirecta en sistemas de Alta Tensión, superando claramente a los tradicionales transformadores de voltaje y corriente.
- 2.- Las leyes físicas acerca de la geometría óptica, formulada años atrás, están siendo consideradas de gran importancia en los actuales momentos, en base al éxito en sus múltiples aplicaciones en el campo de la Ingeniería. Específicamente, en base a estos fenómenos se han podido elaborar dispositivos que superan en todos los aspectos a elementos tradicionales que han basado su tecnología en leyes físicas convencionales, las cuales sin embargo han dado paso a nuevas teorías físicas modernas.
- 3.- La inversión de estos dispositivos, pese a su costo, está absolutamente garantizada en base a los beneficios técnicos que estos ofrecen, a su rentabilidad y a una vida útil mucho más larga que los tradicionales elementos de medición.
- 4.- La precisión en la medición de estos dispositivos constituyen la base y la importancia en la cual basan su tecnología, dado que las pérdidas desde que toma la información en la subestación de Alta Tensión hasta que llega al cuarto de control son muy mínimas en comparación con los transformadores convencionales.

5.- La relación costo-beneficio es directamente proporcional en esta clase de dispositivos ópticos donde el costo de estos instrumentos es relativamente alto, considerando que maneja elementos costosos, pero a su vez los beneficios son múltiples que van desde la precisión en la medición, bajo mantenimiento y la posibilidad de que en un sólo elemento se junten características de medición y protección. Su depreciación es muy lenta en comparación a los elementos convencionales, teniendo en consideración que estos manejan elementos como el cobre y el hierro que van perdiendo su capacidad técnica con el paso de los años.

RECOMENDACIONES

- 1.- Se recomienda el uso de estos dispositivos ópticos digitales en base a la tecnología que manejan y a los múltiples beneficios que estos ofrecen.
- 2.- Informar más detalladamente al sector eléctrico acerca de estos dispositivos ópticos digitales por medio de cursos, seminarios, charlas, etc impartidos por gente especializada para su completa difusión.
- 3.- Tratar de introducir en el mercado eléctrico esta nueva tecnología, teniendo en consideración que ésta es el futuro de la medición indirecta en una subestación de Alta Tensión.
- 4.- Conseguir por medio de gestiones pertinentes, que los proveedores internacionales tengan la capacidad de proveer prototipos a determinados voltajes a manera de donación científica, esto ayudará a una publicidad más extensa y a una difusión completa de estos dispositivos.
- 5.- Ingresar dentro de los estudios correspondientes en las respectivas universidades y centros de enseñanza los nuevos avances tecnológicos dentro del campo de la medición indirecta en Alta Tensión .

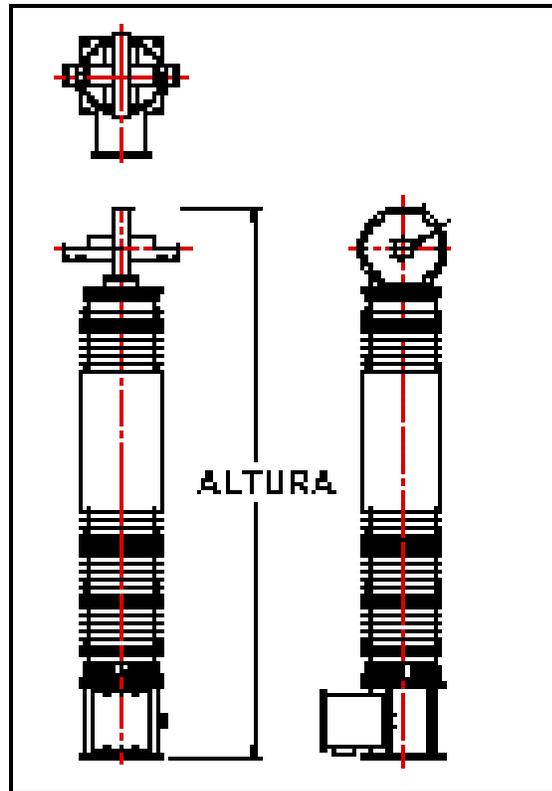
ANEXOS



Prototipo de un transductor óptico de voltaje bajo pruebas en laboratorios de Alto Voltaje



*TRANSDUCTOR OPTICO DE VOLTAJE Y CORRIENTE
(CANADA)*



TRANSDUCTOR OPTICO DE CORRIENTE, VOLTAJE Y CORRIENTE - VOLTAJE

| | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| VOLTAJE NOMINAL (KV) | 115 | 138 | 230 | 345 | 500 |
| BIL (KV) | 550 | 650 | 1050 | 1300 | 1800 |
| ALTURA | | | | | |
| Pulgadas | 65 | 76 | 119 | 130 | 181 |
| Milímetros | 1650 | 1930 | 3025 | 3300 | 4600 |
| PESO | | | | | |
| Libras | 170 | 180 | 400 | 500 | 700 |
| Kilogramos | 77 | 82 | 180 | 225 | 320 |

BIBLIOGRAFIA

1. A.J. ROGERS, "Técnicas Ópticas para la medición de corriente en sistemas de Alta Tensión", Volumen 120 , pp. 261-267, 1973.
2. G.A. MASSEY, "Componentes del campo electromagnético: Medición usando efectos lineales electro-ópticos y magneto-ópticos", Volumen 14, pp. 2712-2719, 1975.
3. R.E. HEBNER, "Métodos Ópticos para mediciones eléctricas en niveles de Alto Voltaje", Volumen 65, pp. 1524-1548, 1977.
4. F. RAHMATIAN, "Sensor de Alto Voltaje con celdas ópticas de Pockels", Volumen 10, pp. 127-134, Enero 1995.
5. H. USAMI, "Desarrollo de la fibra Óptica en sensores de voltaje y sensores de campo magnético", Volumen PWRD-2, no.1. pp. 87-93, Enero 1987.
6. DONALD G. FINK., "Transformadores convencionales que se emplean para medición indirecta en sistemas de Alta Tensión", Volumen 1, pp. 3-27 - 3-29, 1995.
7. R.F. COOK, "Sistema de medición Óptico", Conferencia de la IEEE, Washington, pp. 1-4, Abril 3, 1990.

8. T. YOKATA, “Desarrollo de los Transformadores Opticos como instrumentos de medición”, Volumen 5, pp. 884-891, 1990.