



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

# **ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN EL PARQUE EÓLICO EL COCO**

## **T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia**

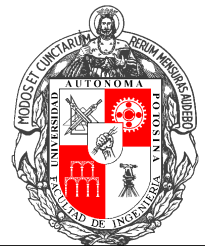
Presenta:

**Ing. Samuel Salinas Martínez**

Asesor:

**Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez**

**Dra. Nancy Visairo Cruz**





**UASLP**

Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí

21 de junio de 2018

**ING. SAMUEL SALINAS MARTÍNEZ  
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez y Nancy Visairo Cruz**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 21 de junio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“Análisis de Sobretensiones en Parque Eólico el Coco”**

Introducción.


1. Descripción y parámetros del parque eólico el Coco.
2. Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.
3. Modelo de fallas de fase a tierra del parque eólico Coco.

Conclusiones.

Bibliografía.

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**



**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ**  
**DIRECTOR**



Copia. Archivo  
\*etn.



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx

---

---

# Resumen

---

En este trabajo se realiza un análisis de sobretensiones ante fallas de fase a tierra del parque eólico el Coco. Se muestra teoría del comportamiento de circuitos eléctricos de máquinas síncronas e inversores con cargas en estrella y delta. Además, se realiza el modelado del parque eólico donde se simulan fallas de fase a tierra para analizar su comportamiento.

---

---

## Dedicatoria

---

*Dedicado a mi familia, a mis padres por siempre dar la pauta de la ruta a seguir, a mis hermanos por apoyarnos mutuamente en el camino y a mi pareja por su gran apoyo y comprensión.*

---

---

## Agradecimientos

---

*El más sincero agradecimiento al Dr. Edmund O. Schweitzer III por apoyar, fomentar, impulsar y potenciar el conocimiento en sus empleados a través de los valores que rigen la compañía. A los Doctores y Directores que con su esfuerzo y dedicación desarrollaron el sistema educativo de vinculación de la industria privada y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.*

---

---

# Índice general

---

## Capítulo

<b>1. Descripción y parámetros del parque eólico El Coco.</b>	<b>5</b>
1.1. Los transformadores. . . . .	6
1.2. Aerogeneradores. . . . .	7
1.3. Líneas subterráneas y aéreas. . . . .	9
<b>2. Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.</b>	<b>11</b>
2.1. Carga en estrella y generador síncrono. . . . .	12
2.2. Carga en estrella e inversor. . . . .	13
2.3. Carga en delta e inversor . . . . .	16
<b>3. Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.</b>	<b>19</b>
3.1. Simulaciones . . . . .	23
<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>

---

---

# Índice de cuadros

---

## Cuadro

1.1. Parámetros eléctricos de transformadores. . . . .	7
1.2. Parámetros de aerogenerador. . . . .	8
2.1. Valores de componentes simétricas. . . . .	17

---

---

# Índice de figuras

---

## Figura

1.	Diagrama unifilar del parque eólico el Coco. . . . .	3
1.1.	Diagrama unifilar de la subestación el Coco con arreglo interruptor y medio. . . . .	5
1.2.	Circuitos colectores. . . . .	6
1.3.	Diagrama esquemático de aerogenerador. . . . .	8
1.4.	Esquema geográfico del parque eólico el Coco. . . . .	9
1.5.	Circuitos colectores parque eólico el Coco. . . . .	10
2.1.	Generador síncrono no aterrizado con carga en estrella. . . . .	12
2.2.	Inversor con carga en estrella. . . . .	14
2.3.	Red de secuencia ante fallas de fase a tierra. . . . .	16
2.4.	Inversor con carga en delta. . . . .	17
3.1.	Sistema modelado. . . . .	19
3.2.	Ajustes aerogenerador en DIgSILENT PowerFactory. . . . .	20



3.3. Parámetros de transformadores T9X. . . . .	21
3.4. Parámetros de transformadores TDG. . . . .	21
3.5. Líneas creadas en el modelo. . . . .	22
3.6. Eventos simulados de fallas de fase a tierra. . . . .	23
3.7. Evento cortocircuito fase <i>a</i> . . . . .	24
3.8. Tensiones pico a pico ante falla de fase <i>a</i> a tierra. . . . .	25
3.9. Componentes simétricas de voltaje en barra C ante una falla de la fase A a tierra. . . . .	26
3.10. Modelo de Aerogenerador Carga con estrella y delta. . . . .	27
3.11. Componentes simétricas de voltaje en modelo aerogenerador y carga delta y estrella en paralelo. . . . .	28
3.12. Modelo de aerogenerador-transformador-carga. . . . .	29
3.13. Corriente de falla en el nodo k. . . . .	30
3.14. Equivalente de red de secuencias ante fallas de fase a tierra considerando transformador delta/estrella. . . . .	31
3.15. Fases de componentes de secuencia 0 y 1 de tensión. . . . .	32
3.16. Corriente en el aerogenerador ante una falla de fase <i>a</i> tierra en la barra de carga. . . . .	34

---

---

# Introducción.

---

A través del tiempo el hombre ha utilizado la gran cantidad de energía eólica que existe en el mundo, desde los veleros en el siglo III a.C. utilizados por los egipcios y fenicios; Pasando por los molinos de viento, de los cuales se tiene sus primeros registros en Persia, Medio Oriente en el siglo VII y mejorados posteriormente en Europa; y que se utilizaron para diversas tareas como moler, bombear agua y otras; hasta los primeros generadores de energía eléctrica desarrollados a finales del siglo XIX en Dinamarca, a cargo del profesor Lacour en 1892.

Sin embargo, ha sido hasta finales del siglo XX, en la década de los 70s con la crisis petrolera y aunado al avance tecnológico, que se impulsó el estudio de fuentes alternativas de energía, entre otras, la energía eólica.

Hasta el año 1996, la capacidad de generación eólica instalada en todo el mundo era de sólo 6 GW.

La energía transmitida por el sol en lugares favorables, puede ser del orden de 2000 kWh/m<sup>2</sup> anuales y el 2 por ciento de ella se transforma en energía eólica debido a la diferencia de temperatura por el calentamiento del planeta. Para aprovechar esta energía, muchos países han realizado grandes inversiones en energías renovables a fin de evitar

---

la emisión de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> a la atmósfera debido a plantas generadoras de combustión y de contar con energías limpias y renovables. Siendo países como Alemania, España, Reino Unido y Dinamarca los que en recientes años han hecho crecer la generación de energía eólica motivados por los incentivos de la Unión Europea [1].

Los sistemas de generación eólica se están convirtiendo cada vez en una alternativa recurrente de fuentes de energía. Los aerogeneradores de velocidad variable son cada vez más populares en comparación con la velocidad fija, debido a que, presentan una solución atractiva en la capacidad de extracción y alta calidad de potencia [8].

En los recientes años se han realizado grandes esfuerzos e inversiones en América Latina en este rubro. Destacando el país de Panamá que cuenta con un gran crecimiento económico y demanda de energía eléctrica en los últimos años, donde se encuentra el parque eólico el Coco.

En la ciudad de Panonomé ubicada a 70 millas al suroeste de la ciudad de Panamá se localiza el parque eólico más grande de todo Centro América con una capacidad final de 337.5 MW de generación, actualmente se tienen en servicio las primeras dos de tres etapas definidas, las cuales generan 270 MW [2]. El parque eólico de generación se conecta al sistema de transmisión en la subestación el Coco 34/230 kV.

A la subestación el Coco llegan 12 circuitos colectores, éstos constan de varios aerogeneradores y en cada circuito colector se tienen diferentes números de aerogeneradores, así que cada circuito entrega diferentes niveles de potencia.

Los aerogeneradores están conectados a un transformador estrella/delta de 0.69/34.5 kV, para transmitir la energía hacia la subestación el Coco, donde dos transformadores delta/estrella interconectan la generación al sistema de transmisión de 230 kV, como se muestra en la Figura 1.

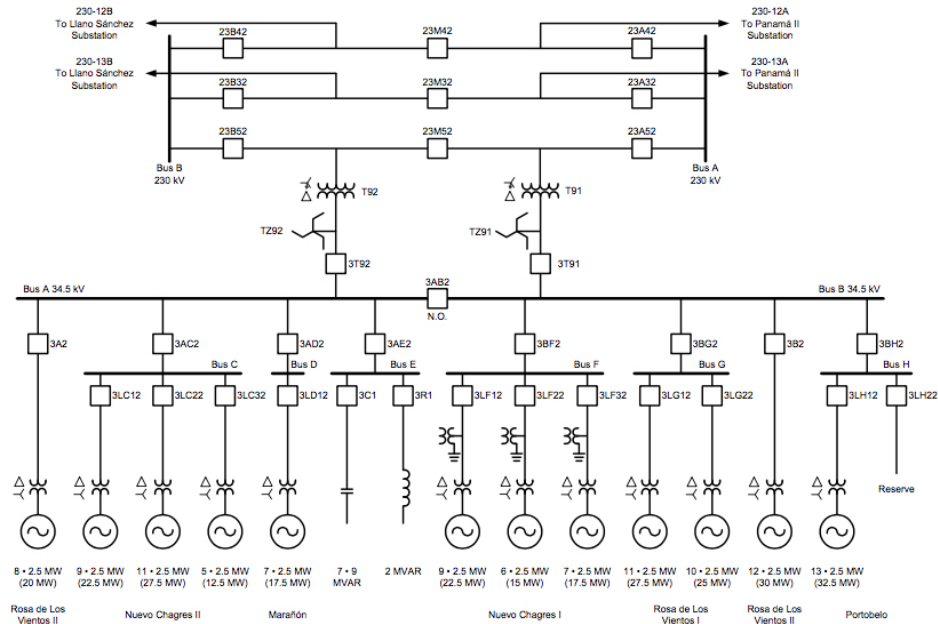


Figura 1: Diagrama unifilar del parque eólico el Coco.

El sistema de 34.5 kV queda entre dos deltas sin referencia a tierra. Por esta razón, el sistema no está solidamente aterrizado y la referencia a tierra es a través de dos transformadores zig-zag; esto plantea un gran reto ya que al operar algunos interruptores ante algún tipo de falla, el sistema puede volverse un sistema no aterrizado.

El parque eólico el Coco presenta sobre tensiones en las fases sanas cuando ocurren fallas de fase a tierra en los circuitos colectores. Estas sobre tensiones han ocasionado explosiones de los aparta rayos incluso después de operar algunas protecciones.

Se ha demostrado que aterrizar correctamente el sistema eléctrico de potencia es importante para una adecuada operación de las protecciones eléctricas, facilitando su análisis. Un alto porcentaje de fallas involucran fallas a tierra, lo que tiene un efecto importante en la protección de todos los elementos del sistema de potencia.

Los sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados se pueden dividir en 4 tipos: sin aterrizar, de alta impedancia, de baja impedancia y sólidamente aterrizado. Cada tipo

---

tiene sus ventajas e inconvenientes así como aplicaciones específicas en cada sistema [3].

Los principales propósitos de tener una buena referencia a tierra son: minimizar posibles sobre tensiones, establecer una referencia para la rápida detección de fallas y aislamiento ante las mismas.

Algunas hipótesis del problema de sobretensiones del Coco que fueron valoradas por el usuario final son:

- No aterrizar sólidamente a tierra el nivel de 34.5 kV.
- La pérdida de referencia a tierra de los transformadores zig-zag cuando ocurre una falla.
- La posible presencia de armónicas ante fallas de fase a tierra.

Sin embargo, otra hipótesis que no ha sido valorada por el usuario es el efecto de los sistemas de electrónica de potencia que interconectan los aerogeneradores con la red eléctrica ante un escenario de falla. De esta manera, el alcance de este trabajo de tesis es analizar el efecto de los convertidores de electrónica de potencia en la generación de sobre voltajes ante escenarios de falla.

Para abordar este caso de estudio, este trabajo está dividido en los siguientes capítulos: En el Capítulo I se describe el sistema eléctrico de potencia el Coco y sus principales componentes, en el Capítulo II se realiza un análisis de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados con inversores con cargas en estrella y delta. En el Capítulo III se muestra el modelado de fallas de fase a tierra en el parque eólico el Coco, finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

# Capítulo 1

## Descripción y parámetros del parque eólico El Coco.

La subestación el Coco tiene un arreglo de interruptor y medio en el nivel de 230 kV, el cual conecta a las subestaciones Panamá II a través de las líneas 230-12A y 230-13A y a la subestación Llano Sánchez con las líneas 230-12B y 230-13B.

Dos transformadores T91 y T92 de 120/140 MVA, 230/34.5 kV los cuales interconectan al nivel de 34.5 kV, como se muestra en la Figura 1.1.

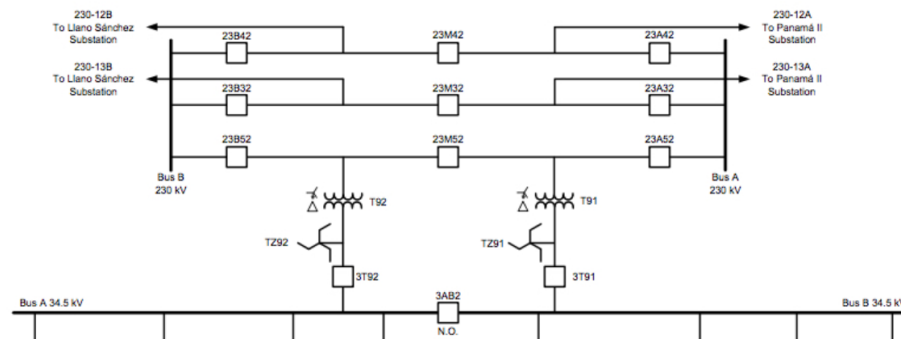


Figura 1.1: Diagrama unifilar de la subestación el Coco con arreglo interruptor y medio.

Doce circuitos colectores de cable subterráneo y aéreo conectados a dos barras de 34.5 kV. Estos circuitos colectores constan de diferente número de aerogeneradores y es por eso que el nivel de potencia que transmiten a la subestación varía en cada circuito

colector.

Los aerogeneradores que forman al parque eólico se muestran en la Figura 1.2.

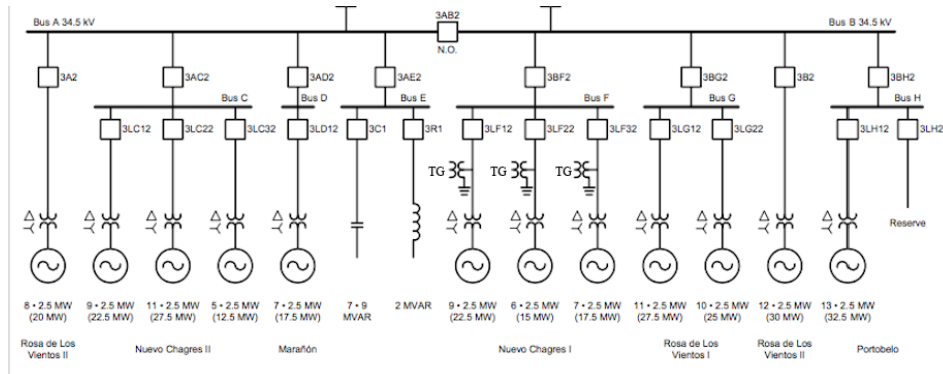


Figura 1.2: Circuitos colectores.

## 1.1 Los transformadores.

Los transformadores elevadores T91 y T92 interconectan el sistema de 34.5 kV con el sistema de transmisión de Panamá de 230 kV, como se muestra en la Figura 1.1. Estos son de dos devanados con conexión a tierra en el cierre de la estrella con configuración YNd11 y potencia nominal de 120/140 MVA, de esta manera la conexión estrella se localiza en el devanado de alta tensión de los transformadores, por lo tanto, sólo se tiene referencia en el devanado de 230 kV.

Los transformadores en los aerogeneradores designados con nomenclatura TDG cuentan con una configuración Dyn5, potencia nominal 2.75 MVA, nivel de transformación de 34.5 kV/0.96 kV, donde su conexión delta está ubicada en el devanado de 34.5 kV.

De esta manera, debido a las conexiones delta de los transformadores elevadores T91, T92 y los transformadores de los aerogeneradores están conectados al nivel de tensión de 34.5 kV, el sistema no está aterrizado, y por lo tanto, no tiene referencia a tierra en este nivel de tensión.

## Descripción y parámetros del parque eólico El Coco.

Esta referencia la brindan dos transformadores zig-zag TZ91 y TZ92, la cual puede perderse ante la operación de algunos interruptores al liberar fallas detectadas por el sistema de protecciones eléctricas. Estos transformadores zig-zag están conectados en la parte de baja tensión de los transformadores elevadores T91 y T92.

El circuito colector Nuevo Chagres I es el único que está aterrizado a tierra a través de transformadores tipo Ynd1 por recomendación del fabricante de aerogeneradores. Estos actúan como una fuente de corriente ante fallas de fase a tierra. Estos serán asignados con la nomenclatura TG y se muestran en la Figura 1.2 en el circuito de Nuevo Chagres I.

Los parámetros de todos los transformadores utilizados en la subestación se muestran en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1: Parámetros eléctricos de transformadores.

Identificación de transformador	Alta tensión (kV)	Baja tensión (kV)	Potencia nominal (MVA)	Grupo vectorial	Impedancia (%)	Impedancia (ohms)
T91	230	34.5	120/140	Ynd11	10.95	-
T92	230	34.5	120/140	Ynd11	10.95	-
TZ91	-	34.5	0.5	ZN0	-	59.47
TZ92	-	34.5	0.5	ZN0	-	60.15
TDG	34.5	0.69	2.75	Dyn5	6.97	-
TG	34.5	0.48	1.25	Ynd1	5.63	-

## 1.2 Aerogeneradores.

El parque eólico de el Coco cuenta con 108 aerogeneradores idénticos en su segunda etapa, estos son tipo 4, 2500 kW, 690 V. Cada aerogenerador consiste en una turbina de viento de velocidad variable acoplada con bandas a un generador síncrono de imanes permanentes de tres polos. El generador se conecta a la red a través de un convertidor "back to back", basado en transistores bipolares de compuerta aislada y un transformador de 2750 kVA, 0.69 kV / 34.5 kV, estrella / delta. La Figura 1.3 muestra el diagrama esquemático de los aerogeneradores.



## Descripción y parámetros del parque eólico El Coco.

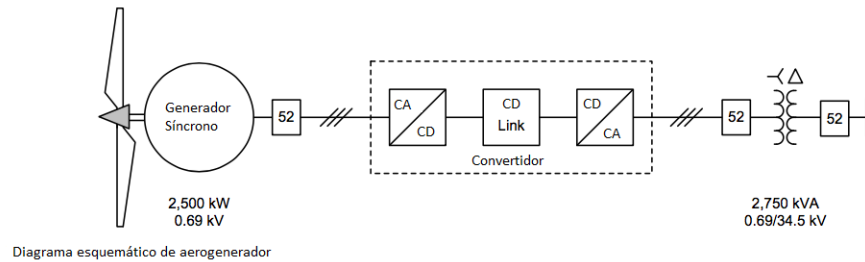


Figura 1.3: Diagrama esquemático de aerogenerador.

El Cuadro 1.2 muestra los parámetros del aerogenerador.

Cuadro 1.2: Parámetros de aerogenerador.

Parámetros	Valor	Unidad
Número de fases	3	-
Tensión nominal	690	V
Potencia activa	2500	kW
Potencia aparente	2632	kVA
Potencia reactiva	820 inductiva a 820 capacitiva	kVAR
Factor de potencia	0.95 adelanto a 0.95 atraso	-
Corriente de corto circuito	2600	A
Frecuencia	60	Hz
Impedancia de secuencia positiva	0.7530	pu
Impedancia de secuencia negativa	0.7530	pu

Los aerogeneradores de tipo 4 ofrecen flexibilidad de diseño y operación. Pueden producir energía con una amplia gama de velocidades de viento, permitir un control rápido e independiente de la potencia activa y reactiva, limitar la corriente de falla y cumplir con los requisitos de conducción de baja tensión de las agencias reguladoras de la industria.

La turbina gira a su velocidad aerodinámica óptima y la unidad genera potencia a una frecuencia inferior a la frecuencia de la red. Los inversores proporcionan la conversión de frecuencia y hacen posible suministrar potencia a la red [4][5].

El sistema de control permite al aerogenerador proporcionar potencia activa, potencia reactiva, tensión y frecuencia controlados. Además de regir completamente el

comportamiento de los aerogeneradores con su electrónica de potencia.

### 1.3 Líneas subterráneas y aéreas.

El cable utilizado en los circuitos colectores del parque eólico es de aluminio modelo EPROTENA H VEMEX 20.3/35 kV tipo HEPRZ1. Se cuenta con los parámetros de estas líneas tales como su longitud, diámetro, resistencias, reactancias y conductancias.

En la Figura 1.4 se muestra el esquema geográfico del parque eólico. Éste define la ubicación, la cantidad, la distancia y a qué circuito colector pertenece cada aerogenerador. En la Figura 1.5 se muestran cuántos y cuáles aerogeneradores pertenecen a cada circuito colector.

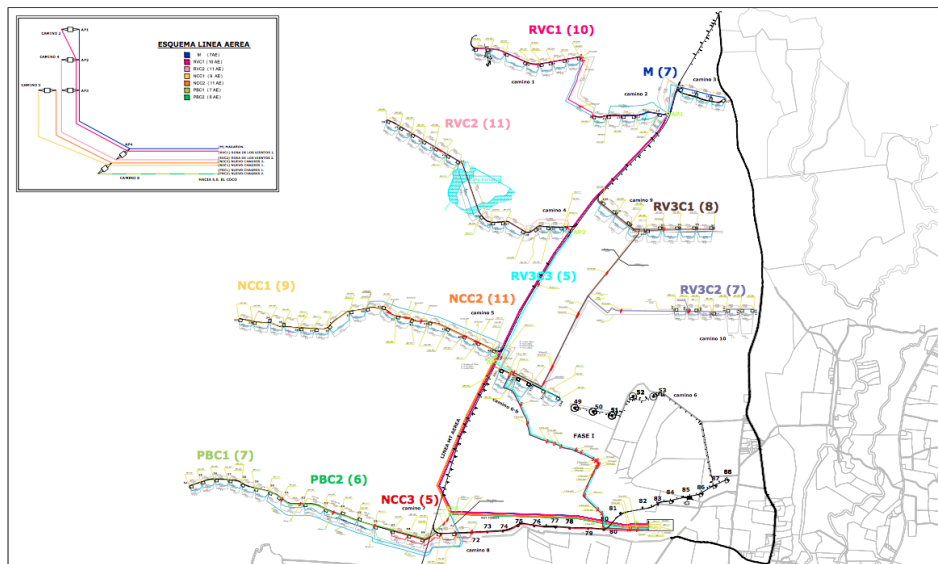


Figura 1.4: Esquema geográfico del parque eólico el Coco.

## Descripción y parámetros del parque eólico El Coco.












<b>FASE II</b>		<b>Licencia</b>	<b>Contenido</b>
	M ( 7 )	Marañon	Circuito de 7 WTG del Ae 11 al Ae 17
	RVC1 ( 10 )	Rosa de los Vientos	Circuito de 10 WTG del Ae 1 al Ae 10
	RVC2 ( 11 )	Rosa de los Vientos	Circuito de 11 WTG del Ae 18 al Ae 28
	NCC1 ( 9 )	Nuevo Chagres	Circuito de 9 WTG del Ae 32 al Ae 40
	NCC2 ( 11 )	Nuevo Chagres	Circuito de 11 WTG del Ae 41 al Ae 148 y Ae104 al Ae 106
	NCC3 ( 5 )	Nuevo Chagres	Circuito de 5 WTG del Ae 67 al Ae 71
	PBC1 ( 7 )	Portobelo	Circuito de 7 WTG del Ae 54 al Ae 60
	PBC2 ( 6 )	Portobelo	Circuito de 6 WTG del Ae 61 al Ae 66
<b>FASE III</b>			
	RV3C1 ( 8 )	Rosa de los Vientos	Circuito de 8 WTG del Ae 93 al Ae 96 y Ae 109 al Ae 112
	RV3C2 ( 7 )	Rosa de los Vientos	Circuito de 7 WTG del Ae 97 al Ae 103
	RV3C3 ( 5 )	Rosa de los Vientos	Circuito de 5 WTG del Ae 29 al Ae 31 y Ae 107 al Ae108

Figura 1.5: Circuitos colectores parque eólico el Coco.

En este capítulo se ha descrito el sistema del parque eólico el Coco y se cuenta con los parámetros necesarios para llevar a cabo su modelado.

## Capítulo 2

---

---

# Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.

---

Las fallas más comunes en un sistema eléctrico de potencia son las fallas de fase a tierra. Diversos estudios han demostrado que aterrizar correctamente estos sistemas puede mitigar el fenómeno de sobrevoltajes en fallas de fase a tierra o por el contrario crear sobrevoltajes de hasta 173 por ciento si la fuente de voltaje no tuviera un aterrizamiento adecuado [3].

Por lo tanto, es fundamental aterrizar correctamente los sistemas eléctricos de potencia para su análisis, la coordinación de protecciones, estudios de cortocircuito, etc. Sin embargo, estos estudios están basados en el uso de máquinas eléctricas y fuentes con referencia a tierra.

En el sistema del parque eólico el Coco se tienen dos condiciones claves: Los aerogeneradores son modelos de máquinas eléctricas y el sistema en el nivel de 34 kV no tienen referencia sólida a tierra.

El comportamiento de los inversores de un aerogenerador es complejo y aún está en discusión si aterrizarlos adecuadamente mitiga o no los fenómenos de sobre tensiones.

A continuación se muestra la teoría de dos sistemas, uno conectado a una máquina síncrona y otro a un inversor [6].

## 2.1 Carga en estrella y generador síncrono.

Se considera el circuito trifásico balanceado de la Figura 3.1. Una fuente trifásica de tensión  $E_0$  seguida de una impedancia  $R+jX_s$ . La tensión en  $V_{Nn}$  es la que existe entre el inicio de la estrella del generador y el neutro de las cargas, la cual es aproximadamente 0 V. La tensión en las impedancias es  $E_0$ .

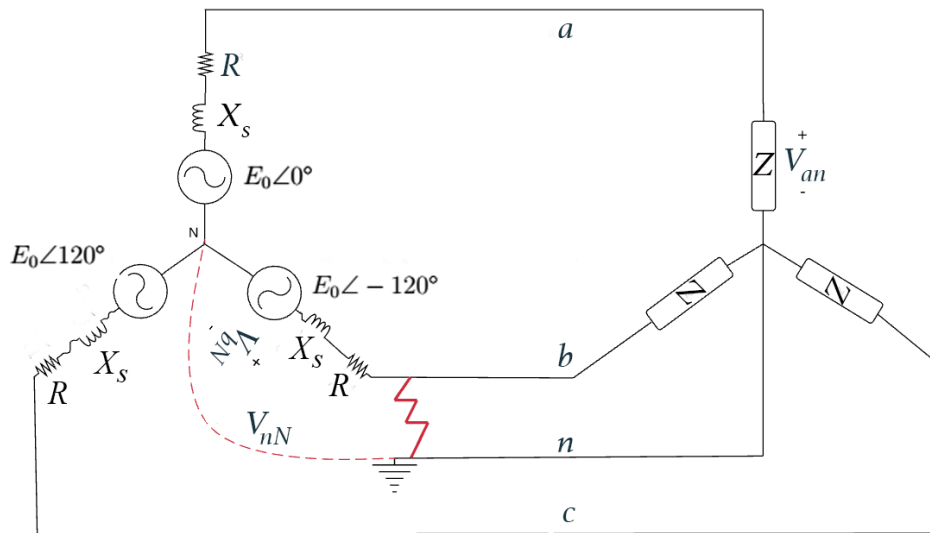


Figura 2.1: Generador síncrono no aterrizado con carga en estrella.

Al generarse una falla de la fase  $b$  a tierra la tensión en  $V_{bn}$  se abate, en consecuencia, la tensión en las fases sanas  $V_{an}$  y  $V_{cn}$  quedan de la siguiente manera:

$$V_{an} = E_0 \angle 0^\circ - E_0 \angle -120^\circ = \sqrt{3}E_0 \angle 30^\circ \quad (2.1)$$

$$V_{cn} = E_0 \angle -240^\circ - E_0 \angle -120^\circ = \sqrt{3}E_0 \angle 90^\circ \quad (2.2)$$

Analizando las componentes simétricas de tensiones en las cargas se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}V_0 &= \frac{1}{3}[V_{an} + V_{bn} + V_{cn}] \\ &= \frac{1}{3}[V_{an} + V_{cn}] \\ &= E_0 \angle 60^\circ \\ V_1 &= \frac{1}{3}[V_{an} + V_{bn} \angle 120^\circ + V_{cn} \angle 240^\circ] \\ &= \frac{E_0}{\sqrt{3}}[1 \angle 30^\circ * 1 \angle 0^\circ + 1 \angle 90^\circ * 1 \angle 240^\circ] \\ &= E_0 \\ V_2 &= \frac{1}{3}[V_{an} + V_{bn} \angle 240^\circ + V_{cn} \angle 120^\circ] \\ &= \frac{E_0}{\sqrt{3}}[1 \angle 30^\circ * 1 \angle 0^\circ + 1 \angle 90^\circ * 1 \angle 120^\circ] \\ &= 0\end{aligned}$$

Se observa que la magnitud de secuencia positiva posterior a la falla es exactamente la misma que los valores que se tienen en  $E_0$  previo a la falla, por lo que la componente de secuencia 0 es la que produce la sobre tensión. Esto puede solucionarse aterrizando correctamente la máquina.

## **2.2 Carga en estrella e inversor.**

Para este caso se considera el circuito trifásico balanceado de la Figura 3.2. A diferencia del circuito anterior no existe una fuente de tensión, se utiliza un modelo que se comporta como una máquina síncrona. Es por eso que el circuito se representa a través de una fuente de corriente.

**Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.**

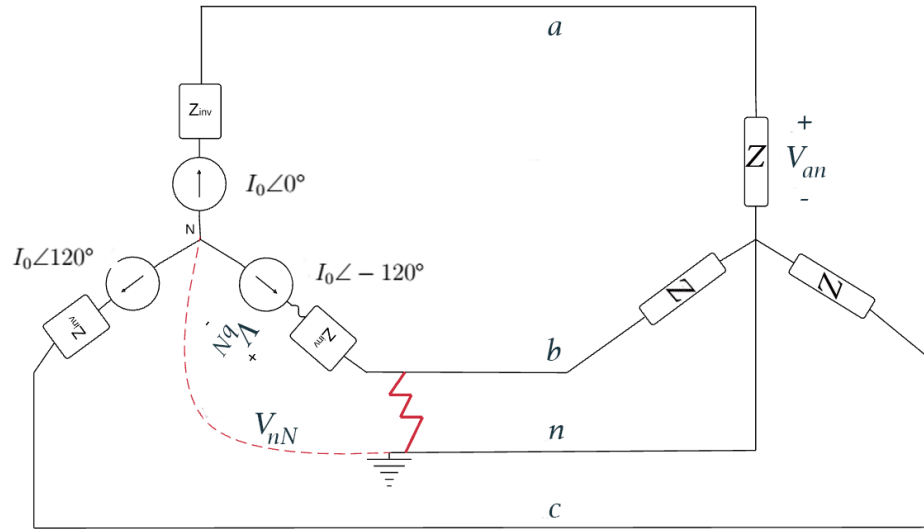


Figura 2.2: Inversor con carga en estrella.

De igual manera se considera una falla en la fase  $b$  a tierra y se asume que ésta se libera por protecciones; al ocurrir esto no existe tensión suministrada por la fase fallada y la caída de tensión en las fases sanas sería:

$$V_{an} \approx I_a Z \quad (2.3)$$

Y de igual manera se considera para  $V_{cn}$ ; por lo tanto, al abrir la fase  $b$  y no existir tensión en  $V_{bn}$  y asumiendo que  $V = |V_{an}|$ , el conjunto de componentes simétricas es el siguiente:

## Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.

---

$$\begin{aligned}V_0 &= \frac{1}{3}[V\angle 0^\circ + V\angle -240^\circ] \\ &= \frac{V}{3}\angle 60^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_1 &= \frac{1}{3}[V\angle 0^\circ + V\angle -240^\circ * 1\angle 240^\circ] \\ &= \frac{2}{3}V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_2 &= \frac{1}{3}[V\angle 0^\circ + V\angle -240^\circ * 1\angle 120^\circ] \\ &= \frac{V}{3}\angle -60^\circ\end{aligned}$$

Se observa que existe una gran diferencia entre las componetes de una máquina eléctrica y las de un inversor. A diferencia del circuito anterior, éste tiene todas las componetes de secuencia cero, positiva y negativa.

La red de secuencia quedaría como se muestra en la Figura 2.3, debido a la falla de fase a tierra [7].



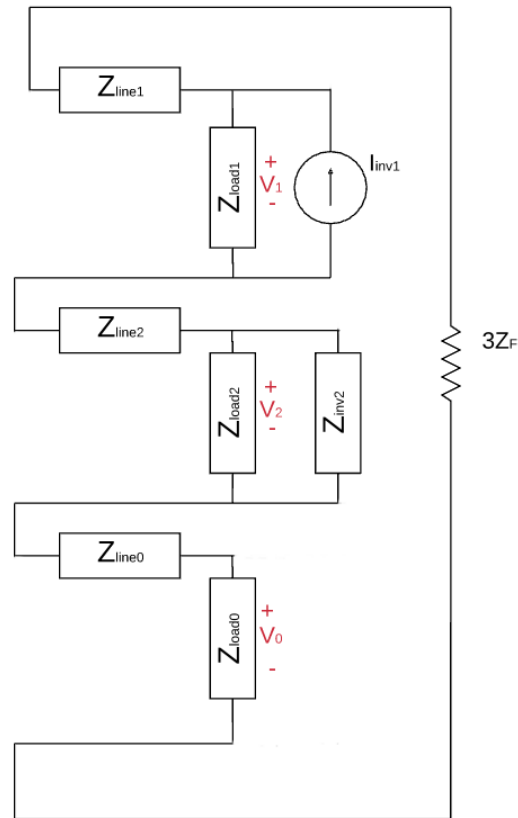


Figura 2.3: Red de secuencia ante fallas de fase a tierra.

De esta manera al ser liberada la falla en la fase  $b$  y no existir flujo de energía por ésta, la corriente en las fases sanas aumentará debido al control del convertidor de electrónica de potencia del aerogenerador; por lo tanto, también la tensión aumentará en estas fases debido al incremento de la corriente que interactúa con las impedancias de secuencia, como se muestra en el Figura 2.3.

### 2.3 Carga en delta e inversor

Partiendo de que cualquier sistema en estrella puede ser remplazado por su equivalente en delta, para el análisis en delta se utiliza el circuito de la Figura 2.2, excepto que se han colocado las impedancias equivalentes delta de la carga. Por lo que la impedancia  $2Z$  se multiplica por 3 debido a que la carga  $Y$  está balanceada, y de esta manera la im-

**Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.**

pedancia de la carga será equivalente al circuito anterior como se muestra en la Figura 2.4.

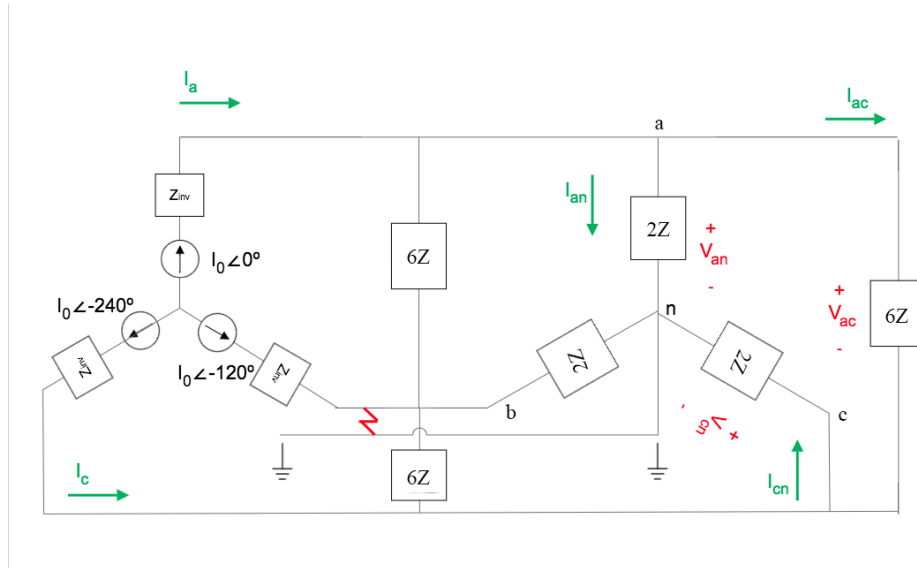


Figura 2.4: Inversor con carga en delta.

Se genera una falla de la fase *b* a tierra y asumiendo que las protecciones eléctricas la liberan, las componentes simétricas que aparecen en el circuito de la Figura 2.4 son las mismas que se obtienen en el análisis de estrella.

De esta manera los valores de las componentes simétricas se muestran en el Cuadro 2.1

Cuadro 2.1: Valores de componentes simétricas.

	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$
Secuencia 0	$\frac{V}{3} \angle 60^\circ$	$\frac{V}{3} \angle 60^\circ$	$\frac{V}{3} \angle 60^\circ$
Secuencia 1	$\frac{2}{3} V$	$\frac{2}{3} V \angle -120^\circ$	$\frac{2}{3} V \angle 120^\circ$
Secuencia 2	$\frac{V}{3} \angle -60^\circ$	$\frac{V}{3} V \angle 60^\circ$	$\frac{V}{3} V \angle 180^\circ$

Del análisis en estrella se definió que  $V=|V_{an}|$ , así el voltaje  $V_{ac}$  estará dado por la suma vectorial de  $V_{an}-V_{cn}$ , utilizando las componentes simétricas la ecuación está dada de la siguiente manera:

## Teoría de sobre voltajes ante fallas de fase a tierra en circuitos interconectados a inversores con cargas en estrella y delta.

---

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_{an} - V_{cn} \\ &= \frac{V}{3}\angle 60^\circ + \frac{2}{3}V + \frac{V}{3}\angle -60^\circ - \frac{V}{3}\angle 60^\circ - \frac{2}{3}V\angle 120^\circ - \frac{V}{3}\angle 180^\circ \\ &= \sqrt{3}V\angle -30^\circ \end{aligned}$$

Se puede observar que el voltaje  $V$  es dependiente de  $V_{an}$ , cuyo valor es alimentado por la corriente de falla  $I_a$ , entonces el voltaje  $V_{an}$  aumenta de acuerdo con la falla en proporción  $V_{an} \approx I_a \times Z$ . Como conclusión, se tiene que el voltaje en delta  $V_{ac}$  también sufre este incremento debido a la falla pero con una proporción de  $\sqrt{3}$ .

Partiendo de esta teoría, se modeló el sistema eléctrico El Coco en el software DIG-SILENT PowerFactory sin incluir los transformadores de instrumentación, medición y zig-zag. Esto con la finalidad de verificar el comportamiento del sistema ante fallas de fase a tierra sin estos elementos.

# Capítulo 3

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

El modelado se realizó en el software DlgSILENT PowerFactory. En la Figura 3.1 se muestra el sistema modelado, con línea roja se resalta aquellos elementos que no fueron incluidos en la simulación por ser de instrumentación.

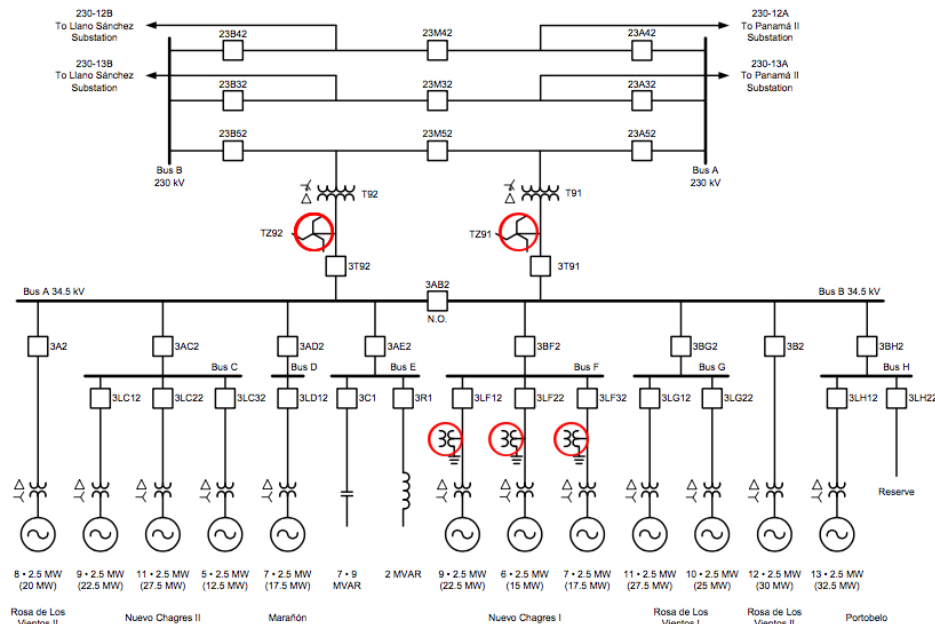


Figura 3.1: Sistema modelado.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

Para este modelado se crearon elementos base de acuerdo a los parámetros de los diferentes elementos como transformadores y líneas de transmisión. Estos fueron utilizados de acuerdo a los diagramas unifilares del sistema El Coco.

En los aerogeneradores se utilizó el modelo FullyRatedConv Control, el cual ya está definido en el programa; sin embargo, es importante considerar sus parámetros adecuados, como lo son la potencia aparente, el factor de potencia y la tensión nominal. En la Figura 3.2 se muestran parámetros de los aerogeneradores.

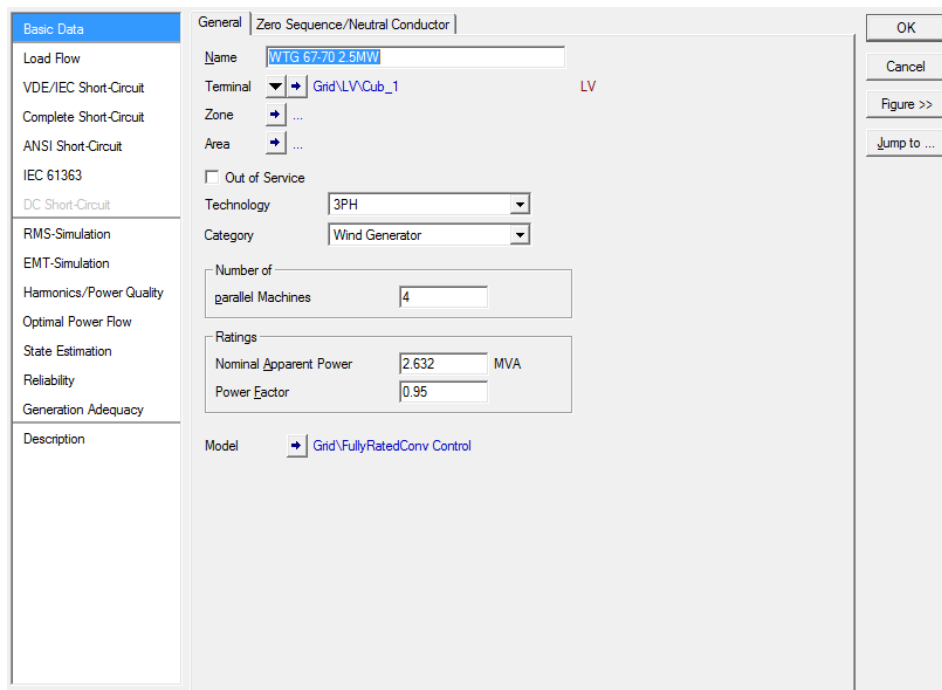


Figura 3.2: Ajustes aerogenerador en DIgSILENT PowerFactory.

En este proyecto se definieron dos tipos de transformadores T9X y TDG. Los parámetros para los transformadores T9X se ajustaron para los elevadores T91 y T92, como se muestra en la Figura 3.3. Los parámetros de los transformadores TDG se ajustaron para los elevadores de tensión en los aerogeneradores, como se muestra en la Figura 3.4.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

The screenshot shows a configuration window for a transformer. The 'Name' field is 'T9X'. The 'Technology' is 'Three Phase Transformer'. The 'Rated Power' is '140.' MVA and the 'Nominal Frequency' is '60.' Hz. The 'Rated Voltage' section shows 'HV-Side' as '230.' kV and 'LV-Side' as '34.5' kV. The 'Vector Group' section shows 'HV-Side' as 'YN' and 'LV-Side' as 'D'. The 'Phase Shift' is '11.' \*30deg. The 'Name' of the vector group is 'YNd11'. The 'Positive Sequence Impedance' section shows 'Reactance x1' as '0.1095' p.u. and 'Resistance r1' as '0.' p.u. The 'Zero Sequence Impedance' section shows 'Short-Circuit Voltage uk0' as '3.' % and 'SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r' as '0.' %.

Figura 3.3: Parámetros de transformadores T9X.

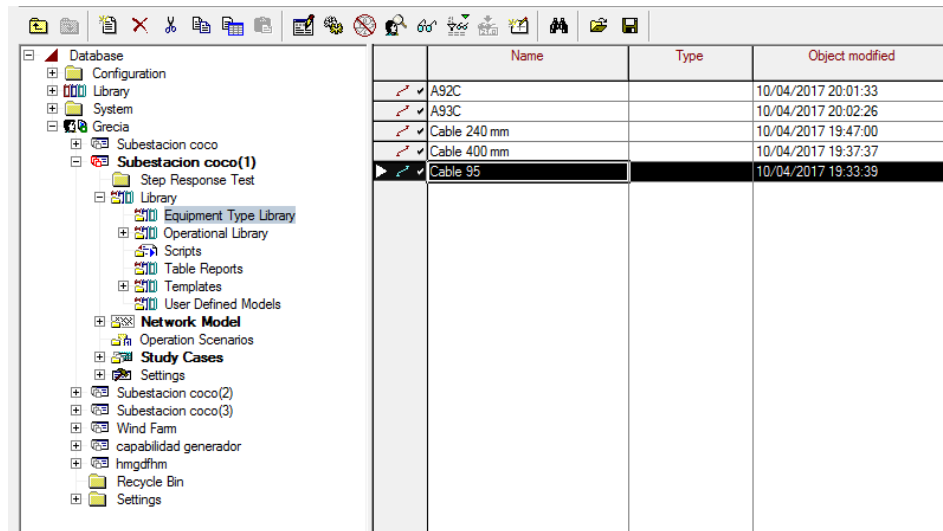
The screenshot shows a configuration window for a transformer. The 'Name' field is 'T9f 0.4kV - 20kV'. The 'Technology' is 'Three Phase Transformer'. The 'Rated Power' is '2.75' MVA and the 'Nominal Frequency' is '60.' Hz. The 'Rated Voltage' section shows 'HV-Side' as '34.' kV and 'LV-Side' as '0.69' kV. The 'Vector Group' section shows 'HV-Side' as 'D' and 'LV-Side' as 'YN'. The 'Phase Shift' is '5.' \*30deg. The 'Name' of the vector group is 'Dyn5'. The 'Positive Sequence Impedance' section shows 'Short-Circuit Voltage uk' as '6.' % and 'Copper Losses' as '2.799611' kW. The 'Zero Sequence Impedance' section shows 'Short-Circuit Voltage uk0' as '3.' % and 'SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r' as '0.' %.

Figura 3.4: Parámetros de transformadores TDG.

Para las líneas aéreas que contiene la subestación; se definieron 5 modelos, mostrados en la Figura 3.5. Éstas se utilizaron de acuerdo a los esquemas y distancias reales

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

del parque eólico el Coco.



Name	Type	Object modified
A92C		10/04/2017 20:01:33
A93C		10/04/2017 20:02:26
Cable 240 mm		10/04/2017 19:47:00
Cable 400 mm		10/04/2017 19:37:37
Cable 95		10/04/2017 19:33:39

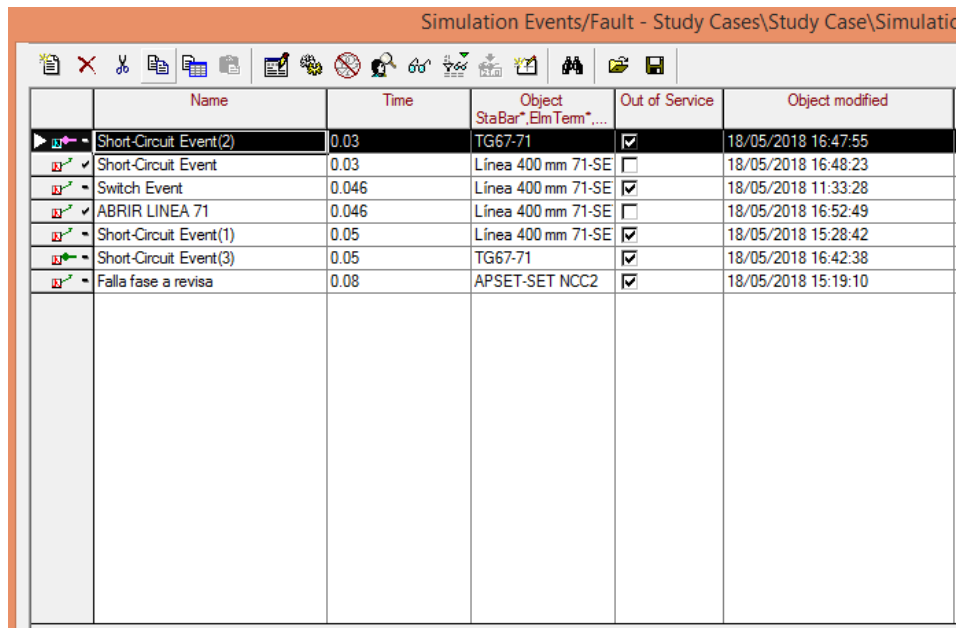
Figura 3.5: Líneas creadas en el modelo.

Una vez modelado el sistema se debe ejecutar la función de flujos de potencia para asegurar la correcta conexión de todos los elementos. Esto se realiza con la herramienta Calculate Load Flow.

Posteriormente para ejecutar las simulaciones se realizan las siguientes tareas:

1. Calcular condiciones iniciales, es importante considerar el método de simulación adecuado, así como el tamaño de los pasos de integración.
2. Definir los eventos a simular. Para el modelo se definieron fallas de fase a tierra en diferentes elementos del parque eólico, como se muestra en la Figura 3.6. Estas fallas fueron ajustadas de acuerdo a los eventos que se presentaron en el parque eólico [2].

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.



The screenshot shows a software window titled "Simulation Events/Fault - Study Cases\Study Case\Simulatio". Below the title bar is a toolbar with various icons. The main area contains a table with the following data:

	Name	Time	Object StaBar".ElmTem"....	Out of Service	Object modified
▶	Short-Circuit Event(2)	0.03	TG67-71	<input checked="" type="checkbox"/>	18/05/2018 16:47:55
▶	Short-Circuit Event	0.03	Línea 400 mm 71-SE	<input type="checkbox"/>	18/05/2018 16:48:23
▶	Switch Event	0.046	Línea 400 mm 71-SE	<input checked="" type="checkbox"/>	18/05/2018 11:33:28
▶	ABRIR LINEA 71	0.046	Línea 400 mm 71-SE	<input type="checkbox"/>	18/05/2018 16:52:49
▶	Short-Circuit Event(1)	0.05	Línea 400 mm 71-SE	<input checked="" type="checkbox"/>	18/05/2018 15:28:42
▶	Short-Circuit Event(3)	0.05	TG67-71	<input checked="" type="checkbox"/>	18/05/2018 16:42:38
▶	Falla fase a revisa	0.08	APSET-SET NCC2	<input checked="" type="checkbox"/>	18/05/2018 15:19:10

Figura 3.6: Eventos simulados de fallas de fase a tierra.

### 3.1 Simulaciones

De acuerdo a los registros que se tienen registrados en la subestación el Coco, se simula un evento de una falla de fase  $a$  a tierra en la línea del circuito colector Nuevo Chagres II a la mitad de la distancia total de la línea. El circuito colector llega a la conexión del interruptor 3LC12 en la barra C. El evento de falla se genera a los 0.03 s, como se indica en la Figura 3.7.



## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

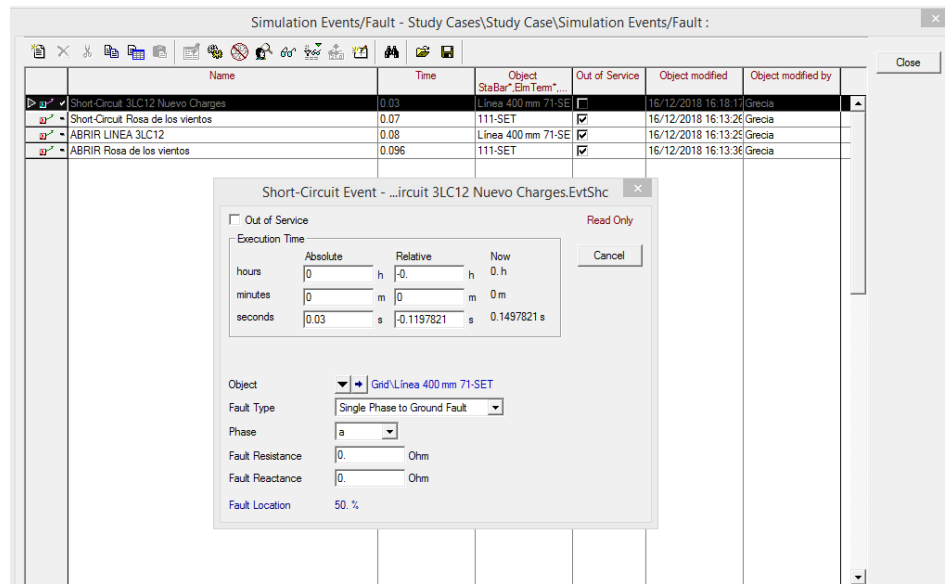


Figura 3.7: Evento cortocircuito fase *a*.

En la Figura 3.8 se muestra la evolución de los voltajes al presentarse el evento de falla. Se pueden observar las sobre tensiones que se originan en dos de las fases, éstas alcanzan los valores de 50.946 kV pico a pico, es decir, 62.39 kV de fase a fase en valores RMS.

### Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

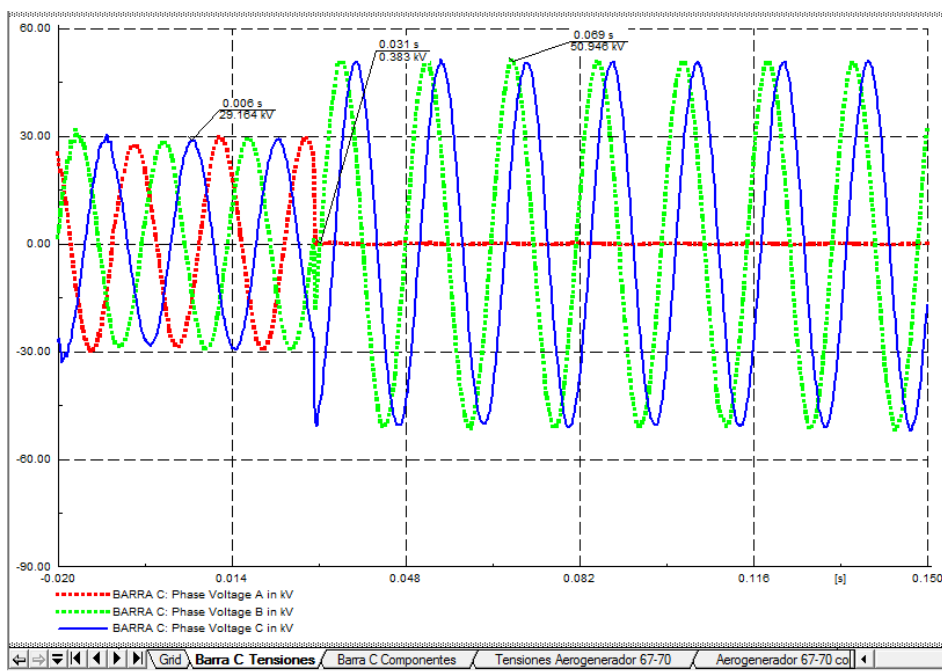


Figura 3.8: Tensiones pico a pico ante falla de fase *a* a tierra.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

Estos valores son 5 % superiores a  $\sqrt{3}$  del valor nominal del sistema de 34.5 kV, como se muestra en la Figura 3.8. Sin embargo, las componentes simétricas de tensión no se comportaron del todo como en el sistema de un inversor y una carga delta, como se presentó en el Capítulo 2.

Las componentes simétricas de tensión que aparecieron fueron secuencia positiva y secuencia cero con una magnitud de 21.5 kV en ambas, como se muestra en la Figura 3.9.

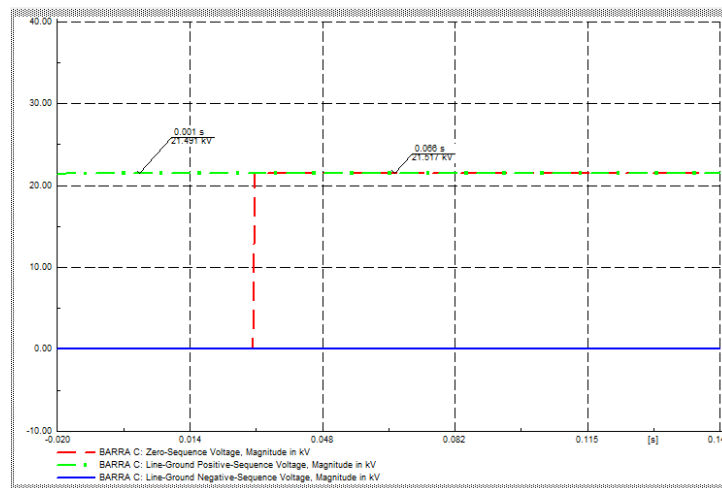


Figura 3.9: Componentes simétricas de voltaje en barra C ante una falla de la fase A a tierra.

Debido a esto se desarrolló un modelo equivalente al circuito de la Figura 2.4. Simulando un aerogenerador como fuente de corriente y sus cargas en delta y estrella en paralelo. Como se muestra en la Figura 3.10.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

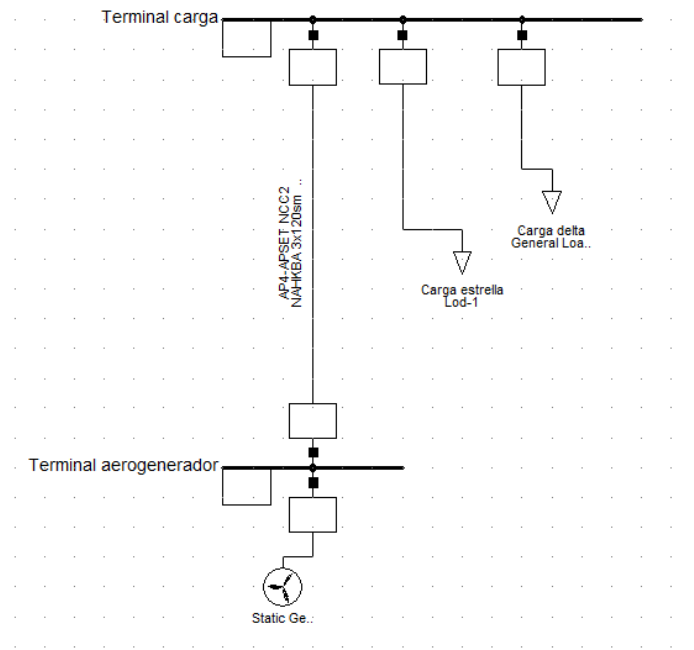


Figura 3.10: Modelo de Aerogenerador Carga con estrella y delta.

En este modelo, se genera una falla de fase a tierra en la barra donde están conectadas las cargas, para determinar el comportamiento de las secuencias de tensión en este punto, con el fin de validar si el comportamiento de éstas concuerda con las componentes simétricas de tensión obtenidas en el análisis de fallas de fase a tierra con un inversor y cargas delta en paralelo con una estrella de la Sección 2.3.

Al realizar la falla de fase a tierra en el modelo de la Figura 3.10 se valida que las componentes de secuencia de tensiones empatan con lo propuesto en la Sección 2.3. Donde se esperan los siguientes valores:  $V_0 = \frac{V}{3} \angle 60^\circ$ ,  $V_1 = \frac{2}{3}V \angle 60^\circ$  y  $V_2 = \frac{V}{3} \angle -60^\circ$ . Como se muestra en la Figura 3.11.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

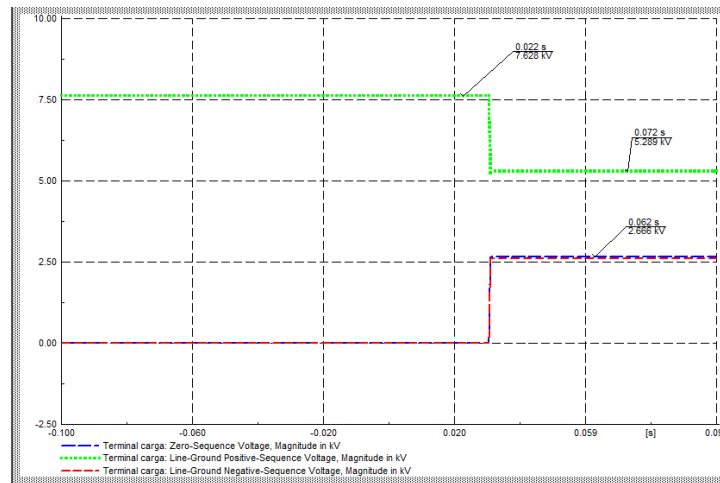


Figura 3.11: Componentes simétricas de voltaje en modelo aerogenerador y carga delta y estrella en paralelo.

Esto apunta a que la diferencia del comportamiento de las componentes simétricas en el modelo de parque eólico el Coco es debido a la inclusión de transformadores. Para validar esto, se agrega a nuestro modelo de la Figura 3.10 un transformador estrella/delta después de la barra del aerogenerador, como se muestra en la Figura 3.12, y nuevamente se genera una falla de fase a tierra en la barra de carga en delta.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

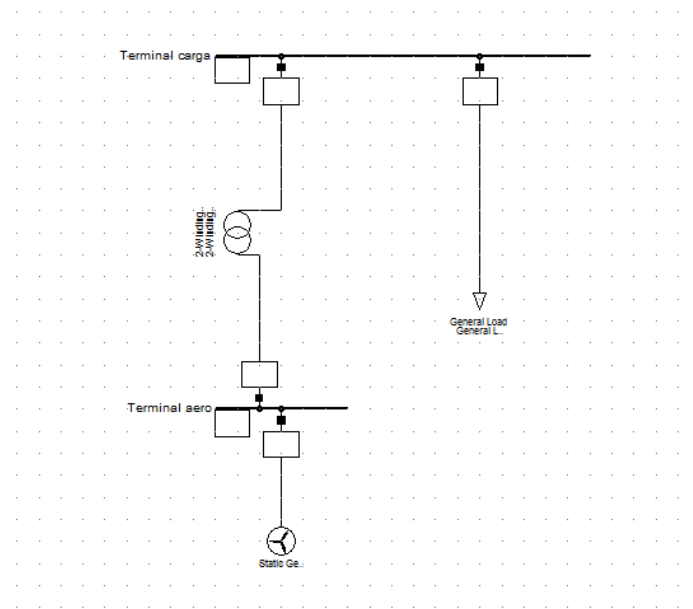


Figura 3.12: Modelo de aerogenerador-transformador-carga.

Al realizar la falla en este modelo, se nota que; las sobretensiones en las fases no falladas siguen apareciendo y que las componentes simétricas de tensiones empatan con las componentes simétricas de tensiones del modelo del parque eólico el Coco, donde se caracterizan por la aparición de componentes de secuencia 1 y 0.

Por lo tanto, se realiza el análisis para la falla monofásica a tierra considerando un transformador delta/estrella.

Así, para una falla monofásica en la fase  $a$  a tierra, la corriente  $I_{fa}$  que fluirá a través de la impedancia  $Z_f$  está dada por los segmentos que se muestran en la Figura 3.13, donde el nodo  $k$  se define como el nodo fallado.

### Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

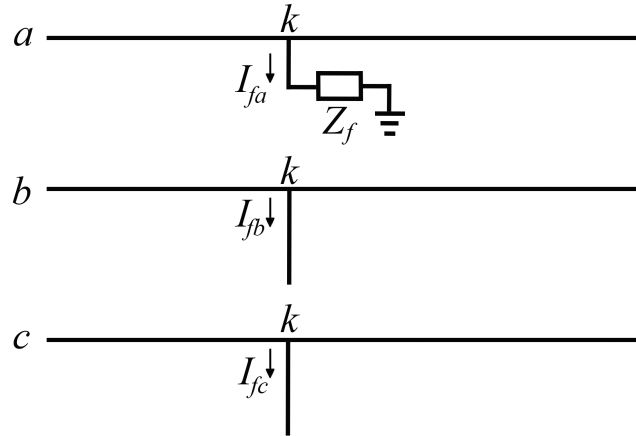


Figura 3.13: Corriente de falla en el nodo k.

Donde podemos definir que:

$$I_{fb} = 0 : I_{fc} = 0 : V_{ka} = Z_f I_{fa} \quad (3.1)$$

Así que las componentes simétricas de corriente están dadas por:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Al resolver esta matriz obtenemos que

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3} \quad (3.2)$$

Por lo tanto; ante una falla monofásica las corrientes de secuencia 0, 1 y 2 son de la misma magnitud e igual a  $\frac{I_{fa}}{3}$ . Sin embargo, la red de secuencia para la falla considerando el transformador no es igual al mostado en la Figura 2.3, el cual se utiliza para fallas monofásicas. Para este caso, la red de secuencia equivalente considerando el transformador queda como se muestra la Figura 3.14, debido a esto  $I_{fa} = 0$

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

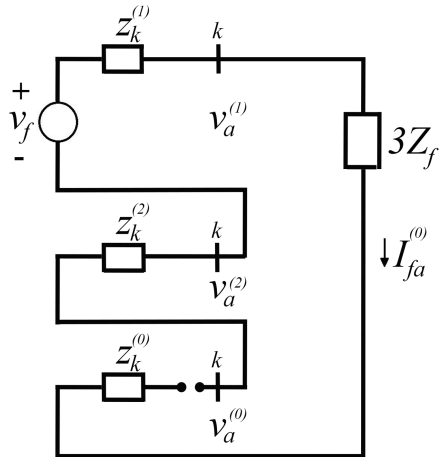


Figura 3.14: Equivalente de red de secuencias ante fallas de fase a tierra considerando transformador delta/estrella.

Debido a esto, para realizar el análisis consideraremos a  $Z_k^{(0)} = \infty$  para remplazar el circuito abierto de la Figura 3.14. Analizando el lazo cerrado se tienen las siguientes ecuaciones:

$$Z_k^{(0)} = \infty \quad (3.3)$$

$$I_f^{(0)} = I_f^{(1)} = I_f^{(2)} = 0 \quad (3.4)$$

De la red de secuencia con lazo cerrado se tiene

$$-V_a^{(0)} - V_a^{(1)} - V_a^{(2)} + 3Z_f I_f^{(0)} = 0 \quad (3.5)$$

Ante fallas monofásicas a tierra [7], considerando la ecuaciones (3.3) y (3.4) se tienen las siguientes igualdades.



## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

$$V_{ka}^{(0)} = -Z_k^{(0)} I_{fa}^{(0)} = -\infty * 0 = \text{Indeterminado}$$

$$V_{ka}^{(1)} = V_f - Z_k^{(1)} I_{fa}^{(0)} = V_f$$

$$V_{ka}^{(2)} = -Z_k^{(2)} I_{fa}^{(0)} = 0$$

La igualdad de  $V_{ka}^{(0)}$  es indeterminada debido a la multiplicación de un valor  $\infty$  por 0. Sin embargo, aplicando la ley de Kirchoff en la red de secuencia de la Figura 3.14 se obtiene que  $-V_{ka}^{(0)} = V_{ka}^{(1)}$ , es decir, que la magnitud de  $V_a^{(0)}$  y  $V_a^{(1)}$  deben ser iguales y sus fases estar a  $180^\circ$ .

Esto confirma que las componentes simétricas obtenidas en el modelo del parque eólico el Coco son correctas, debido a que ante una falla de fase a tierra considerando transformadores estrella/delta las componentes de secuencia de tensión que aparecen son  $V^{(0)}$  y  $V^{(1)}$  con la misma magnitud entre ellas. Adicionalmente se han graficado las fases de estas componentes, obteniendo que; las fases efectivamente están a  $180^\circ$  ante la falla de fase a tierra como se muestra en la Figura 3.15.

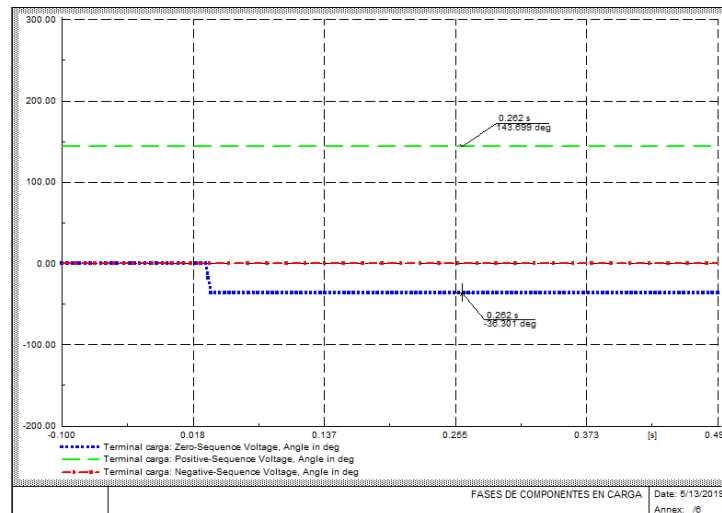


Figura 3.15: Fases de componentes de secuencia 0 y 1 de tensión.

Así, validando que  $-V^{(0)} = V^{(1)}$ , podemos definir el valor de las tensiones que

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

tendremos en las fases del sistema en el Coco ante fallas de fase a tierra de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -V_f \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a^2 - 1 \\ a - 1 \end{bmatrix} V_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \angle 150^\circ \\ 1 \angle -150^\circ \end{bmatrix} \sqrt{3} V_f$$

Debido a esto, ante fallas de fase a tierra, las sobretensiones en las fases no falladas deberán crecer  $\sqrt{3}$  el valor de prefalla con un desfase de  $60^\circ$  entre sus fases no falladas. Estos valores son muy aproximados a los obtenidos en las simulaciones. Sin embargo, en nuestras simulaciones y en los registros que se tienen del parque eólico el Coco, en este tipo de fallas las sobretensiones crecen entre 5 % y 8 % por arriba del valor de  $\sqrt{3}$ . Este porcentaje adicional está asociado a la electrónica de potencia y control de los aerogeneradores como se revisó en el capítulo anterior, donde el aerogenerador es una fuente de corriente y no de tensión.

En la Figura 3.16 se puede constatar cómo ante la falla de fase a tierra, el aerogenerador sigue suministrando la misma cantidad de corriente en todas sus fases validando la teoría del comportamiento del inversor revisado en el capítulo anterior.

## Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.

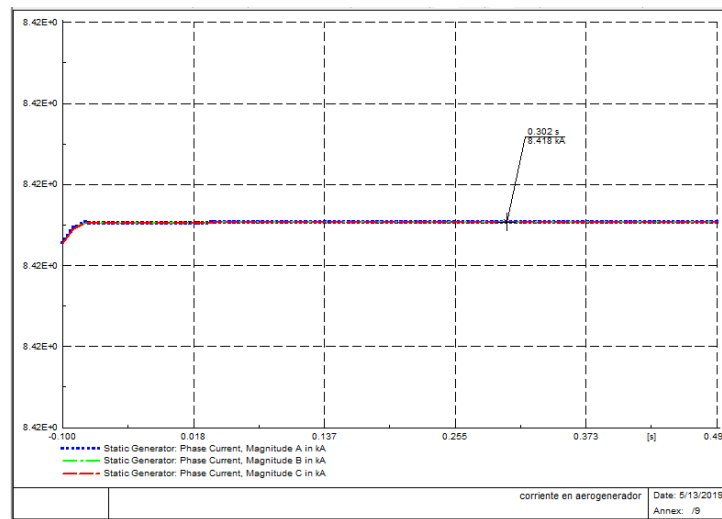


Figura 3.16: Corriente en el aerogenerador ante una falla de fase  $a$  tierra en la barra de carga.

De esta manera, se hace constar que; las sobretensiones existen en el modelado ante fallas de fase a tierra. Donde se nota que el aumento de tensión  $\sqrt{3}$  en el valor nominal es debido a la topología del sistema y su comportamiento ante fallas de fase a tierra y el porcentaje de tensión superior a  $\sqrt{3}$  es debido al control del aerogenerador, no a la aparición de armónicas o resonancia magnética entre el sistema de potencia y los transformadores de medición o instrumentación, como se suponía por el usuario final.

---

---

## Conclusiones.

---

En este trabajo se ha presentado un análisis y modelado, los cuales muestran que el problema de sobretensiones en circuitos eléctricos con aerogeneradores como fuentes de energía está asociado al comportamiento del sistema de potencia y que el porcentaje de sobretensión superior a  $\sqrt{3}$  está asociado al control y electrónica de potencia de los aerogeneradores y no a problemas de armónicas, resonancia magnética como se había estado suponiendo anteriormente por el usuario final.

Asimismo, aún está en discusión si aterrizar correctamente los circuitos en sistemas con aerogeneradores realmente mitiga o no las sobretensiones. Por lo que existe un gran campo de investigación en el comportamiento de los inversores tanto en su conexión como en el desarrollo de un control más robusto que considere eventos externos a su sistema.

Durante el trabajo se detectó que el compartamiento de componentes de secuencia varía dependiendo del tipo de sistema que se esté analizando. Siendo fundamental el análisis de las componetes de secuencia durante fallas de fase a tierra, por lo que se propone monitorear el comportamiento de éstas y si es necesario modificar el esquema de protección en la subestación el Coco agregando elementos de sobretensiones con

## **Modelo de fallas de fase a tierra en parque eólico El Coco.**

---

disparos rápidos ante presencia de componetes de secuencia y evitar el problema que existe en los apartarrayos ante fallas de fase a tierra.

---

---

## Bibliografía

---

- [1] Creus, Solé, Antonio. *Aerogeneradores*, Cano Pina, 2012. ProQuest Ebook Central
- [2] Eliseo Alcázar, Jorge Juárez, Pedro Loza, and Héctor J. Altuve *Protection System for a Wind Generation Plant in Panama: Challenges and Solutions*, 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, Texas April 7th, 2016
- [3] J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin. *Protective Relaying: Principles and Applications*, 4<sup>a</sup> ed., CRC Press, 2015.
- [4] E. H. Camm, M. R. Behnke, O. Bolado, M. Bollen, M. Bradt, C. Brooks, W. Dilling, M. Edds, W. J. Hejduk, D. Houseman, S. Klein, F. Li, J. Li, P. Maibach, T. Nicolai, J. Patino, S. V. Pasupulati, N. Samaan, S. Sailors, T. Siebert, T. Smith, M. Starke, and R. Walling *Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants*, proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, July 2009.
- [5] R. A. Walling, E. Gursoy, and B. English *Current Contributions from Type 3 and Type 4 Wind Turbine Generators During Faults*, proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, San Diego, CA, July 2011.
- [6] R. A. Walling, E. Gursoy, and B. English *Ground Fault Overvoltage With Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 32, NO. 2, APRIL 2017.
- [7] J. J. Grainger, W. D. Stevenson *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1<sup>a</sup> ed., McGraw Hill 1996.

- [8] LADIDE Saad,HIHI Hicham and FAITAH Khalid *Optimal tracking, modeling and control of aerogenerator based on PMSG driven by wind turbine*, 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Nov 2016.