



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE HUECOS DE  
TENSIÓN EN PARQUES EÓLICOS

Alumno: IKER SEGURA NAGORE

Tutor: JESÚS LÓPEZ TABERNA

Pamplona, abril 2013



## Resumen

Debido a la creciente importancia de la generación de energía eólica hay ciertos problemas que es conveniente resolver para que la eficiencia de esta generación de energía sea la mejor posible. Uno de esos problemas es la aparición de huecos eléctricos en la red y su influencia en el parque eólico, especialmente en los aerogeneradores. En los últimos años diversos estudios han tratado de corregir e impedir los fallos que estos huecos producen en la producción de energía eólica y para ello han sido necesarios varios estudios sobre el origen y la magnitud de esos huecos. En realidad esos fallos en su mayoría han sido desconexiones de la red por parte del parque eólico y su consiguiente desaprovechamiento de energía.

Este proyecto trata de la propagación de esos huecos dentro de un parque eólico y la influencia que tendrán las impedancias que puede haber en ese parque en la caracterización de esos huecos. Para ello diversos cálculos teóricos han sido de utilidad, así como simulaciones mediante el programa PSIM.

Para la obtención de ciertos parámetros como por ejemplo los transformadores, se ha contactado con la corporación ABB, corporación que distribuye a empresas como Gamesa además de muchas otras.

Así pues, en concreto este proyecto trata sobre la influencia de los elementos de un parque eólico en la propagación de los huecos de tensión hasta su llegada al aerogenerador.





# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Introducción</b>	<b>7</b>
Objetivos . . . . .	7
Motivación . . . . .	7
<b>1. Energía Eólica y Tecnología</b>	<b>9</b>
1.1. Introducción . . . . .	9
1.2. Energía eólica en el mundo . . . . .	9
1.3. Calidad de la Energía . . . . .	10
1.4. Tecnología Generadores . . . . .	11
1.4.1. Velocidad fija . . . . .	13
1.4.2. Velocidad variable . . . . .	13
<b>2. Huecos de tensión</b>	<b>17</b>
2.1. Introducción . . . . .	17
2.2. Definición . . . . .	17
2.3. Causas que originan los huecos de tensión . . . . .	19
2.4. Requerimientos a la eólica . . . . .	19
2.5. Componentes simétricas . . . . .	20
2.6. Obtención de los tipos de huecos de tensión según el tipo de falta . . . . .	22
2.6.1. Falta trifásica y falta trifásica a tierra . . . . .	23
2.6.2. Falta fase-tierra . . . . .	25
2.6.3. Falta fase-fase . . . . .	27
2.6.4. Falta fase-fase-tierra . . . . .	29



<b>3. Propagación de los huecos a través de transformadores</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción . . . . .	33
3.2. Obtención de tipos de huecos de tensión según la conexión de los transformadores . . . . .	33
3.2.1. Tipos de transformadores . . . . .	34
3.2.2. Propagación del hueco a través de un transformador . . . . .	38
3.2.3. Propagación del hueco a través de dos transformadores . . . . .	42
3.2.4. Resumen . . . . .	44
3.3. Impedancias del transformador . . . . .	45
3.3.1. Inductancia de magnetización . . . . .	46
3.3.2. Resistencias de los devanados e inductancias de fugas . . . . .	50
3.4. Clasificación de los huecos de tensión . . . . .	51
<b>4. Propagación de los huecos de tensión a través de las impedancias de las líneas</b>	<b>57</b>
4.1. Introducción . . . . .	57
4.2. Influencia en la tensión residual del hueco . . . . .	57
4.2.1. Aparición de transitorios . . . . .	59
4.3. Influencia de las impedancias de línea durante la propagación . . . . .	60
<b>5. Simulación en un parque eólico</b>	<b>61</b>
5.1. Introducción . . . . .	61
5.2. Estructura de un parque eólico . . . . .	61
5.3. Caso de aplicación . . . . .	62
5.4. Aplicación a un aerogenerador . . . . .	63
5.4.1. Huecos originados en la línea de transporte - Zona I . . . . .	64
5.4.2. Huecos originados en la línea de distribución - Zona II . . . . .	66
5.4.3. Huecos originados en la propia torre - Zona III . . . . .	66
5.5. Influencia de los desfases de las componentes . . . . .	67
5.6. Aplicación a un parque eólico . . . . .	68
5.7. Resultados . . . . .	74
<b>6. Conclusiones</b>	<b>75</b>

Estudio de la propagación de huecos de tensión en parques eólicos	5
<b>A. Anexo 1: Características del aerogenerador y de los transformadores</b>	<b>77</b>
A.1. Características del aerogenerador . . . . .	77
A.2. Características de los transformadores . . . . .	78
A.2.1. Transformador de la torre de 20/0.69 kV . . . . .	78
A.2.2. Transformador de 132/20 kV . . . . .	78
<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>







# Introducción

## Objetivos

El objetivo de este proyecto no es otro que ver la propagación de huecos de tensión en un parque eólico con tal de ver el modo en que estos afectan a los aerogeneradores y a la generación de potencia. Para ello se tratará de ver la influencia de los diferentes elementos de la red (líneas y transformadores) en el hueco para obtener la forma que este tendrá cuando llegue al aerogenerador.

## Motivación

Debido a la importancia de la generación de la energía eléctrica derivada de la energía eólica en la actualidad y la proyección de futuro, es importante que la transmisión de esa energía sea lo mejor posible de manera que su producción sea viable. Para ello no sólo hay que tratar de mejorar la transformación de esa energía sino también la manera en la que esta se transporta al punto de consumo. Los huecos de tensión son parte del problema de que ese transporte no sea óptimo y por ello su estudio es realmente importante.





# Capítulo 1

## Energía Eólica y Tecnología

### 1.1. Introducción

En este capítulo se dará una pequeña explicación de la importancia de la energía eólica en la actualidad y como su integración en la red eléctrica debe ser lo mejor posible para evitar daños tanto en la propia red como en los sistema de generación. Además se hará un pequeño resumen sobre los tipos de aerogeneradores utilizados y sus conexiones a la red.

### 1.2. Energía eólica en el mundo

Se podría decir que hoy en día la energía eólica es una parte importante del consumo de energía mundial. Esto no significa que la mayor parte de la energía eléctrica consumida sea proveniente de la energía del viento, sino más bien que poco a poco este tipo de energía se está haciendo un hueco entre los todavía predominantes combustibles fósiles llegando a abarcar un importante porcentaje de la demanda.

En el año 2001 la potencia eólica instalada era de 24.32 GW y 10 años después es de 237 GW, prácticamente 10 veces mayor [1]. Esa potencia es capaz de cubrir alrededor del 3 % de la demanda eléctrica mundial. Por ejemplo, en España, el 16 % de la energía eléctrica consumida era de procedencia eólica, siendo más de la mitad de la consumida proveniente de energías renovables (32,4 %).

Por supuesto, la obtención de este tipo de energía tienes sus ventajas e inconvenientes. La mayor ventaja es que se está utilizando el viento como “combustible” para crear la electricidad y este es un bien inagotable. Además, la emisión de CO<sub>2</sub> es totalmente nula y de ahí que la contaminación de la capa de ozono también lo sea. La mayor desventaja podría ser el impacto ambiental y visual de colocar los aerogeneradores en los lugares donde la velocidad y la dirección del viento son propicios para conseguir este tipo de energía ya que esos lugares suelen ser montes y actualmente también, mares. En



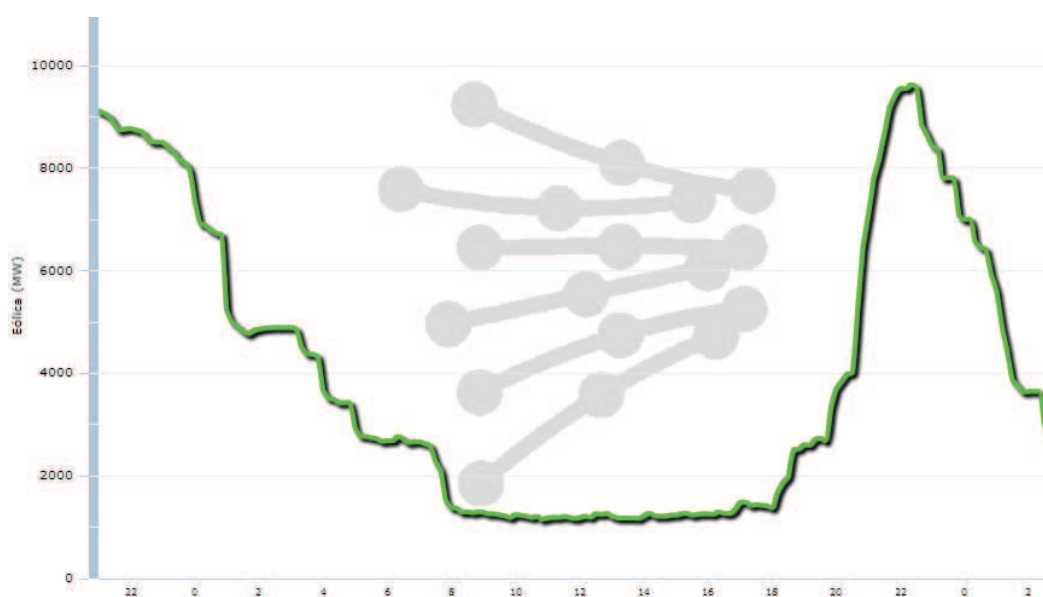


Figura 1.1: Producción eólico de España el 31 de marzo de 2013

los últimos años ha habido un gran incremento de la potencia eólica instalada “offshore” (término utilizado para denominar a la potencia instalada en el mar).

Otra desventaja es la dependencia del viento para poder obtener energía. Esto, más que una desventaja sería una limitación ya que a pesar de los avances en la exactitud de las previsiones meteorológicas el cálculo de vientos no es perfecto. Esto conlleva un problema y es que no se puede cubrir siempre la misma proporción de la demanda eléctrica con este tipo de energía. En la figura 1.1 se puede ver un ejemplo del día 31 de marzo de 2013. Ese día a las 20:00 horas se registró una demanda eléctrica de 22302 MW y en ese mismo instante la generación de potencia eólica era de 1381 MW, un 6.2 % de la potencia total demandada.

Pero a pesar de ello, dado que los combustibles fósiles algún día se agotarán o su extracción será económicamente inviable, es necesario progresar en el conocimiento de tecnologías que puedan perdurar y una de ellas es la concerniente a la energía eólica. Por ello países con recursos económicos suficientes como parte de Europa, Asia y América han invertido en el estudio de esta tecnología durante los últimos años. En la tabla 1.1 se puede observar la capacidad añadida en 2011 por los 10 países con mayor capacidad eólica del mundo [2].

### 1.3. Calidad de la Energía

La calidad de la energía no es un concepto sencillo de definir. En [3] las calidades de la corriente y la tensión se relacionan con la variación de estas respecto de su forma ideal por lo que la calidad de la energía sería un término que englobaría a ambas.

Posición 2011	País	Final 2011	Instalada 2011	Crecimiento 2011
		[MW]	[MW]	[ %]
1	China	62364	17600	39,4
2	USA	46919	6810	16,8
3	Alemania	29075	2007	6,8
4	España	21673	1050	4,8
5	India	15880	2827	21,5
6	Italia	6737	950	16,2
7	Francia	6640	980	17,3
8	Reino Unido	6018	730	15,6
9	Canadá	5265	1267	31,4
10	Portugal	4083	375	10,3
Total	Mundo	237022,6	40084,2	20,3

Cuadro 1.1: Potencia eólica instalada en 2011

Pero lo que realmente es importante a la hora de hablar de la calidad de la energía es la interacción entre proveedor y consumidor. Por este motivo es necesario estudiar las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico para que entre ambos sean capaces de solucionarlo de manera que el suministro y la recepción de la energía eléctrica sean óptimos. Al fin y al cabo un buen funcionamiento de la red eléctrica proporciona un buen funcionamiento de los equipos alimentados por dicha red y viceversa.

Existen diferentes tipos de perturbaciones diferenciadas en dos grupos, las interrupciones (pérdida absoluta de la tensión durante cierto tiempo) y las perturbaciones momentáneas (hueco de tensión, swell, sobretensión, etc.). Este proyecto tratará sobre los huecos de tensión, perturbaciones no tan severas como las interrupciones pero mucho más frecuentes, lo que a la larga puede resultar más dañino que las interrupciones.

## 1.4. Tecnología Generadores

Según Ackermann [4] la configuración de los aerogeneradores se puede dividir en 4 grupos dependiendo del control de la velocidad y el control de la potencia. Un esquema de esos grupos se puede ver en la figura 1.2.

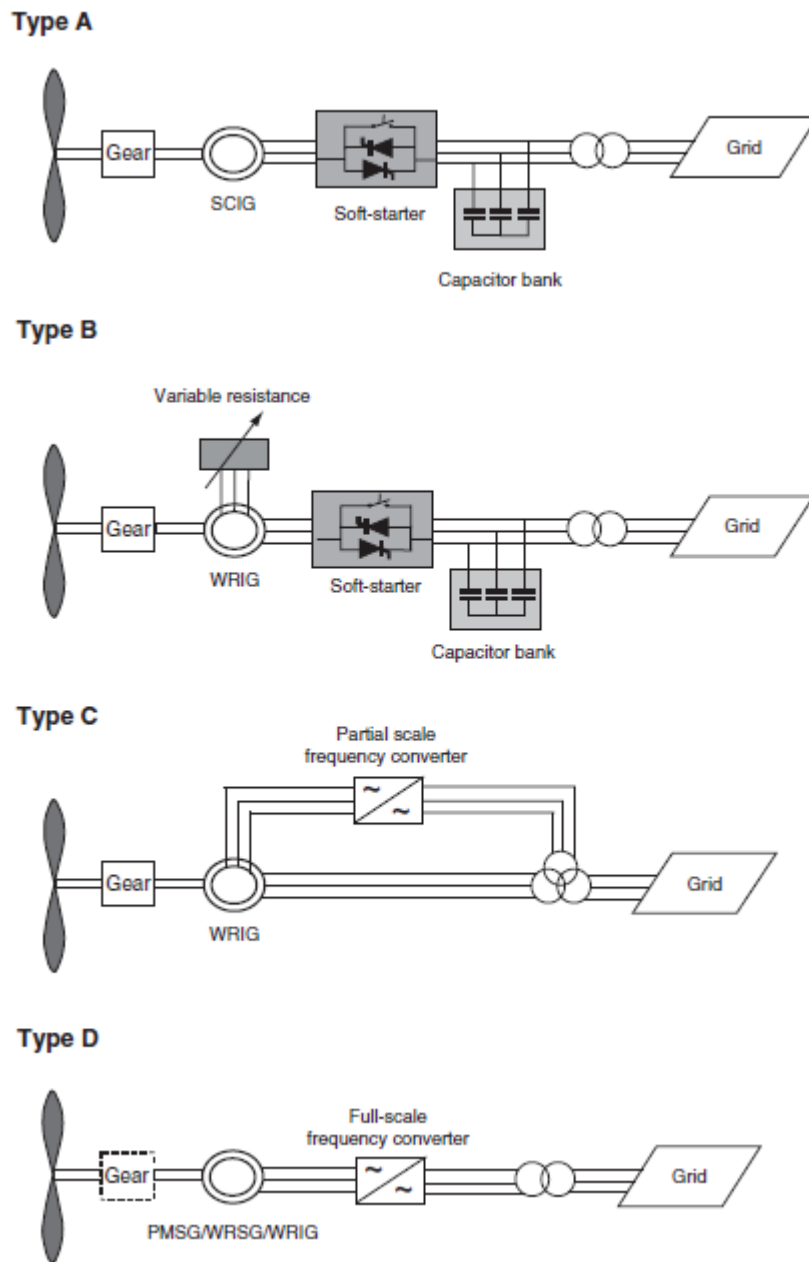


Figura 1.2: Configuraciones típicas de aerogeneradores y conexiones a red: Tipo A, turbina eólica a velocidad fija; Tipo B, turbina eólica a velocidad variable con resistencia rotórica variable; Tipo C, turbina eólica a velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial; Tipo D, turbina eólica a velocidad variable con convertidor de frecuencia a escala completa

### 1.4.1. Velocidad fija

#### Tipo A: Velocidad fija (una o dos velocidades)

La configuración consiste en un generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG) conectado a la red a través de un transformador <sup>1</sup>. Adicionalmente se utiliza un banco de condensadores para compensar la potencia reactiva porque los SCIG siempre cogen potencia reactiva de la red eléctrica. Además se utiliza un dispositivo para suavizar la conexión a la red en el arranque del aerogenerador.

Su diseño está preparado para obtener la máxima eficiencia a una velocidad del viento particular pero como esa velocidad no suele ser constante la mayoría de este tipo de aerogeneradores tienen dos puntos de funcionamiento, uno a bajas velocidades y otro a medias y altas velocidades.

Esta configuración está prácticamente en desuso debido a los problemas mecánicos que conlleva la velocidad fija. Hay que tener en cuenta que las fluctuaciones del aire no se controlan y se convierten en fluctuaciones mecánicas que pueden llegar a convertirse en fluctuaciones en la potencia eléctrica. Esto origina cantidades de potencia reactiva variables (a pesar del banco de condensadores) que aumentan las fluctuaciones de la tensión y las pérdidas en la línea.

Para este tipo de configuración se utilizan cualquiera de los 3 controles de potencia (stall control, pitch control y active stall control) aunque el más utilizado era el stall control ya que el pitch control no era lo suficientemente rápido para hacer frente las fluctuaciones de potencia ocasionadas por grandes ráfagas de viento. Esta conexión fue la más utilizada hasta mediados de los 90, cuando los aerogeneradores empezaron a generar en rangos de MW.

### 1.4.2. Velocidad variable

En el caso de las configuraciones con velocidad variable la inmensa mayoría, por no decir la totalidad, utilizan el pitch control para controlar la potencia.

#### Tipo B: Velocidad variable limitada

Se utiliza un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) con una resistencia de rotor variable llamada OptiSlip <sup>2</sup>. Al igual que la configuración de tipo A este generador también está directamente conectado a la red mediante un transformador. Además utiliza un banco de condensadores para compensar la potencia reactiva y un dispositivo para conseguir una mayor suavidad en la conexión a la red durante el arranque.

<sup>1</sup>se la conoce como la configuración danesa porque fue desarrollada en Dinamarca

<sup>2</sup>marca registrada por Vestas



La variabilidad de la velocidad se consigue mediante una resistencia de rotor variable. Con esa variación se controla el deslizamiento de la máquina y de esa manera la potencia de salida del sistema se puede controlar. El rango de velocidades depende de la resistencia variable del rotor y no suele superar el 10 % por encima de la velocidad de sincronismo.

### **Tipo C: Velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial**

Esta configuración es la denominada configuración con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) y utiliza un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) y un convertidor de frecuencia de escala parcial en el circuito del rotor, por lo que por un lado se tiene el estátor directamente conectado a la red y por otro el rotor conectado a la red mediante el ya mencionado convertidor. Este convertidor controla la frecuencia del rotor y por lo tanto su velocidad. Además, ejecuta la compensación de potencia reactiva y establece una conexión de red más suave. El rango de velocidades que comprende es de un 30 % alrededor de la velocidad de sincronismo aunque ese valor puede variar dependiendo del tamaño del convertidor. Esta configuración es atractiva desde el punto de vista económico siempre que el convertidor de frecuencia no sea muy grande. Sus mayores inconvenientes son el uso de anillos deslizantes y protección para posibles fallos en la red.

### **Tipo D: Velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala completa**

En esta configuración el generador se conecta a la red mediante un convertidor de frecuencia de escala completa. Este convertidor ejecuta la compensación de energía reactiva y establece una conexión de red más suave. El generador se excita eléctricamente (WRSG o WRIG) o por imanes permanentes (PMSG). El inconveniente de esta configuración es su mayor desembolso económico en la electrónica de potencia y sus mayores pérdidas en esta parte debido a que toda la potencia generada pasa a través del convertidor de potencia.

En la imagen 1.3 se puede ver en porcentajes los tipos de configuraciones más utilizados en Europa hasta finales de 2010.

Y en la imagen 1.4 se puede ver la tecnología de aerogeneradores instalada en España hasta el año 2011. En esta última gráfica se puede ver que la máquina de inducción doblemente alimentada ha sido la más instalada en los últimos años aunque todavía quedan alrededor de 4 GW de potencia instalada utilizando generadores asíncronos como el que se va a utilizar en el presente proyecto.



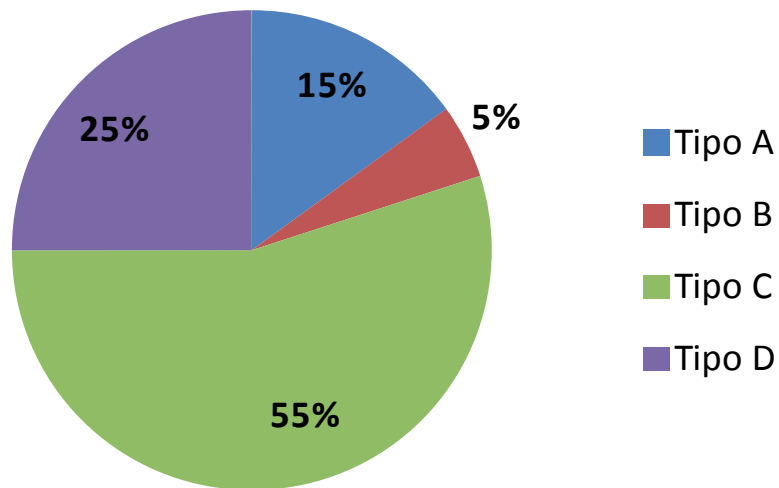


Figura 1.3: Tipos de configuraciones instaladas en Europa hasta el año 2010. Fuente: EWEA [5]

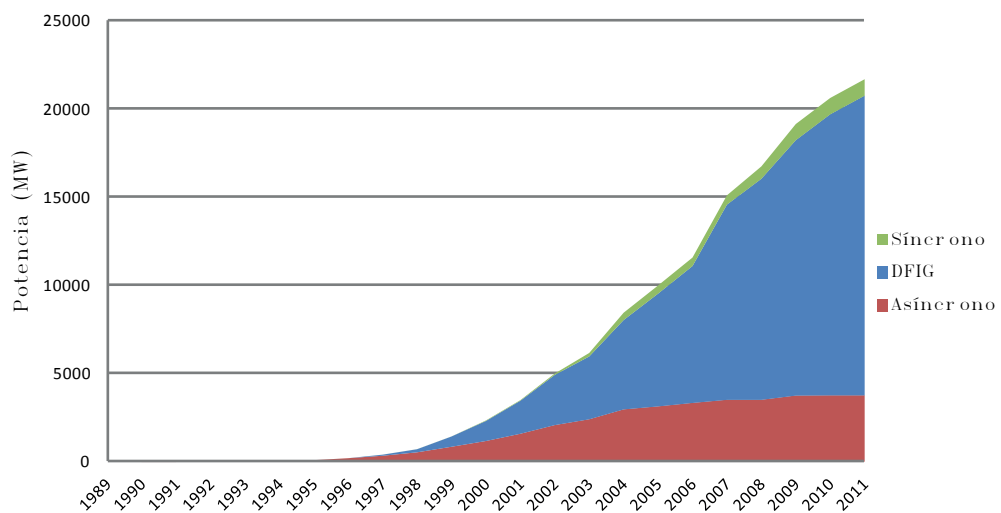


Figura 1.4: Tipos de configuraciones instaladas en España hasta el año 2011. Fuente: AEE



## Capítulo 2

# Huecos de tensión

### 2.1. Introducción

En este capítulo se explicará qué son los huecos de tensión y como se originan. Además se utilizará el método de las componentes simétricas para sacar los valores de las tensiones de fase para cada tipo de hueco según la falta que los origina.

Por último se verá cuales son los requerimientos del Gobierno a los parques eólicos en lo referente a la continuidad del suministro eléctrico durante los huecos de tensión.

### 2.2. Definición

Para definir el concepto de “hueco de tensión” vamos a utilizar dos publicaciones relacionadas con la calidad del suministro eléctrico:

- La norma UNE-EN 50160 [6] define el hueco de tensión como una disminución brusca de la tensión de alimentación hasta un valor situado entre el 90 % y el 1 % de la tensión declarada (generalmente la tensión nominal del sistema), seguida del restablecimiento de la tensión después de un periodo de tiempo corto. Convencionalmente la duración de un hueco de tensión está comprendida entre 10 ms y 1 minuto. La profundidad de la caída de tensión se define como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de entrada a menos de un 90 % de la tensión declarada no se consideran huecos de tensión.
- La norma IEEE Standard 1159-2009 [7] define el hueco de tensión como una disminución de la tensión o la corriente en valor eficaz entre 0.1 y 0.9 pu a la frecuencia de red para una duración comprendida entre 0.5 ciclos y un minuto.

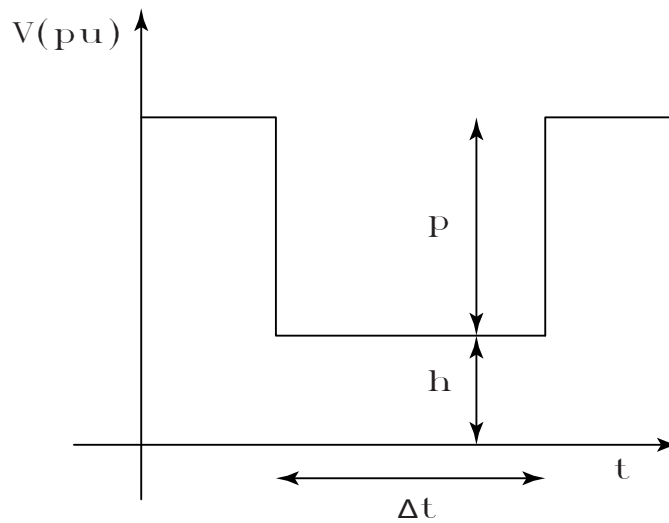


Figura 2.1: Esquema de un hueco de tensión

A la hora de hablar de los huecos de tensión existe confusión debido a que al decir, por ejemplo, un hueco del 20 % no es seguro si se refiere a una caída de 0.2 pu o 0.8 pu. Por lo tanto en este proyecto nos referiremos en todo momento a la tensión residual del hueco ( $h$  en la imagen 2.1), de modo que un hueco de tensión del 20 % se referirá a que la tensión ha disminuido 0.8 pu, es decir,  $p = 0,8 pu$  y  $h = 0,2 pu$ , donde  $p$  es la profundidad del hueco y se puede ver claramente que  $1 - p = h$ . Asimismo, se utilizará  $\Delta t$  para definir la duración del hueco. Al producirse una falta en la red la profundidad del hueco dependerá de la potencia de la red y de la proximidad de la falta al punto donde se está observando el hueco.

Por lo tanto se empezará caracterizando el hueco de tensión por la tensión residual  $h$  ( $0 \leq h \leq 1$ ) y una duración  $\Delta t$ . En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de un hueco de tensión trifásico con una tensión residual  $h = 0,2$  y una duración  $\Delta t = 10$  ciclos (0.2 segundos para una frecuencia de 50 Hz).

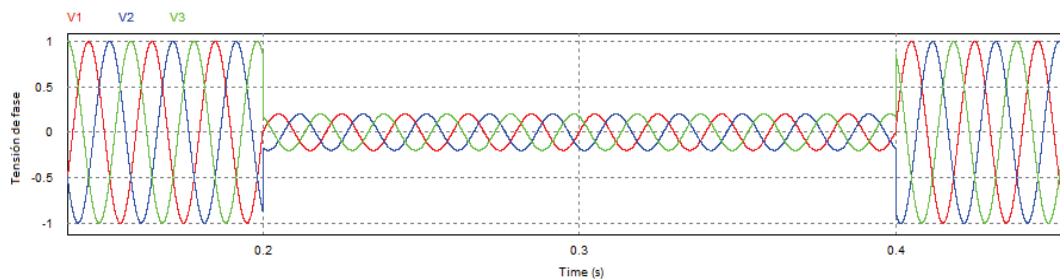


Figura 2.2: Evolución de las tensiones de fase durante un hueco de tensión simétrico

Si bien es cierto que un hueco de tensión no es tan dañino como lo puede ser una interrupción, dado que la aparición de huecos de tensión es mucho más frecuente, a la larga, el daño causado puede ser mayor. Hay que tener en cuenta que el daño no sólo

se contabiliza en si una máquina se para o no sino en el impacto económico que ello conlleva.

## 2.3. Causas que originan los huecos de tensión

Según la norma IEEE Std 1159-2009 [7] los huecos de tensión generalmente se producen debido a defectos en la red, arranque de motores de potencia elevada que necesitan una alta corriente de inicio o por faltas producidas en la red (originadas por descargas atmosféricas, animales, accidentes u otros). En general la red eléctrica conecta la generación de energía eléctrica con el consumo de esta misma mediante cables que en general son inductivos. Por la propia fórmula de un inductor ( $v_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$ ) se sabe que un incremento de corriente eléctrica conlleva una bajada de tensión para dificultar ese incremento. Es esta bajada de tensión la que a veces se sale del rango de funcionamiento originando así los huecos de tensión.

En general las causas de los huecos de tensión se deben a dos efectos:

- Faltas producidas en la red (cortocircuitos): Pueden ser debidas a descargas atmosféricas o a contactos accidentales de animales o ramas de árboles entre otros. Normalmente estas faltas no son de larga duración debido a la actuación de las protecciones que no impiden una caída de tensión durante un corto periodo de tiempo.
- Sobrecargas: Debidas básicamente a la puesta en marcha de grandes cargas como motores eléctricos o transformadores de gran potencia.

En los parques eólicos los aerogeneradores están conectados a la red de media o alta tensión mediante uno o varios transformadores para así poder transportar la energía eléctrica. Por lo tanto los huecos que aparecen en los parques eólicos tienen su origen en la red de distribución o de transporte [8].

Los efectos típicos de los huecos de tensión son la aparición de picos de corriente en el momento de la falta y en el momento de la recuperación de la tensión. Ese efecto no es deseado ya que puede llevar, por ejemplo, a la aparición de picos de par en máquinas de inducción que pueden originar daños en la máquina. En lo que a aerogeneradores se refiere este tema es de gran importancia ya que esos picos de intensidad pueden activar las protecciones de tal manera que los aerogeneradores se desconecten de la red interrumpiendo así el suministro eléctrico.

## 2.4. Requerimientos a la eólica

Al principio de este capítulo hemos explicado qué son los huecos de tensión y hemos visto que el número de este tipo de reducciones de tensión son bastante numerosos. Por

ello la REE hizo una resolución acerca de los requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas. Esta resolución está disponible en su totalidad en el Boletín Oficial del Estado [9] pero en este apartado haremos un pequeño resumen.

El objetivo de esta resolución no es otro que garantizar la continuidad del suministro eléctrico durante los huecos de tensión, es decir, todas las instalaciones que utilicen la energía eólica como fuente de energía primaria deben mantenerse acopladas al sistema eléctrico sin sufrir una desconexión. En la figura 2.3 podemos ver el margen para el que estos requisitos deben cumplirse. El área sombreada de la figura varía según el tipo de falta y la profundidad de esta. Para un hueco con una tensión residual de 0.2 pu la duración hasta el restablecimiento debe ser de 0.5 segundos mientras que si la tensión residual es de 0.8 pu el restablecimiento puede tardar al menos un segundo. Resumiendo, el área sombreada marca el límite en el que no se puede producir una desconexión.

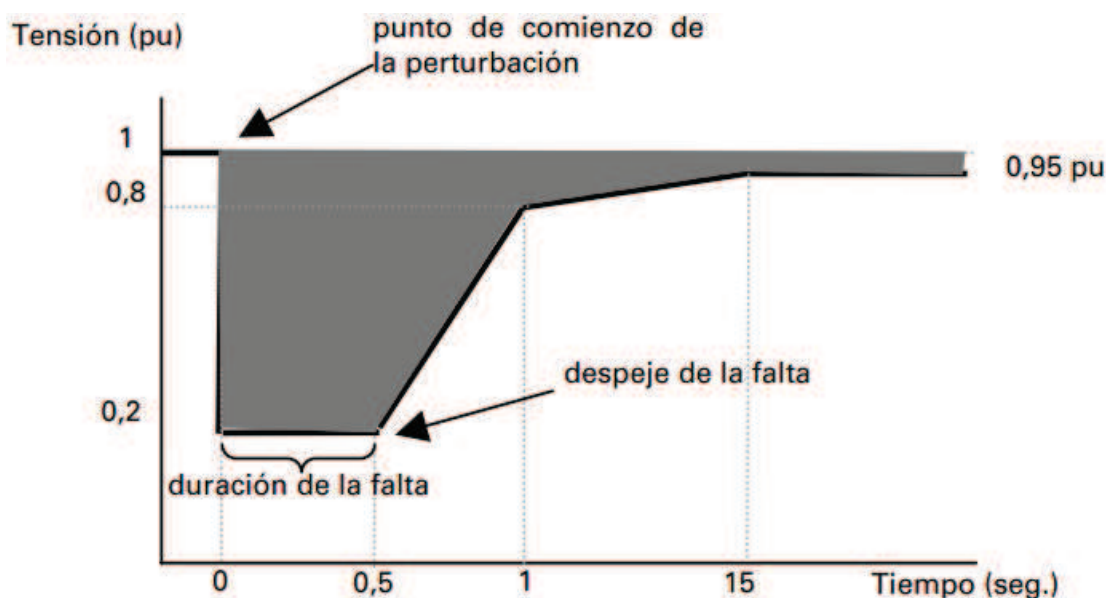


Figura 2.3: Curva tensión-tiempo que define el área “hueco de tensión”

## 2.5. Componentes simétricas

En 1918 Charles LeGeyt Fortescue [10] desarrolló el método de las componentes simétricas. Este método permite transformar sistemas polifásicos desequilibrados en el sumatorio de sistemas polifásicos equilibrados. En nuestro caso el sistema a analizar es un sistema trifásico y el análisis de las componentes simétricas es importante debido a que los huecos de tensión pueden ser simétricos o asimétricos.

Si el valor de la tensión de todas las fases disminuye en la misma proporción y el desfase entre ellas se mantiene en  $120^\circ$  el hueco será simétrico (vease figura 2.2). Este hueco puede ser debido a un cortocircuito trifásico pero si el cortocircuito se produce entre una fase y tierra, entre dos fases o entre dos fases y tierra la tensión de las fases no disminuirá lo mismo para cada una de ellas y el desfase entre ellas no será de  $120^\circ$ . Este tipo de huecos serán asimétricos y su estudio será más sencillo utilizando componentes simétricas.

En la figura 2.4 se muestra un sistema equilibrado y uno desequilibrado. Con el primero es sencillo trabajar ya que se puede analizar una de sus fases y aplicar los resultados a las otras dos pero en el segundo caso eso no es posible dado que las tres fases no son iguales y desfasadas  $120^\circ$ .

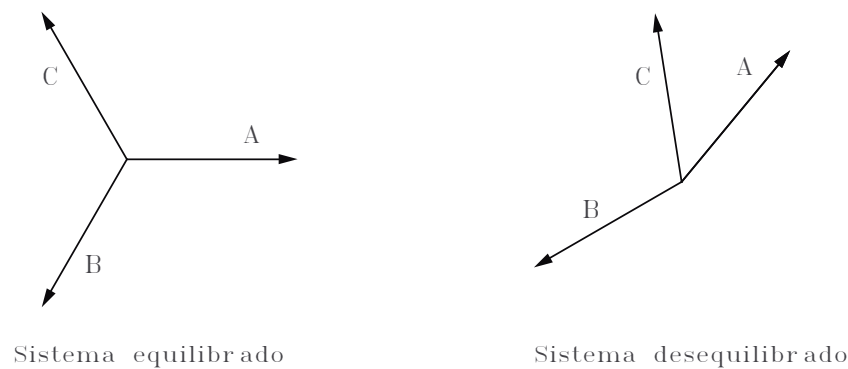


Figura 2.4: Sistema equilibrado (izquierda) y sistema desequilibrado (derecha)

Por lo tanto, el objetivo de la transformación de Fortescue es obtener 3 sistemas equilibrados cuya suma sea el sistema desequilibrado. Esos 3 sistemas equilibrados serán el sistema de secuencia directa, el sistema de secuencia inversa y el sistema de secuencia homopolar (figura 2.5).

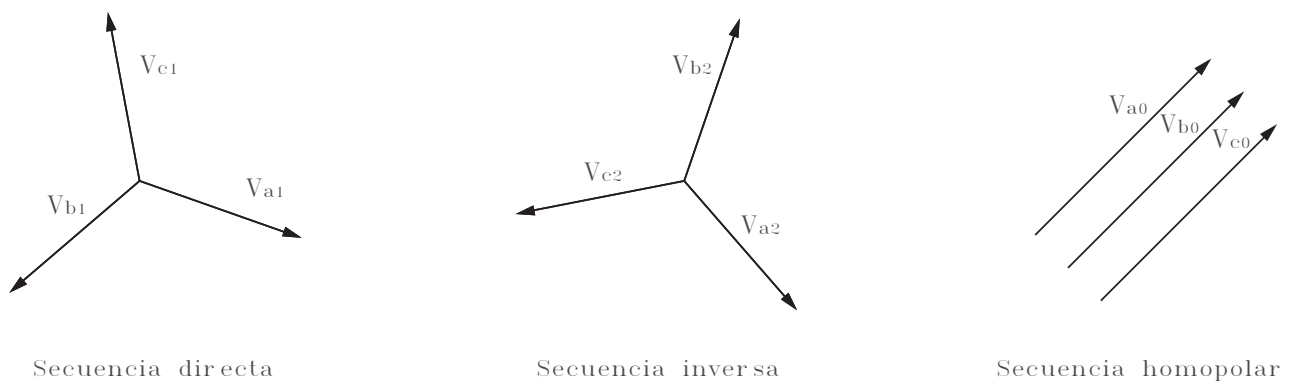


Figura 2.5: Componentes directa, inversa y homopolar

- Componente directa: El orden de sus fase es el normal: fase A  $\rightarrow$  fase B  $\rightarrow$  fase C

- Componente inversa: El orden de sus fases está invertido: fase A → faseC → fase B. Por este motivo tiende a hacer girar los motores en sentido inverso.
- Componente homopolar: Las tres tensiones tienen la misma fase (son iguales en todo momento).

La transformación de Fortescue [10] permite obtener las componentes simétricas de cualquier sistema trifásico desequilibrado. La matriz de transformación de Fortescue y su inversa se definen como:

$$F = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} ; \quad F^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

donde

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i = 1\angle 120$$

siendo algunas de sus propiedades:

$$a^2 = 1\angle -120; a^3 = 1; a^4 = a; 1 + a + a^2 = 0$$

## 2.6. Obtención de los tipos de huecos de tensión según el tipo de falta

Utilizando la transformación de Fortescue y el divisor de tensión de la figura 2.6 se podrán calcular los valores de las componentes fasoriales de los huecos de tensión.

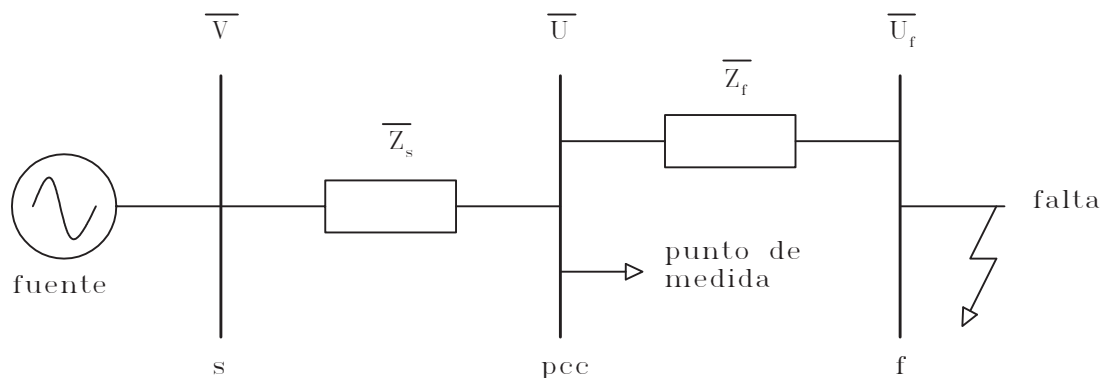


Figura 2.6: Divisor de tensión para calcular los huecos de tensión



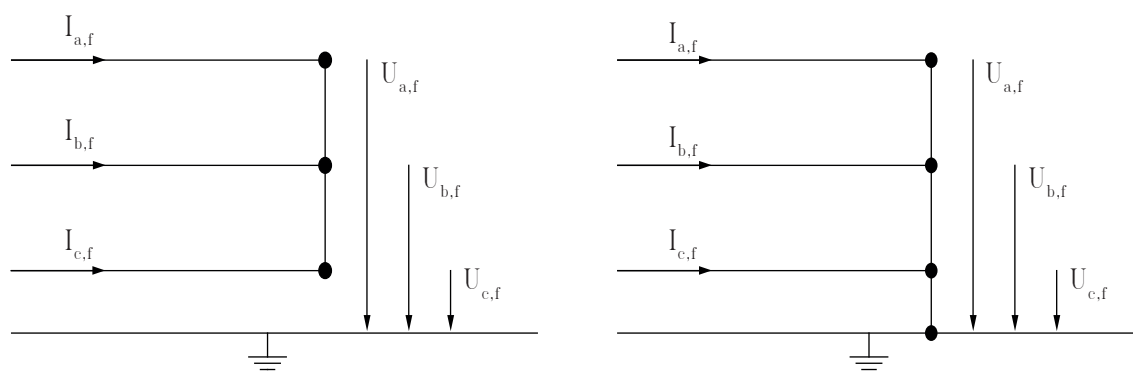


Figura 2.7: Esquema de falta trifásica y falta trifásica a tierra

### 2.6.1. Falta trifásica y falta trifásica a tierra

En la imagen 2.7 se ve que:

$$U_{a_f b_f} = U_{b_f c_f} = U_{c_f a_f} = 0 \rightarrow \vec{U}_{a_f} = \vec{U}_{b_f} = \vec{U}_{c_f} (= 0 \text{ si la falta es a tierra})$$

$$\vec{I}_{a_f} = \vec{I}_{b_f} = \vec{I}_{c_f} = 0 \text{ (sólo para la falta trifásica)}$$

Y por lo tanto utilizando la transformación de Fortescue se logran las componentes simétricas de la tensión en el punto  $f$  para la falta trifásica:

$$\vec{U}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + \vec{U}_{b_f} + \vec{U}_{c_f}) = \vec{U}_{a_f}$$

$$\vec{U}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a\vec{U}_{b_f} + a^2\vec{U}_{c_f}) = 0$$

$$\vec{U}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a^2\vec{U}_{b_f} + a\vec{U}_{c_f}) = 0$$

$$\vec{I}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + \vec{I}_{b_f} + \vec{I}_{c_f}) = 0$$

$$\vec{I}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + a\vec{I}_{b_f} + a^2\vec{I}_{c_f})$$

$$\vec{I}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + a^2\vec{I}_{b_f} + a\vec{I}_{c_f})$$

De esas 6 expresiones se obtiene que  $\vec{U}_{1_f} = 0$ ;  $\vec{U}_{2_f} = 0$ ;  $\vec{I}_{0_f} = 0$

Y las componentes simétricas de la tensión en el punto  $f$  para la falta trifásica a tierra:

$$\vec{U}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + \vec{U}_{b_f} + \vec{U}_{c_f}) = 0$$

$$\vec{U}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a\vec{U}_{b_f} + a^2\vec{U}_{c_f}) = 0$$

$$\vec{U}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a^2\vec{U}_{b_f} + a\vec{U}_{c_f}) = 0$$

Se dibujan los circuitos de las componentes simétricas (ver figura 2.8) y con ellos se logran las tensiones en el punto de conexión común ( $U$ ), que son iguales tanto para la falta trifásica como para la trifásica a tierra.

$$\vec{U}_0 = 0$$

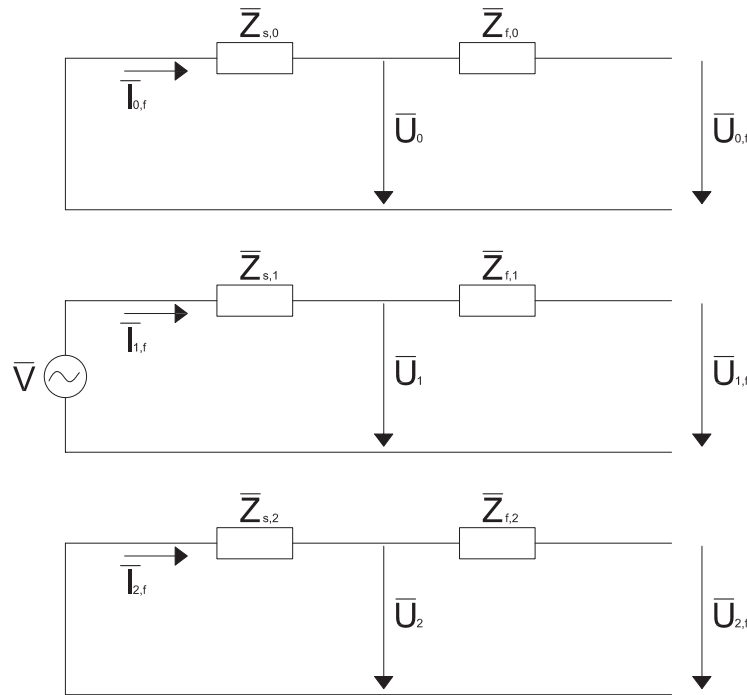


Figura 2.8: Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta trifásica

$$\vec{U}_1 = \vec{V} \frac{\vec{Z}_{f1}}{\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{f1}}$$

$$\vec{U}_2 = 0$$

Se puede observar que la tensión residual  $\vec{h}$  viene dada por la expresión  $\frac{\vec{Z}_{f1}}{\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{f1}}$  y por lo tanto habrá un cambio de fase de la tensión dependiendo de esas impedancias. En este caso y los siguientes se despreciará la impedancia del neutro, impedancia que en la imagen 2.8 iría en el circuito de la secuencia homopolar ya que las corrientes homopolares retornan por ese hilo. Esta suposición no afectará a los objetivos del proyecto porque como se verá más adelante la componente homopolar se anulará antes de llegar al aerogenerador.

Y una vez se conozcan las expresiones de las componentes simétricas de los huecos de tensión, las expresiones fasoriales de estos se obtienen aplicando la inversa de la transformada de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{h} \cdot \vec{V} \\ a^2 \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} \\ a \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} \end{bmatrix}$$

Este tipo de hueco es el que de ahora en adelante se conocerá como hueco de **Tipo**

A.

### 2.6.2. Falta fase-tierra

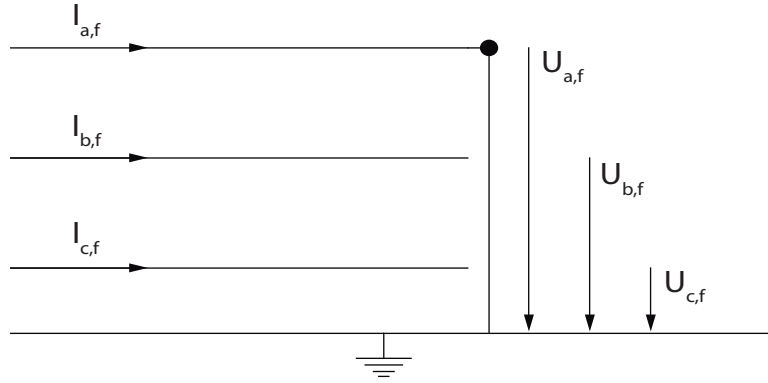


Figura 2.9: Esquema de falta entre una fase y tierra

De la figura 2.9 obtenemos que:

$$\vec{I}_{b_f} = \vec{I}_{c_f} = 0$$

$$\vec{U}_{a_f} = 0$$

Y utilizando la transformación de Fortescue tanto para las tensiones como para las corrientes:

$$\vec{U}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + \vec{U}_{b_f} + \vec{U}_{c_f}) = \frac{1}{3}(\vec{U}_{b_f} + \vec{U}_{c_f}).$$

$$\vec{U}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a\vec{U}_{b_f} + a^2\vec{U}_{c_f}) = \frac{1}{3}(a\vec{U}_{b_f} + a^2\vec{U}_{c_f})$$

$$\vec{U}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + a^2\vec{U}_{b_f} + a\vec{U}_{c_f}) = \frac{1}{3}(a^2\vec{U}_{b_f} + a\vec{U}_{c_f})$$

$$\vec{I}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + \vec{I}_{b_f} + \vec{I}_{c_f}) = \frac{1}{3}\vec{I}_{a_f}$$

$$\vec{I}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + a\vec{I}_{b_f} + a^2\vec{I}_{c_f}) = \frac{1}{3}\vec{I}_{a_f}$$

$$\vec{I}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{a_f} + a^2\vec{I}_{b_f} + a\vec{I}_{c_f}) = \frac{1}{3}\vec{I}_{a_f}$$

De esas 6 expresiones se obtiene que  $\vec{I}_{0_f} = \vec{I}_{1_f} = \vec{I}_{2_f}$  y que  $\vec{U}_{0_f} + \vec{U}_{1_f} + \vec{U}_{2_f} = 0$

Si se dibujan los circuitos de las componentes simétricas (ver figura 2.10) cumpliendo los resultados se obtiene:

$$\vec{U}_0 = \vec{V} \left( -\frac{\vec{Z}_{S_0}}{\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right)$$

$$\vec{U}_1 = \vec{V} \left( 1 - \frac{\vec{Z}_{S_1}}{\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right) = \vec{V} \left( \frac{\vec{Z}_{S_0} + \vec{Z}_{S_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}}{\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right)$$

$$\vec{U}_2 = \vec{V} \left( -\frac{\vec{Z}_{S_2}}{\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right)$$

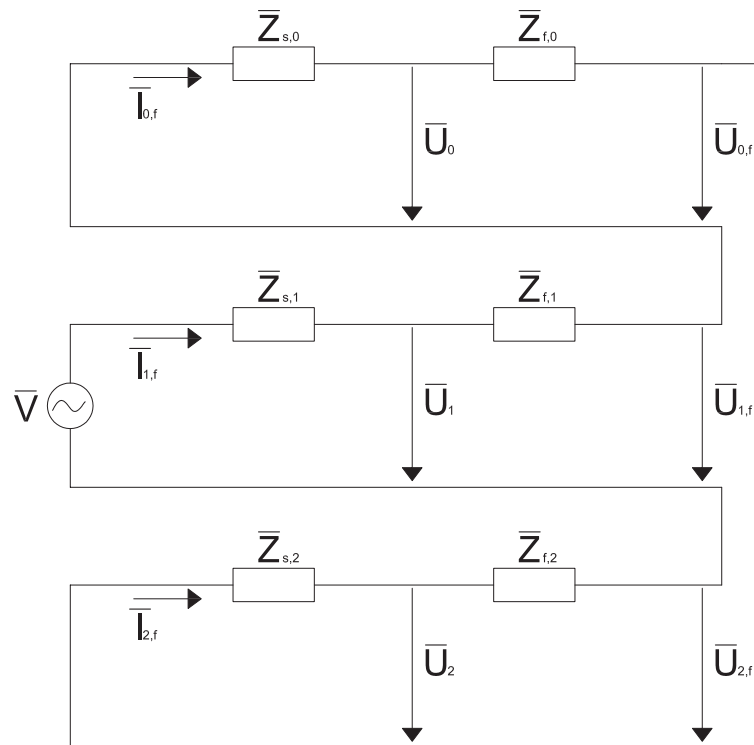


Figura 2.10: Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre una fase y tierra

En este caso la tensión residual se define como  $\vec{h} = \left( \frac{\vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}}{\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right)$  y si suponemos que  $\vec{Z}_{s_0} = \vec{Z}_{s_1} = \vec{Z}_{s_2} = \vec{Z}_s$  entonces  $\vec{h} = \left( \frac{\vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}}{3\vec{Z}_s + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_1} + \vec{Z}_{f_2}} \right)$  y las expresiones anteriores en función de esa tensión residual como:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3}(1 - \vec{h}) \\ \frac{1}{3}(2 + \vec{h}) \\ -\frac{1}{3}(1 - \vec{h}) \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y las expresiones fasoriales tras utilizar a inversa de la transformada de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{h} \cdot \vec{V} \\ a^2 \cdot \vec{V} \\ a \cdot \vec{V} \end{bmatrix}$$

Este tipo de hueco es el que de ahora en adelante se conocerá como hueco de **Tipo**

**B.**

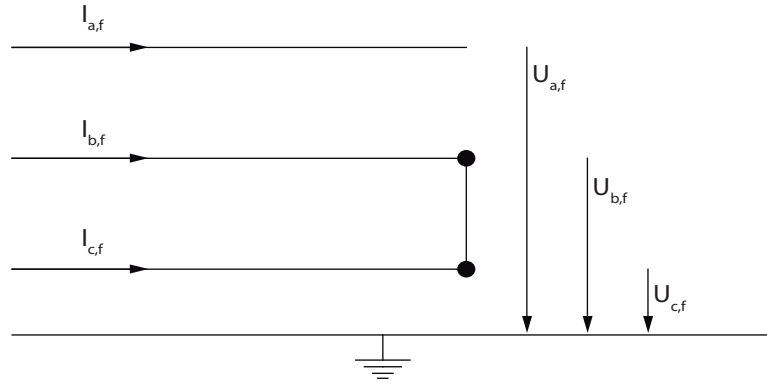


Figura 2.11: Esquema de falta entre dos fases

### 2.6.3. Falta fase-fase

De la figura 2.11 obtenemos que:

$$\vec{I}_{a_f} = 0$$

$$\vec{I}_{b_f} = -\vec{I}_{c_f}$$

$$\vec{U}_{b_f} = \vec{U}_{c_f}$$

Y utilizando la transformación de Fortescue tanto para las tensiones como para las corrientes:

$$\vec{U}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} + 2\vec{U}_{b_f}).$$

$$\vec{U}_{1_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} - \vec{U}_{b_f})$$

$$\vec{U}_{2_f} = \frac{1}{3}(\vec{U}_{a_f} - \vec{U}_{b_f})$$

$$\vec{I}_{0_f} = 0$$

$$\vec{I}_{1_f} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot j \cdot \vec{I}_{b_f}$$

$$\vec{I}_{2_f} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot j \cdot \vec{I}_{b_f}$$

De esas 6 expresiones se obtiene que  $\vec{I}_{1_f} + \vec{I}_{2_f} = 0$  y que  $\vec{U}_{1_f} = \vec{U}_{2_f}$

Si se dibujan los circuitos de las componentes simétricas (ver figura 2.12) cumpliendo los resultados se obtiene:

$$\vec{U}_0 = 0$$

$$\vec{U}_1 = \vec{V} \left( 1 - \frac{\vec{Z}_{S1}}{\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{s2} + \vec{Z}_{f1} + \vec{Z}_{f2}} \right) = \vec{V} \left( \frac{\vec{Z}_{S2} + \vec{Z}_{f1} + \vec{Z}_{f2}}{\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{s2} + \vec{Z}_{f1} + \vec{Z}_{f2}} \right)$$

$$\vec{U}_2 = \vec{V} \left( -\frac{\vec{Z}_{S2}}{\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{s2} + \vec{Z}_{f1} + \vec{Z}_{f2}} \right)$$

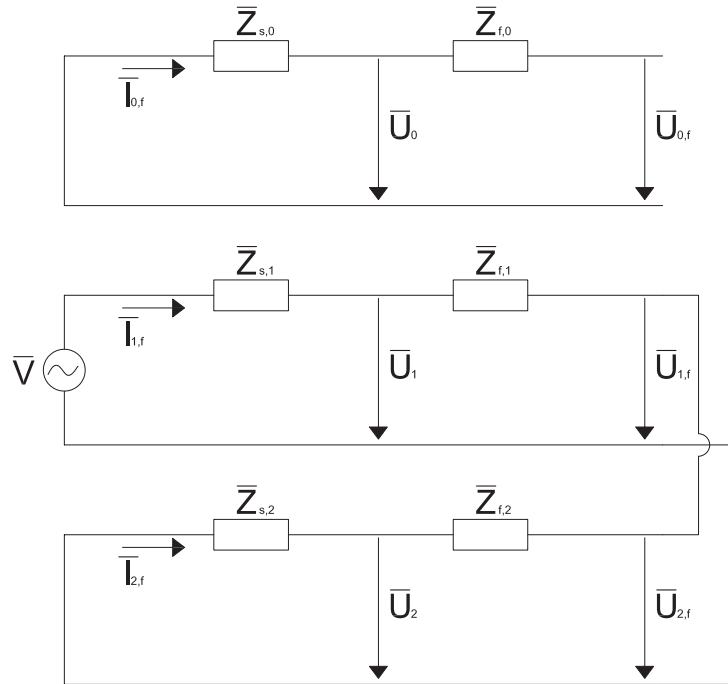


Figura 2.12: Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre dos fases

En este caso la tensión residual se define como  $\vec{h} = \left( \frac{Z_{f1}^{\vec{}} + Z_{f2}^{\vec{}}}{Z_{s1}^{\vec{}} + Z_{s2}^{\vec{}} + Z_{f1}^{\vec{}} + Z_{f2}^{\vec{}}} \right)$  y si suponemos que  $Z_{s1}^{\vec{}} = Z_{s2}^{\vec{}} = Z_s^{\vec{}}$  entonces  $\vec{h} = \left( \frac{Z_{f1}^{\vec{}} + Z_{f2}^{\vec{}}}{2Z_s^{\vec{}} + Z_{f1}^{\vec{}} + Z_{f2}^{\vec{}}} \right)$  y las expresiones anteriores en función de esa tensión residual como:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}(1 + \vec{h}) \\ \frac{1}{2}(1 - \vec{h}) \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y las expresiones fasoriales tras utilizar a inversa de la transformada de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot \vec{h}\right) \cdot \vec{V} \\ \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot \vec{h}\right) \cdot \vec{V} \end{bmatrix}$$

Este tipo de hueco es el que de ahora en adelante se conocerá como hueco de **Tipo C**.

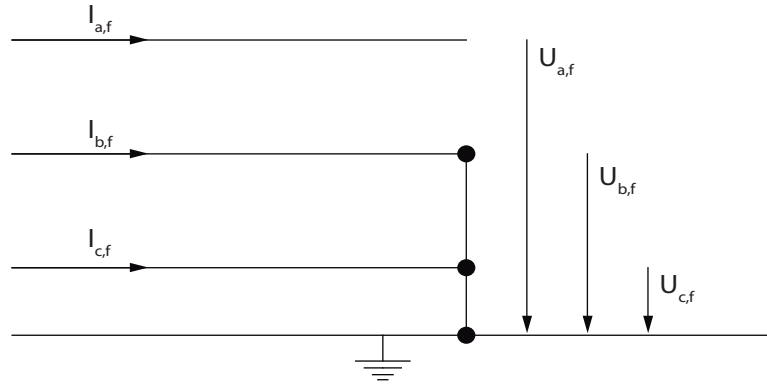


Figura 2.13: Esquema de falta entre dos fases y tierra

### 2.6.4. Falta fase-fase-tierra

De la figura 2.13 obtenemos que:

$$\vec{I}_{a_f} = 0$$

$$\vec{U}_{b_f} = \vec{U}_{c_f} = 0$$

Y utilizando la transformación de Fortescue tanto para las tensiones como para las corrientes:

$$\vec{U}_{0_f} = \frac{1}{3}\vec{U}_{a_f}$$

$$\vec{U}_{1_f} = \frac{1}{3}\vec{U}_{a_f}$$

$$\vec{U}_{2_f} = \frac{1}{3}\vec{U}_{a_f}$$

$$\vec{I}_{0_f} = \frac{1}{3}(\vec{I}_{b_f} + \vec{I}_{c_f})$$

$$\vec{I}_{1_f} = \frac{1}{3}(a\vec{I}_{b_f} + a^2\vec{I}_{c_f})$$

$$\vec{I}_{2_f} = \frac{1}{3}(a^2\vec{I}_{b_f} + a\vec{I}_{c_f})$$

De esas 6 expresiones se obtiene que  $\vec{I}_{0_f} + \vec{I}_{1_f} + \vec{I}_{2_f} = 0$  y que  $\vec{U}_{1_f} = \vec{U}_{2_f} = \vec{U}_{0_f}$

Si se dibujan los circuitos de las componentes simétricas (ver figura 2.14) cumpliendo los resultados se obtiene:

$$\vec{U}_0 = \vec{V} \left( \frac{\vec{Z}_{s_2} \cdot (\vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{s_0})}{(\vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{f_1}) \cdot (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_2}) + (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{f_0}) \cdot (\vec{Z}_{f_2} + \vec{Z}_{s_2})} \right)$$

$$\vec{U}_1 = \vec{V} \left( 1 - \frac{\vec{Z}_{s_1} \cdot (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_2})}{(\vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{f_1}) \cdot (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_2}) + (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{f_0}) \cdot (\vec{Z}_{f_2} + \vec{Z}_{s_2})} \right) =$$

$$= \vec{V} \left( \frac{\vec{Z}_{f_1} \cdot (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_2}) + (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{f_0}) \cdot (\vec{Z}_{f_2} + \vec{Z}_{s_2})}{(\vec{Z}_{s_1} + \vec{Z}_{f_1}) \cdot (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{s_2} + \vec{Z}_{f_0} + \vec{Z}_{f_2}) + (\vec{Z}_{s_0} + \vec{Z}_{f_0}) \cdot (\vec{Z}_{f_2} + \vec{Z}_{s_2})} \right)$$

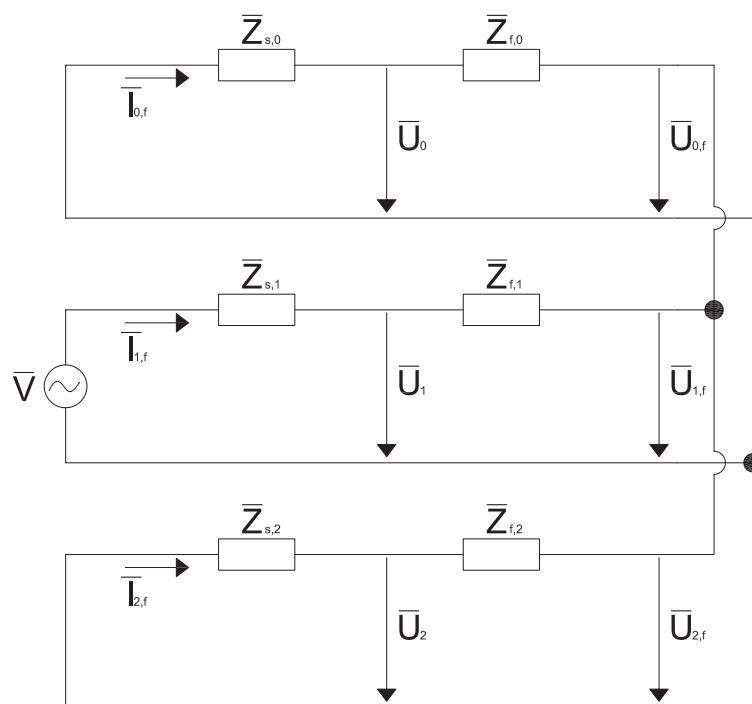


Figura 2.14: Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre dos fases y tierra

$$\vec{U}_2 = \vec{V} \left( \frac{\vec{Z}_{s0} \cdot (\vec{Z}_{f2} + \vec{Z}_{s2})}{(\vec{Z}_{s1} + \vec{Z}_{f1}) \cdot (\vec{Z}_{s0} + \vec{Z}_{s2} + \vec{Z}_{f0} + \vec{Z}_{f2}) + (\vec{Z}_{s0} + \vec{Z}_{f0}) \cdot (\vec{Z}_{f2} + \vec{Z}_{s2})} \right)$$

Si suponemos que  $\vec{Z}_{s0} = \vec{Z}_{s1} = \vec{Z}_{s2} = \vec{Z}_s$  y  $\vec{Z}_{f0} = \vec{Z}_{f1} = \vec{Z}_{f2} = \vec{Z}_f$  entonces  $\vec{h} = \left( \frac{\vec{Z}_f}{\vec{Z}_s + \vec{Z}_f} \right)$  y las expresiones anteriores en función de la tensión residual son:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(1 - \vec{h}) \\ \frac{1}{3}(1 + 2\vec{h}) \\ \frac{1}{3}(1 - \vec{h}) \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y las expresiones fasoriales tras utilizar la inversa de la transformada de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_0 \\ \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ (a^2 \cdot \vec{h}) \cdot \vec{V} \\ (a \cdot \vec{h}) \cdot \vec{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ (-\frac{1}{2} \cdot \vec{h} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot \vec{h}) \cdot \vec{V} \\ (-\frac{1}{2} \cdot \vec{h} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot \vec{h}) \cdot \vec{V} \end{bmatrix}$$

Este tipo de hueco es el que de ahora en adelante se conocerá como hueco de **Tipo E**.



Para lograr las expresiones de estos huecos de tensión se han cortocircuitado una o algunas de las fases pero el hueco será el mismo independientemente de las fases cortocircuitadas, es decir, si en el hueco de tipo B en vez de cortocircuitar la fase  $a$  se cortocircuita la  $c$  las expresiones fasoriales de la tensión serían:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ a^2 \cdot \vec{V} \\ a \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} \end{bmatrix}$$

Los 4 tipos de huecos de tensión calculados en este apartado son los que se pueden producir de manera natural. En el siguiente capítulo se verá que en su propagación a través de transformadores esos huecos pueden modificarse creando otros 3 huecos diferentes.





## Capítulo 3

# Propagación de los huecos a través de transformadores

### 3.1. Introducción

En el capítulo anterior se han visto los tipos de huecos que existen según el tipo de falta pero entre el origen de esos huecos y el punto en el que se quiere ver la influencia de ellos mismos pueden encontrarse diversos elementos entre los que se encuentran los transformadores.

Para poder analizar la propagación de los huecos de tensión a través de transformadores primero habrá que ver qué tipos de transformadores hay ya que no todos tienen por qué influir de la misma forma. Una vez conocidos los tipos el siguiente paso será ver la propagación de cada hueco a través de ellos.

### 3.2. Obtención de tipos de huecos de tensión según la conexión de los transformadores

El transporte de energía eléctrica se hace a tensiones muy altas para que las pérdidas sean menores y por lo tanto, la energía eléctrica transformada por el aerogenerador debe pasar por transformadores que aumenten la tensión. Para ver la influencia de los transformadores se utiliza el sistema eléctrico de la figura 3.1. En el caso de aplicación de este proyecto en el lugar de la carga habrá un aerogenerador.

Habitualmente esos transformadores están conectados con conexión triángulo (D) - estrella (y) estando la estrella en el lado de menor tensión. Además, el neutro del lado de baja tensión se conecta rígidamente a la instalación de tierra del aerogenerador. Por otro lado, de no especificarse lo contrario el índice horario será 11. Así, la conexión del transformador se queda Dyn11. Esta conexión es útil debido a que al haber una conexión

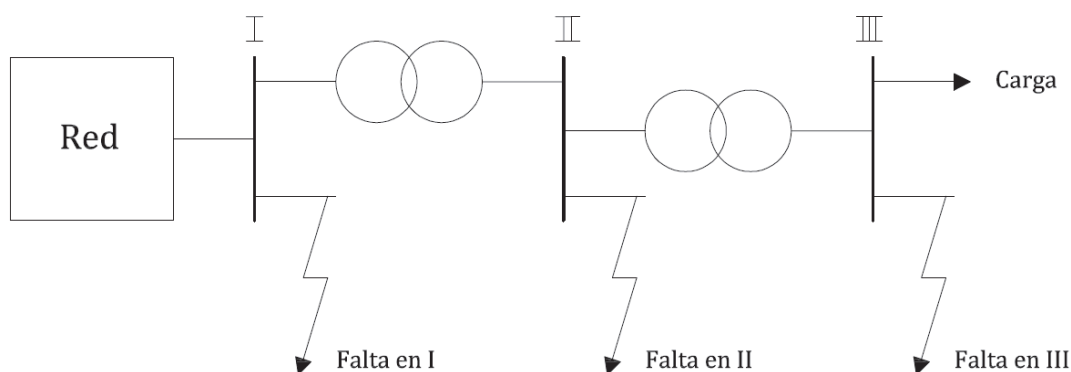


Figura 3.1: Sistema eléctrico con tres niveles de tensión

en triángulo la estabilidad es mayor con relación a las cargas desbalanceadas puesto que el triángulo redistribuye parcialmente cualquier desbalance que se presente [11].

A pesar de ser este el tipo de conexión más utilizado en los parques eólicos en el siguiente apartado se estudiará el comportamiento de los huecos de tensión frente a las 4 conexiones de transformadores más utilizadas (Yy, Dd, Yd y Dy).

### 3.2.1. Tipos de transformadores

Dado que la mayoría de los huecos a estudiar son asimétricos es importante ver cómo serán las componentes directa, inversa y homopolar de las tensiones en el secundario del transformador. Por lo tanto antes de empezar es útil conocer algunos datos relevantes:

- Para que puedan existir las componentes de secuencia directa o inversa de la intensidad no es necesario que exista hilo de neutro de retorno ya que al ser tres sinusoides desfasadas  $120^\circ$  entre sí la suma de las tres intensidades es nula en ambos casos y se cancela al llegar al neutro.
- Para que pueda existir componente homopolar de intensidad es imprescindible que exista hilo de neutro de retorno ya que la suma de las tres intensidades de secuencia homopolar no puede ser cero al tratarse de tres sinusoides iguales y en fase. Por lo tanto es necesario un hilo de neutro que permita el retorno de esa componente homopolar.
- Los índices horarios no tienen influencia en el resultado que experimenta la máquina asíncrona ya que lo único que suponen es un giro de  $120^\circ$  entre las tensiones del primario y del secundario o un giro de  $180^\circ$ . Esto es posible evitarlo renombrando las fases del secundario o invirtiendo el sentido de referencia en las bobinas.
- En [3] se puede ver como a pesar de la cantidad de conexiones disponibles que hay para los transformadores es suficiente una clasificación de estos en 3 tipos para abarcarlas todas.

### Transformador YNyn (Tipo I)

Mediante simulaciones con PSIM y algún cálculo matemático se llega a la conclusión de que este tipo de conexión no produce cambios entre primario y secundario en valores por unidad, permitiendo que las componentes sean las mismas en ambos lados.

En la figura 3.2 podemos observar el esquema de un transformador con conexión YNyn0 y con él es posible realizar una serie de operaciones matemáticas. Si llamamos  $m$  al cociente entre la tensión del secundario y la tensión del primario del transformador se obtiene que:

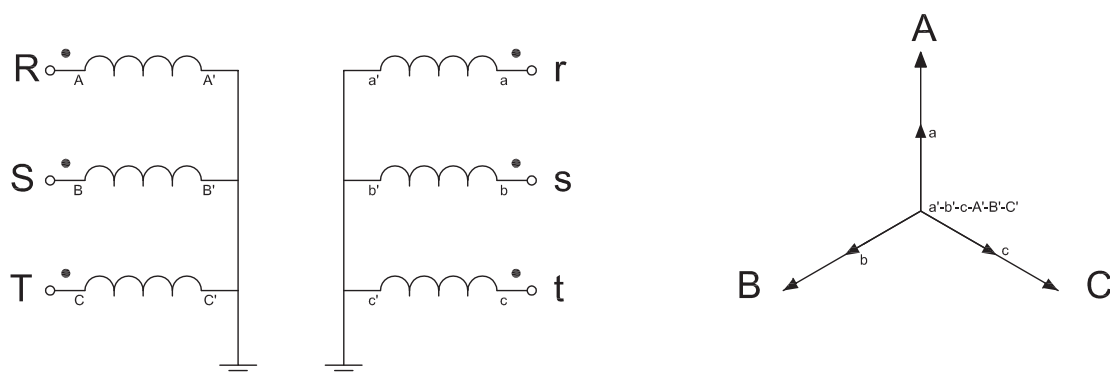


Figura 3.2: Diagrama fasorial de un transformador con conexión YNyn0

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix}$$

Y para obtener las relaciones entre las componentes simétricas de las tensiones del primario y del secundario habría que multiplicar tanto por la transformada de Fortescue como por su inversa y teniendo en cuenta que la matriz de transformación de las tensiones del primario al secundario es la matriz identidad esa multiplicación daría como resultado de nuevo la matriz identidad.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,s} \\ \vec{V}_{1,s} \\ \vec{V}_{2,s} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_{0,p} \\ \vec{V}_{1,p} \\ \vec{V}_{2,p} \end{bmatrix}$$

Resumiendo, este tipo de conexión del transformador no produce ningún cambio en el hueco de tensión. Una simple simulación en PSIM utilizando tres fuentes de corriente alterna todas ellas iguales permite verificar la afirmación anterior.

### Transformador Yyn, YNy, Yy, Dd (Tipo II)

En la figura 3.3 se puede ver el esquema del transformador Yyn0 y al igual que en el anterior, mediante una serie de relaciones matriciales y verificaciones en simulaciones en PSIM se observará qué ocurre con las componentes simétricas.

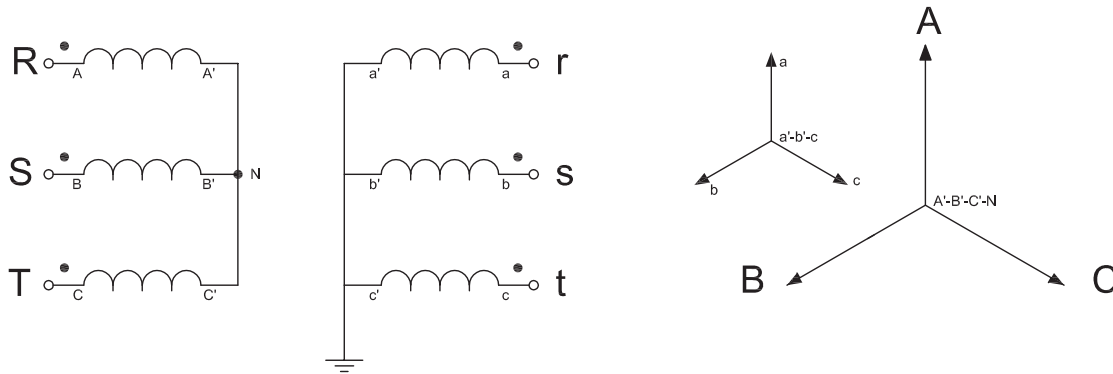


Figura 3.3: Diagrama fasorial de un transformador con conexión Yyn0

Por un lado se tiene una relación entre las tensiones de fase de ambos lados, siendo esta  $\vec{V}_i = m \cdot \vec{V}_{jN}$  con  $i = a, b, c$  y  $j = A, B, C$ .

Y por otro lado se tiene la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{AN} \\ \vec{V}_{BN} \\ \vec{V}_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix}$$

Y realizando operaciones con la transformada de Fortescue se llega a la siguiente conclusión:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,s} \\ \vec{V}_{1,s} \\ \vec{V}_{2,s} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_{0,p} \\ \vec{V}_{1,p} \\ \vec{V}_{2,p} \end{bmatrix}$$

De esta manera se puede observar que la componente homopolar desaparece y las componentes directa e inversa se quedan exactamente como estaban. Por lo tanto este tipo de transformadores únicamente hacen desaparecer la componente homopolar.

### Transformadores Dyn, Dy, YNd, Yd (Tipo III)

En la figura 3.4 podemos ver un diagrama del transformador con conexión Dyn11. Suponiendo que las fases de las tensiones del primario y secundario con nombres idénticos tiene la misma fase (A-A' misma fase que a-a', B-B' misma fase que b-b' y C-C'

misma fase que c-c') es posible sacar el índice horario de ese transformador y lograr una relación entre las tensiones de fase del primario y del secundario.

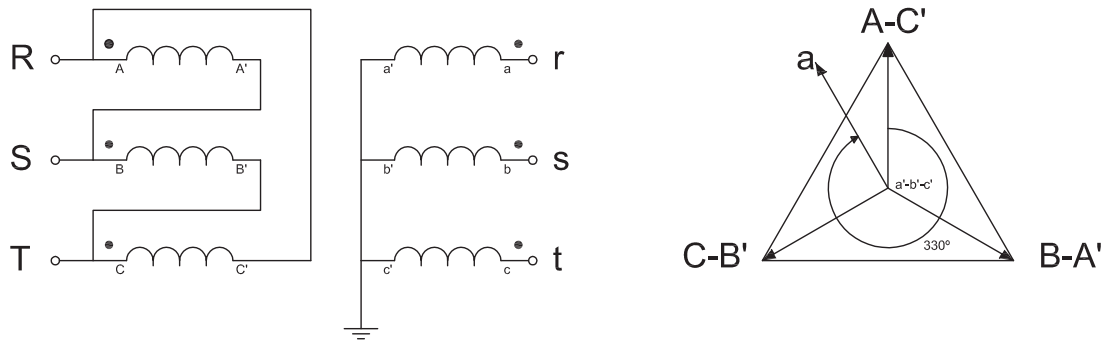


Figura 3.4: Diagrama fasorial de un transformador con conexión Dyn11

En este caso la relación de transformación se saca de la siguiente manera:

$$V_{1L} = V_{1F} \quad ; \quad V_{2L} = \sqrt{3} \cdot V_{2F}$$

$$m_T = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{1F}}{V_{2F}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot m} \quad \text{con} \quad m = \frac{N_2}{N_1}$$

donde  $m$  es el cociente entre el número de espiras del secundario ( $N_2$ ) y el número de espiras del primario ( $N_1$ ).

Y por lo tanto ya podemos sacar una relación entre las tensiones de fase del primario y las del secundario.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix}$$

Utilizando esa matriz de transformación (si multiplicásemos por  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  los módulos de las tensiones secundarias y primarias serían iguales) y la transformada de Fortescue es posible establecer una relación entre las componentes simétricas de las tensiones en el secundario y las tensiones de fase del primario.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,s} \\ \vec{V}_{1,s} \\ \vec{V}_{2,s} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot m \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} m \angle 30 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 \\ -a & -1 & -a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix}$$

Y utilizando la inversa de la transformada de Fortescue se obtiene una relación entre las componentes simétricas de las tensiones del primario y las componentes simétricas de las tensiones del secundario.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,s} \\ \vec{V}_{1,s} \\ \vec{V}_{2,s} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} m \angle 30 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 \\ -a & -1 & -a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_{0,p} \\ \vec{V}_{1,p} \\ \vec{V}_{2,p} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} m \angle 30 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -3a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_{0,p} \\ \vec{V}_{1,p} \\ \vec{V}_{2,p} \end{bmatrix}$$

Resumiendo ese resultado queda lo siguiente:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{0,s} &= 0 \\ \vec{V}_{1,s} &= \sqrt{3} \cdot m \cdot \vec{V}_{1,p} \angle 30 \\ \vec{V}_{2,s} &= \sqrt{3} \cdot m \cdot \vec{V}_{2,p} \angle -30 \end{aligned}$$

Si se analizan los resultados se puede observar que lo importante son las componentes directa (1) e inversa (2) ya que la componente homopolar se anula tras este tipo de transformadores. Además se puede ver que la componente directa del secundario está adelantada  $30^\circ$  respecto de la del primario y lo mismo pasa con la inversa ya que al estar girando en sentido contrario, el retraso de  $30^\circ$  se convierte en adelanto. También vemos como ambas componentes se multiplican por  $\sqrt{3} \cdot m$  al igual que lo hacen las tensiones del transformador.

Por lo tanto en total se va a estudiar la influencia de 3 tipos de transformadores.

### 3.2.2. Propagación del hueco a través de un transformador

En este apartado se verán diferentes simulaciones de PSIM para huecos de tensión a través de un transformador. Es decir, analizaremos el hueco de tensión en el punto II (pcc en este caso) de la figura 3.1 cuando se produce un hueco de tensión en el punto I (donde se produce la falta). En todos los casos se supondrá que  $m = 1$

#### Huecos simétricos o de tipo A

En este apartado únicamente se analizarán los huecos de tipo A, ya que como se explicó en el capítulo anterior, tanto un cortocircuito trifásico como un cortocircuito trifásico a tierra producen un hueco de este tipo.

- Con un transformador de tipo I ya se ha visto que el hueco se queda completamente igual por lo que seguiremos teniendo un hueco tipo A.



- Con un transformador tipo II multiplicamos por delante nuestra matriz de tensiones del hueco simétrico por la matriz de transformación que se ha visto en el apartado de este tipo de transformadores y el resultado es que el hueco sigue siendo de tipo A.
- Con un transformador de tipo III vemos que seguimos teniendo únicamente componente directa por lo que el hueco sigue siendo de tipo A.

### Huecos asimétricos

En este apartado se analizarán los huecos de tipo B (falta monofásica), C (falta fase-fase) y E (falta fase-fase-tierra).

### Hueco de tipo B

- Al someter a un hueco de tipo B a un transformador de tipo I el hueco seguirá siendo de tipo B ya que no cambia ninguna de las componentes.
- Con un transformador de tipo II aplicamos la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y de esa manera:

$$\begin{aligned} \vec{V}_a &= \frac{1}{3} \cdot (2h + 1) \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= \left( \frac{-1}{6} \cdot (2h + 1) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_c &= \left( \frac{-1}{6} \cdot (2h + 1) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \vec{V} \end{aligned}$$

Vemos que el hueco que sale es un hueco parecido al hueco de tipo D. En [3] este hueco es conocido como hueco de tipo D\*.

- Con un transformador de tipo III:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Si se divide todo por  $\sqrt{3} \cdot j$  para que una de las fases se quede con fase 0 y valor  $V$  entonces:

$$\vec{V}_a = -\frac{1}{2} \cdot \vec{V} + \left( \frac{1}{6} + \frac{h}{3} \right) \cdot \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot \vec{V} - \left(\frac{1}{6} + \frac{h}{3}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V}$$

Vemos que el hueco que sale es muy parecido al hueco de tipo C. En [3] este hueco es conocido como hueco de tipo C\*. Renombrando las fases y multiplicando por delante por la matriz de Fortescue podemos sacar las componentes simétricas de este hueco igual que se ha hecho en los otros casos.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{V} - \left(\frac{1}{6} + \frac{h}{3}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{V} + \left(\frac{1}{6} + \frac{h}{3}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\vec{h}+2)}{3} \\ \frac{(1-\vec{h})}{3} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

### Hueco de tipo C

- Con un transformador de tipo I ya se ha visto que el hueco se queda igual por lo que seguirá siendo de tipo C.
- Con un transformador de tipo II aplicamos la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \\ -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y de esa manera:

$$\vec{V}_a = \vec{V}$$

$$\vec{V}_b = \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h\right) \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_c = \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h\right) \cdot \vec{V}$$

El hueco sigue siendo exactamente igual que el hueco que había en el primario, es decir, de tipo C. Ya se ha visto anteriormente que este hueco no tiene componente homopolar.

- Con un transformador de tipo III:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \\ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Si se divide todo por  $-\sqrt{3} \cdot j$  para que una de las fases se quede con fase 0 y valor  $V$  entonces:

$$\vec{V}_a = -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_b = \vec{h} \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$$

Vemos que el hueco que sale, en [3] se denomina hueco de tipo D. Renombrando las fases y multiplicando por delante por la matriz de Fortescue podemos sacar las componentes simétricas al igual que se hizo en los casos anteriores.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{h} \cdot \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\vec{h}+1)}{2} \\ \frac{(\vec{h}-1)}{2} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

### Hueco de tipo E

- Con un transformador de tipo I ya se ha visto que el hueco se queda igual por lo que seguirá siendo de tipo E.
- Con un transformador de tipo II aplicamos la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \\ -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y de esa manera:

$$\vec{V}_a = \frac{1}{3}(2 + h) \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot h \right) \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \cdot \vec{V}$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot h \right) \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \cdot h \cdot \vec{V}$$

Las ecuaciones obtenidas son las correspondientes a un hueco de tipo G que tal y como se esperaba no tiene componente homopolar.

- Con un transformador de tipo III:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} - \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3} \cdot \vec{h} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$



Si se divide todo por  $-\sqrt{3} \cdot j$  para que una de las fases se quede con fase 0 y valor  $V$  entonces:

$$\begin{aligned}\vec{V}_a &= -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= \vec{h} \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_c &= -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V}\end{aligned}$$

Vemos que el hueco que sale, en [3] se denomina hueco de tipo F. Renombrando las fases y multiplicando por delante por la matriz de Fortescue podemos sacar las componentes simétricas al igual que se hizo en los casos anteriores.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{h} \cdot \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(2\vec{h}+1)}{3} \\ \frac{(\vec{h}-1)}{3} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

### 3.2.3. Propagación del hueco a través de dos transformadores

Ya se ha visto en la sección anterior como cambian los huecos de tensión al pasar por un transformador pero en el presente proyecto las simulaciones se harán en un circuito que presenta dos transformadores (de 690V a 20kV y de 20kV a 132kV) por lo que habrá que analizar la influencia del segundo transformador en los huecos C\*, D y F ya que los demás huecos ya han sido analizados y para este proyecto interesa conocer como cambian los huecos al pasar por un transformador de tipo III.

#### Hueco de tipo C\*

La influencia de los diferentes transformadores para este tipo de hueco es la misma que para un hueco de tipo C. Al pasar por los transformadores de tipos I y II no habrá cambio y seguirá siendo de tipo C\*. Y al pasar a través del transformador de tipo III se convertirá en un hueco de tipo D\*.

#### Hueco de tipo D

- Con un transformador de tipo I ya se ha visto que el hueco se queda igual por lo que seguirá siendo de tipo D.
- Con un transformador de tipo II aplicamos la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \\ -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y de esa manera:

$$\begin{aligned}\vec{V}_a &= h \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= \left( -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \right) \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_c &= \left( -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \right) \cdot \vec{V}\end{aligned}$$

Las ecuaciones obtenidas son las correspondientes a un hueco de tipo D que tal y como se esperaba no tiene componente homopolar.

- Con un transformador de tipo III:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{h} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Si se divide todo por  $-\sqrt{3} \cdot j$  para que una de las fases se quede con fase 0 y valor  $V$  entonces:

$$\begin{aligned}\vec{V}_a &= \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \right) \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= \vec{V} \\ \vec{V}_c &= \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \right) \cdot \vec{V}\end{aligned}$$

Vemos que el hueco que sale es un hueco de tipo C.

## Hueco de tipo F

- Con un transformador de tipo I ya se ha visto que el hueco se queda igual por lo que seguirá siendo de tipo F.
- Con un transformador de tipo II aplicamos la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot j \\ -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot j \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Y de esa manera:

$$\begin{aligned}\vec{V}_a &= h \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V}\end{aligned}$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot j \cdot \vec{V}$$

Las ecuaciones obtenidas son las correspondientes a un hueco de tipo F que tal y como se esperaba no tiene componente homopolar.

- Con un transformador de tipo III:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{h} \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \\ -\frac{1}{2} \cdot \vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{(2+\vec{h})}{\sqrt{12}} \cdot j \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

Si se divide todo por  $-\sqrt{3} \cdot j$  para que una de las fases se quede con fase 0 y valor  $V$  entonces:

$$\begin{aligned} \vec{V}_a &= -\frac{\vec{h}+2}{6} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \vec{h} \cdot j \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_b &= \frac{\vec{h}+2}{3} \cdot \vec{V} \\ \vec{V}_c &= -\frac{\vec{h}+2}{6} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \vec{h} \cdot j \cdot \vec{V} \end{aligned}$$

Vemos que el hueco que sale, en [3] se denomina hueco de tipo G. Renombrando las fases y multiplicando por delante por la matriz de Fortescue podemos sacar las componentes simétricas al igual que se hizo en los casos anteriores.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\vec{h}+2}{3} \cdot \vec{V} \\ -\frac{\vec{h}+2}{6} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \vec{h} \cdot j \cdot \vec{V} \\ -\frac{\vec{h}+2}{6} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \vec{h} \cdot j \cdot \vec{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(2\vec{h}+1)}{3} \\ \frac{(1-\vec{h})}{3} \end{bmatrix} \cdot \vec{V}$$

### 3.2.4. Resumen

En la tabla 3.1 se pueden ver como son los huecos en el secundario del transformador conociéndolos en el primario.

Transformador	Hueco en el primario del transformador						
	A	B	C	D	E	F	G
<b>Tipo I (YNyn)</b>	A	B	C	D	E	F	G
<b>Tipo II (YNy, Yyn, Yy, Dd)</b>	A	D*	C	D	G	F	G
<b>Tipo III (Dyn, Dy, YNd, Yd)</b>	A	C*	D	C	F	G	F

Cuadro 3.1: Transferencia de huecos a través de transformadores

Viendo el resumen de la tabla es posible sacar unas cuantas conclusiones:

- El hueco que se genera al pasar por un transformador tipo II es el mismo que se genera al pasar dos veces por transformadores tipo III.
- Cuando un hueco de tensión pasa a través de un transformador tipo II ó III la componente homopolar se anula. De hecho el hueco de tipo G es necesario nombrarlo de este modo porque al pasar un hueco F a través de un transformador de tipo III el hueco que se genera es un hueco de tipo E pero sin componente homopolar, es decir, uno de tipo G. Por lo tanto, y a no ser que la falta se produzca en la misma torre del aerogenerador y esta falta sea monofásica o bifásica a tierra (que ocurra una falta en la torre es muy improbable), no habrá que tener en cuenta la componente homopolar al analizar el efecto de los huecos de tensión en el aerogenerador.
- El transformador de tipo III, que será el que se utilice en este proyecto, no varía la magnitud de las componentes directa e inversa pero sí elimina la componente homopolar.

Por lo tanto dado que para huecos asimétricos (para simétricos también se puede) se van a analizar las influencias de las componentes simétricas, parece que los únicos elementos a tener en cuenta van a ser los desfases originados por los transformadores y la influencia de sus impedancias.

### 3.3. Impedancias del transformador

A la hora de analizar un transformador este se reduce a un circuito equivalente que consta de las resistencias de los devanados primario y secundario, las inductancias de fugas y el circuito de magnetización tal y como se muestra en la figura 3.5. En este apartado se tratará de analizar la influencia de estas impedancias en los huecos de tensión.

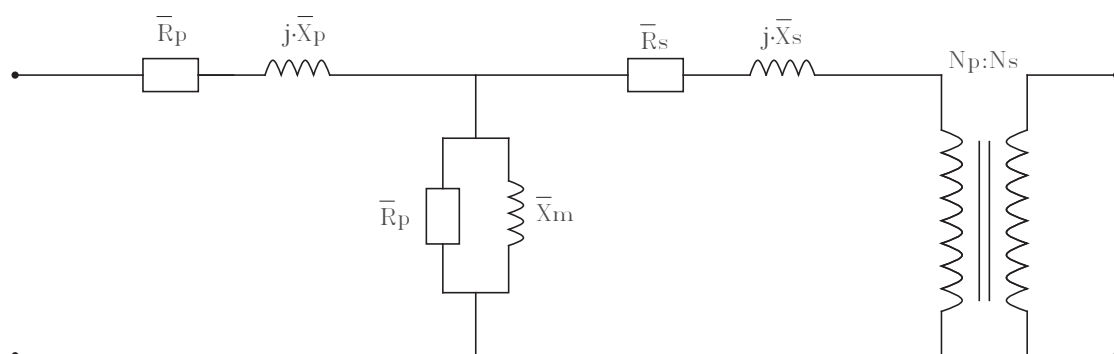


Figura 3.5: Circuito equivalente de un transformador con todas las impedancias en el primario

### 3.3.1. Inductancia de magnetización

#### Huecos simétricos

Para ver la influencia de esta impedancia en la propagación del hueco de tensión se utilizarán dos circuitos diferentes. En el primero de ellos habrá una red de  $20kV$  con una impedancia de red de  $0,01H$ . Después estará el transformador de  $20000/690V$  que se suele situar dentro de la torre y por último el aerogenerador. Para crear el hueco de tensión se utilizará una impedancia de falta de  $0,01H$  de tal manera que no haya cambio de fase en el hueco de tensión y se generará en el lado de alta del transformador. Un esquema de este primer circuito se puede ver en la figura 3.6.

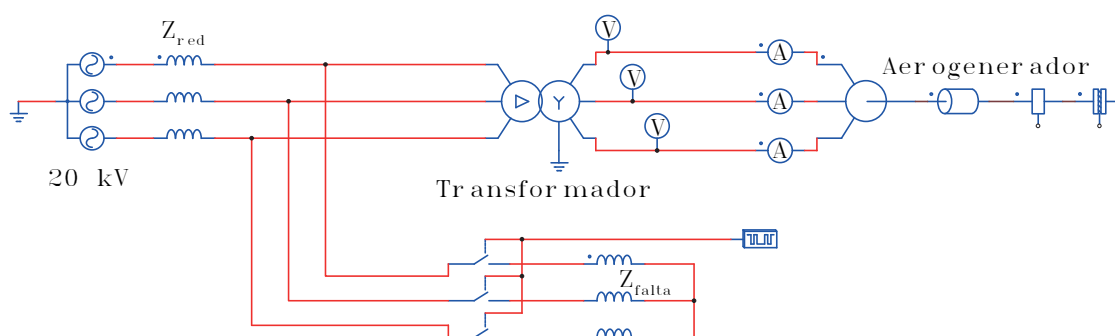


Figura 3.6: Circuito de hueco trifásico con un transformador, en PSIM

El segundo circuito será el equivalente al primero suponiendo que la impedancia de magnetización no existe. En la figura 3.7 se puede ver como sería el transformador sin circuito de magnetización y con las impedancias de fugas pasadas al secundario.

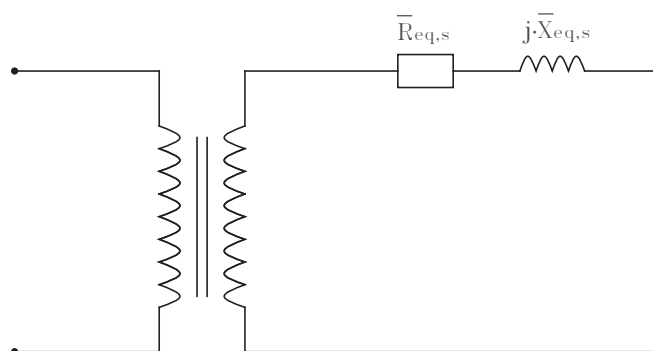


Figura 3.7: Circuito equivalente de un transformador despreciando la impedancia de magnetización y con las impedancias de fugas en el secundario

Así, se tendrá una red de  $690V$  y un ángulo inicial para la fase  $a$  de  $30^\circ$  con una impedancia de red de  $1,19025 \cdot 10^{-5}H$ . Después se pondrán las impedancias de fugas totales del transformador pasadas al secundario en serie con la impedancia de red. El hueco se generará de la misma manera que en el caso anterior pero en este circuito el valor de la impedancia de falta será de  $1,19025 \cdot 10^{-5}H$  de tal manera que la magnitud



del hueco generado sea igual en ambos circuitos. Un esquema de este segundo circuito se puede ver en la figura 3.8.

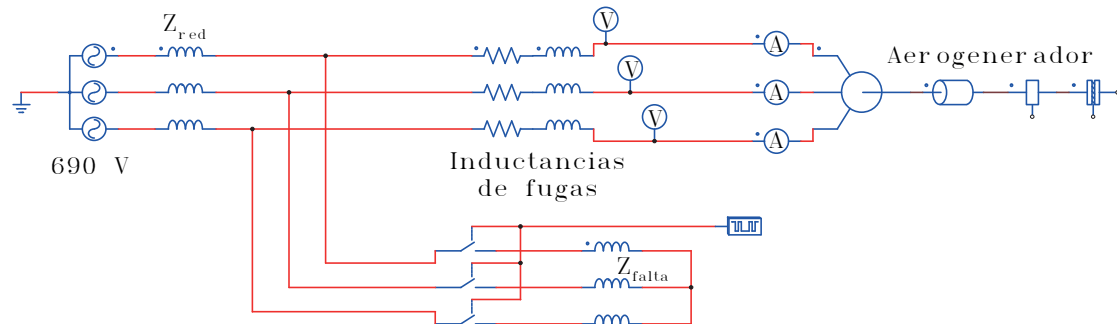


Figura 3.8: Circuito de hueco trifásico con las inductancias de fugas del transformador, en PSIM

Para que este procedimiento sea válido el único hueco de tensión que se puede utilizar es el hueco trifásico o de tipo A ya que es el único que no varía al pasar por el transformador y por lo tanto el único que se puede crear de la misma manera tanto en el primer circuito como en el segundo.

Para comparar los resultados de ambos circuitos se utilizarán las corrientes que llegan al estátor del aerogenerador ya que las tensiones es obvio que van a ser las mismas debido a que ambos huecos generados son del 50 %.

Más adelante se utilizará un método para sacar las componentes simétricas de los huecos bifásicos y monofásico con el fin de ver las influencias de la impedancia de magnetización en la propagación de esos huecos.

### Huecos asimétricos

Para los huecos asimétricos hay un problema y es que crear los huecos que aparecen cuando un hueco asimétrico pasa a través de un transformador no es sencillo. Es decir, si en el primero de los circuitos se genera un hueco bifásico o de tipo C, al pasar por el transformador se convertirá en un hueco de tipo D. Y ese hueco habrá que generarlo en el segundo circuito para poder comparar los resultados y poder ver la influencia de la impedancia de magnetización en la propagación del hueco.

Para solucionar ese problema se trabajará con componentes simétricas y de ese modo, los huecos que se tienen después de los transformadores se podrán generar mediante su componente directa, inversa y homopolar (en realidad esta última componente ya se ha visto antes que se anula al pasar por el transformador estrella-triángulo).

La obtención de las componentes simétricas de los huecos se hará de la siguiente manera:

El método de obtención de las componentes simétricas se basa en la transformación mediante la matriz de Fortescue pero esa transformación no está disponible en la librería

de PSIM. Así pues será menester utilizar otro tipo de transformación para lograr el objetivo deseado.

En este caso la transformación utilizada será la transformación de Park. Esta transformación reemplaza las variables asociadas a un sistema trifásico estático  $abc$  y las asocia a un sistema bifásico rotatorio  $dq$  (ver figura 3.9) cuya velocidad de rotación dependerá del ángulo con el que se realice la transformación (se puede por lo tanto hacer que este sistema no gire). Por lo tanto, la tensión pasará a tener dos componentes,  $d$  y  $q$ . Como cualquier otro sistema, el sistema  $dq0$  también se puede descomponer en sus componentes simétricas y para lograr esas componentes mediante una simulación habrá que utilizar un ángulo de transformación equivalente al de la velocidad de sincronismo para la componente directa, y un ángulo opuesto al equivalente al de la velocidad de sincronismo para la componente inversa.

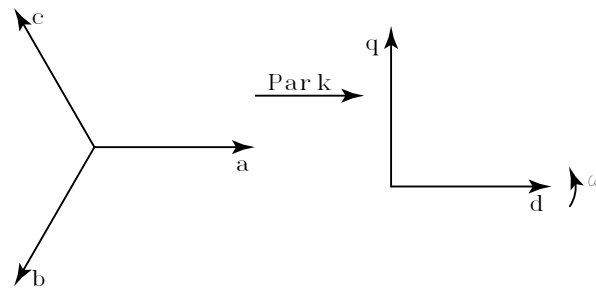


Figura 3.9: Transformación de Park

Para entender lo anterior hay que tener en cuenta los sentidos y velocidades de giro tanto del sistema  $dq0$  como de las secuencia directa e inversa.

- Utilizando un ángulo de transformación equivalente al de la velocidad de sincronismo se logra que el sistema  $dq0$  gire a esa velocidad y en el mismo sentido que gira la secuencia directa ya que esta secuencia tiene un orden de fase  $A \rightarrow B \rightarrow C$ . Por lo tanto, los valores de las proyecciones de la componente directa de la tensión en los ejes  $dq$  serán constantes. Por otro lado, dado que la secuencia inversa tiene un orden de fases invertido y por lo tanto gira a la misma velocidad pero en sentido opuesto esta secuencia se verá como un rizado a 100 Hz (50 Hz por la velocidad a la que gira el sistema  $dq0$  y otros 50 Hz porque la secuencia gira a la velocidad de sincronismo en dirección opuesta al sistema  $dq0$ ).
- Utilizando un ángulo de transformación opuesto al de la velocidad de sincronismo se logra que el sistema  $dq0$  gire a esa velocidad y en el mismo sentido que la secuencia inversa. En este caso entonces los valores que se verán constantes serán los de las proyecciones de la componente inversa de la tensión mientras que la secuencia directa se verá como un rizado a 100 Hz, es decir, exactamente lo opuesto al caso anterior.

Una vez se obtiene eso el siguiente paso es quitar esos rizados para poder trabajar

con las componentes  $d$  y  $q$  de las secuencias directa e inversa. Para ello se utiliza un filtro rechazo de banda que eliminará los rizados de 100 Hz.

Así pues, nos quedan las siguientes señales:  $V_{d,directa}$ ,  $V_{q,directa}$ ,  $V_{d,inversa}$ ,  $V_{q,inversa}$ . Cuando se utiliza la transformación de Park, los ejes  $d$  y  $q$  forman un ángulo de  $90^\circ$ . De ese modo, todo vector en ese sistema consta de su proyección en el eje  $d$  y su proyección en el eje  $q$ , que cambiándolas de lugar forman un triángulo rectángulo donde las proyecciones son los catetos y el vector la hipotenusa. Y es así como se logra el valor del módulo tanto de la componente directa como de la inversa, mediante el teorema de Pitágoras ( $cateto_1^2 + cateto_2^2 = hipotenusa^2$ ). En nuestro caso:

$$V_{d,directa}^2 + V_{q,directa}^2 = V_{directa}^2$$

$$V_{d,inversa}^2 + V_{q,inversa}^2 = V_{inversa}^2$$

Como último dato hay que tener en cuenta que la transformación de Park viene multiplicado por un coeficiente que varía dependiendo de las variables que se quieran estudiar. En este caso y dado que las variables que nos interesan son las tensiones, el coeficiente que las hace invariantes es  $2/3$ , coeficiente que se utiliza en el convenio americano y que es el mismo que utiliza PSIM.

En la figura 3.10 se puede ver un esquema del circuito utilizado para calcular los valores de los módulos de las secuencias directa e inversa de los huecos de tensión.

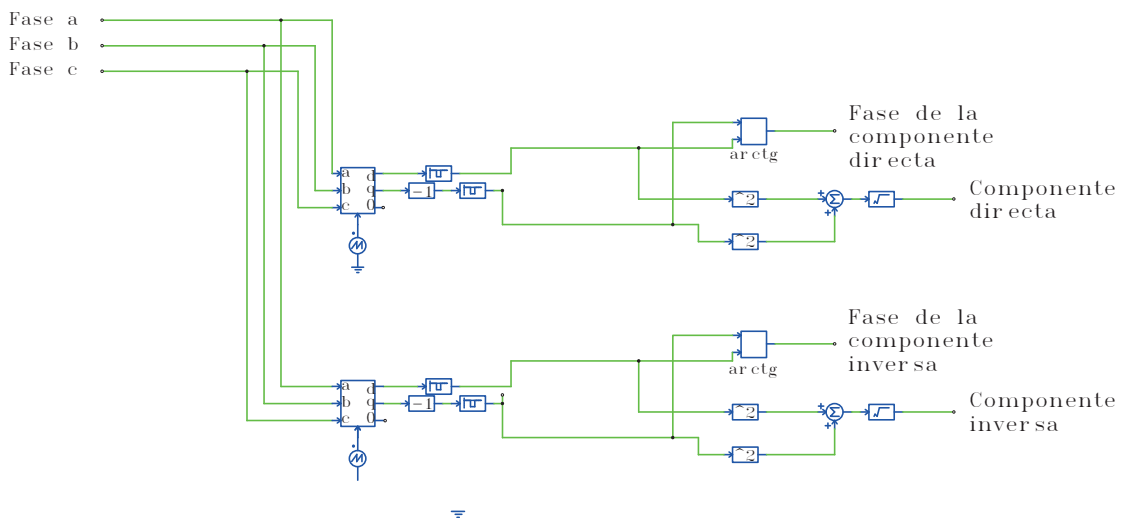


Figura 3.10: Circuito utilizado para obtener las componentes simétricas en PSIM

Y en la figura 3.11 se pueden ver las intensidades de la fase  $a$  que ve el aerogenerador para un hueco bifásico del 10 % y comprendido entre 0.5 y 1 segundos. Son prácticamente iguales por lo que se deduce que la inductancia de magnetización no influye en la propagación de los huecos de tensión.

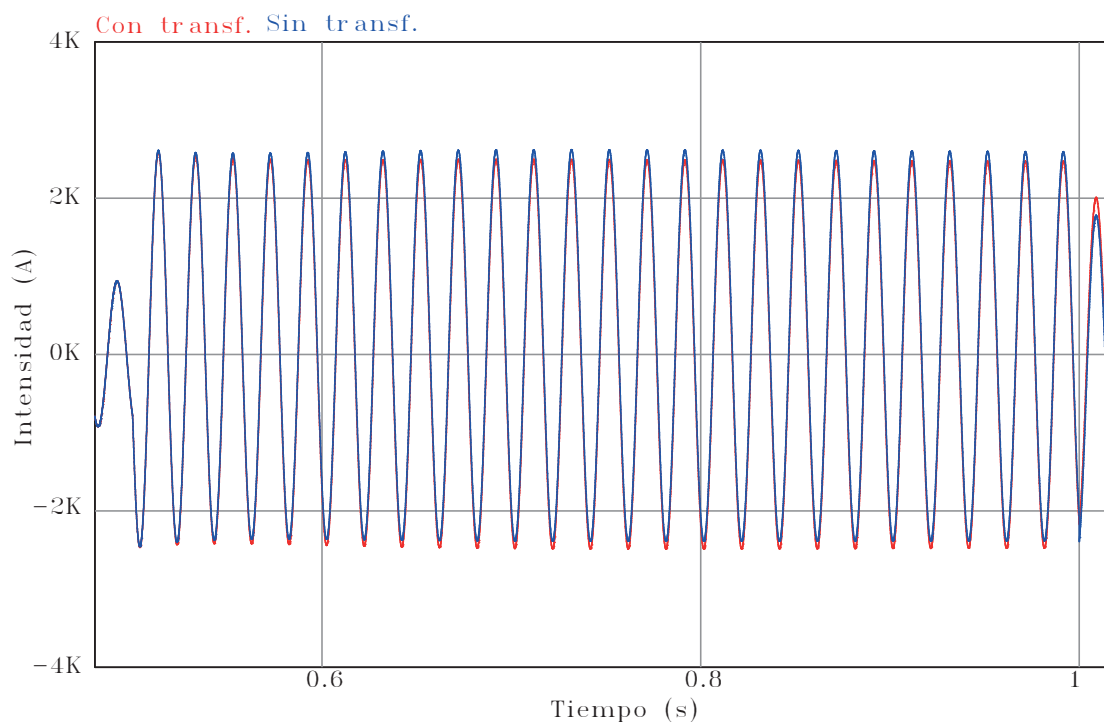


Figura 3.11: Intensidades de la fase  $a$  para un hueco bifásico con  $h=0.1$  pu y comprendido entre  $t=0.5$  y 1 segundos

### 3.3.2. Resistencias de los devanados e inductancias de fugas

En el anterior apartado se ha visto que la influencia del transformador en un hueco de tensión se debe únicamente a las resistencias de sus devanados y a las inductancias de fugas. En el caso de nuestro transformador de 20kV/690V la impedancia de cortocircuito es del 6% y en el de 132kV/20kV esa impedancia está entre el 10 y el 15%. Tanto en el primer como en el segundo caso esas impedancias hacen que la corriente que llega a la máquina sea algo menor que si no estuviesen. A su vez, tampoco se pueden aumentar mucho para que la relación de tensiones del transformador sea la correcta y para que la pérdida de potencia no aumente (habría que aumentarlas mucho para que la pérdida de potencia fuese significativa). En el caso del transformador de la torre la diferencia entre tener esas impedancias de fugas o no tenerlas para el hueco de tensión bifásico analizado en la figura 3.11 es de una diferencia de corriente de 0.34 pu para una intensidad base de 997 A, es decir, un tercio.

En el caso de los transformadores la impedancia de fugas es muy inductiva. Por poner un ejemplo, en el caso del transformador de la torre utilizado en las simulaciones de este proyecto la relación entre la resistencia de los devanados y las inductancias de fugas es  $r/x = 0,033$ . Y para el transformador de alta  $r/x = 0,083$ . En ambos casos se puede ver la gran diferencia.

Resumiendo, si tener un transformador durante un hueco de tensión viene a ser como tener sus impedancias de fugas en serie con la máquina, lo que se puede hacer es sumar

esas impedancias al estátor de la máquina. Más adelante se verá que efectivamente los resultados son los mismos. Por lo tanto tener un transformador tras un hueco de tensión será como aumentar la impedancia de los devanados del estátor.

### 3.4. Clasificación de los huecos de tensión

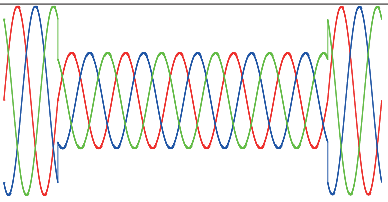
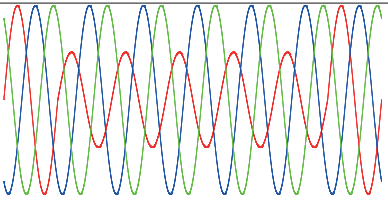
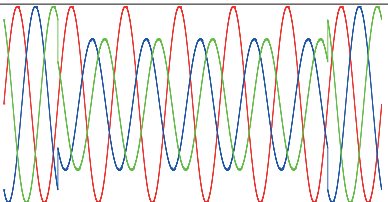
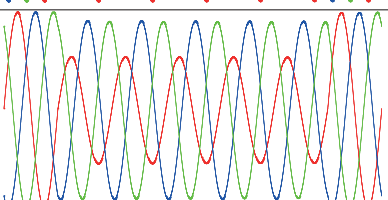
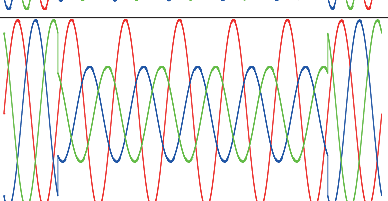
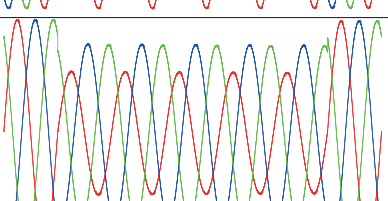
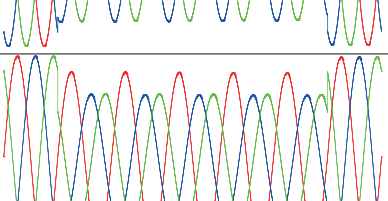
En [3] Math H.J. Bollen definió 7 tipos de huecos distintos dependiendo de la falta producida, de la conexión de la carga y de su posible transmisión mediante transformadores a otros niveles de tensión. En este proyecto la conexión de la carga se ha supuesto en estrella pero los 7 tipos de huecos de tensión son los mismos.

Estos huecos se pueden representar tanto de forma fasorial (ver tabla 3.2) como de forma temporal (ver tabla 3.3).



Expresión fasorial de los huecos de tensión			
Tipo de hueco	Causa	Tensión de fase	Fasor
A	Falta trifásica	$\vec{V}_a = \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
B	Falta monofásica	$\vec{V}_a = \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{V}$	
C	Falta bifásica	$\vec{V}_a = \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
D	Falta bifásica tras un transformador	$\vec{V}_a = \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
E	Falta bifásica a tierra	$\vec{V}_a = \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
F	Falta bifásica a tierra tras un transformador	$\vec{V}_a = \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} - \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\vec{h}\right) \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}\vec{h} \cdot \vec{V} + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\vec{h}\right) \sqrt{3} \cdot j \cdot \vec{V}$	
G	Falta bifásica a tierra tras dos transformadores	$\vec{V}_a = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\vec{h}\right) \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\vec{h}\right) \vec{V} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	
		$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\vec{h}\right) \vec{V} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot \vec{h} \cdot \vec{V}$	

Cuadro 3.2: Tipos de huecos de tensión según el tipo de falta y su paso a través de transformadores en su expresión fasorial

Hueco	Tensión de fase	Diagrama
A	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \frac{2\pi}{3})$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \frac{2\pi}{3})$	
B	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \frac{2\pi}{3})$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \frac{2\pi}{3})$	
C	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{1+3h^2}}{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \arctan(h\sqrt{3}) - \pi)$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{1+3h^2}}{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \arctan(h\sqrt{3}) + \pi)$	
D	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \arctan(\frac{\sqrt{3}}{h}) - \pi)$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \arctan(\frac{\sqrt{3}}{h}) + \pi)$	
E	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \frac{2\pi}{3})$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \frac{2\pi}{3})$	
F	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \arctan(\frac{\sqrt{3}(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}h)}{h})\pi)$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \arctan(\frac{\sqrt{3}(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}h)}{h}) + \pi)$	
G	$v_a(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{2+h}{3} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a)$	
	$v_b(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{7h^2+h+1}}{3} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a + \arctan(\frac{3h\sqrt{3}}{2+h}) - \pi)$	
	$v_c(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{7h^2+h+1}}{3} \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi_a - \arctan(\frac{3h\sqrt{3}}{2+h}) + \pi)$	

Cuadro 3.3: Tipos de huecos de tensión según el tipo de falta y su paso a través de transformadores en su expresión temporal

Partiendo de esas expresiones fasoriales y utilizando la ecuación 2.2 se consiguen las componentes simétricas dando lugar a la siguiente tabla (figura 3.4):

Tipo de hueco	Componente directa	Componente inversa	Componente homopolar
A	$\vec{V}_1 = \vec{h} \cdot \vec{V}$	$\vec{V}_2 = 0$	$\vec{V}_0 = 0$
B	$\vec{V}_1 = \frac{\vec{h}+2}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{\vec{h}-1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = \frac{\vec{h}-1}{3}\vec{V}$
C*	$\vec{V}_1 = \frac{\vec{h}+2}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{1-\vec{h}}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$
D*	$\vec{V}_1 = \frac{\vec{h}+2}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{\vec{h}-1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$
C	$\vec{V}_1 = \frac{\vec{h}+1}{2}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{1-\vec{h}}{2}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$
D	$\vec{V}_1 = \frac{\vec{h}+1}{2}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{\vec{h}-1}{2}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$
E	$\vec{V}_1 = \frac{2\vec{h}+1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{1-\vec{h}}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = \frac{1-\vec{h}}{3}\vec{V}$
F	$\vec{V}_1 = \frac{2\vec{h}+1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{\vec{h}-1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$
G	$\vec{V}_1 = \frac{2\vec{h}+1}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_2 = \frac{1-\vec{h}}{3}\vec{V}$	$\vec{V}_0 = 0$

Cuadro 3.4: Componentes simétricas de los diferentes tipos de huecos de tensión

En la tabla 3.4 se pueden observar varios detalles:

- El hueco de tipo A es el único hueco que no tiene componente inversa y por lo tanto no creará rizados de par en el aerogenerador.
- Los huecos de tipo B y E son los únicos tipos de huecos que tienen componente homopolar. Así pues, la única opción de que la componente homopolar llegue al



aerogenerador es que el hueco se produzca prácticamente en bornes de este ya que esa componente se anula al pasar por el transformador triángulo - estrella.

- El hueco de tipo G es exactamente igual que el hueco de tipo E excepto por el hecho de que no tiene componente homopolar.





## Capítulo 4

# Propagación de los huecos de tensión a través de las impedancias de las líneas

### 4.1. Introducción

Se ha comentado que el origen de los huecos de tensión puede ser muy lejano respecto del punto de conexión común (pcc) y desde su creación hasta su llegada a él, el soporte físico por el que viajan son las líneas. Esas líneas de algún modo influirán en la propagación y en la creación del hueco, tal y como se verá a continuación.

### 4.2. Influencia en la tensión residual del hueco

En la figura 4.1 vemos un esquema general para ver la influencia de las impedancias de línea.

La impedancia de red  $\vec{Z}_s$  es la impedancia de Thevenin de todos los elementos existentes entre el pcc y la red de transporte. Está formada por las impedancias del generador o generadores equivalentes de la red de transporte, más las de las líneas y los transformadores (estos últimos estarán representados mediante sus impedancias de fugas, ya que se ha visto en el capítulo anterior que son las que influyen en el hueco). Esta impedancia se denomina impedancia de cortocircuito de la red y es conocida por los operadores de las redes eléctricas para cualquier nodo de la red. Si se analiza bien la fórmula de la profundidad del hueco se ve que es esta impedancia la causante del hueco de tensión ya que si fuese nula el hueco tendría una profundidad de 0, es decir, la tensión residual sería la misma que si no hubiese hueco. Por otro lado también se verá más adelante que esta impedancia es fuertemente inductiva ya que abarca las impedancias de fugas de los transformadores (impedancias más inductivas que resistivas) y de las líneas aéreas de transporte eléctrico (más inductivas que resistivas).

La impedancia de falta  $\vec{Z}_f$  representa los elementos entre el pcc y la falta. En este caso como en el anterior esto incluye las impedancias de línea entre el pcc y el origen

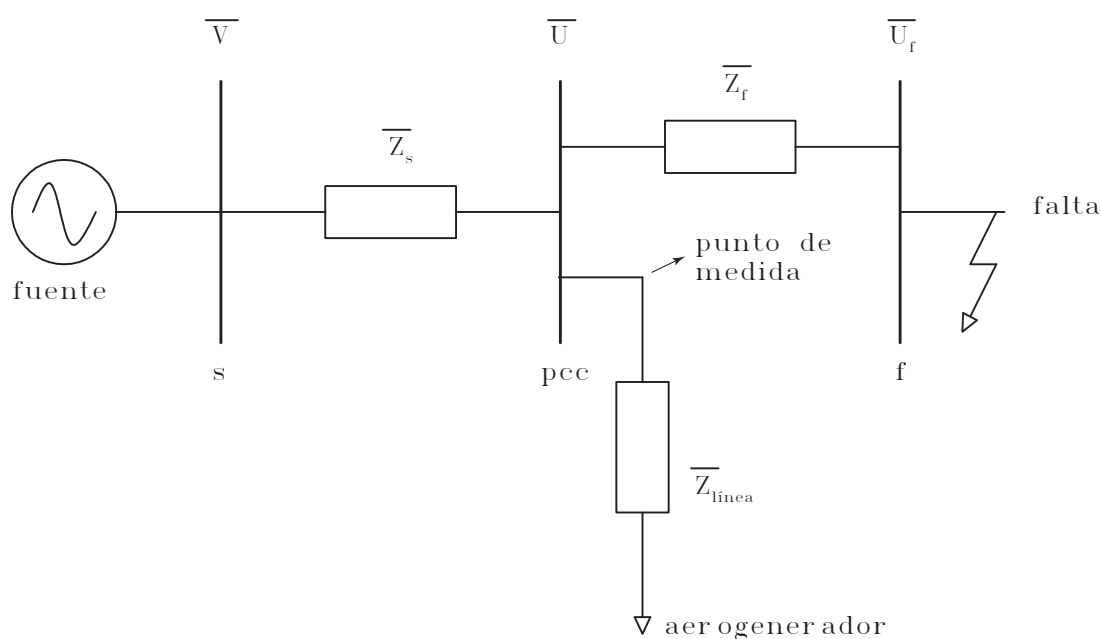


Figura 4.1: Esquema para ver la influencia de las líneas en la creación del hueco y en la propagación de este hasta el aerogenerador

de la falta y de los transformadores. Además hay que tener en cuenta la impedancia de cortocircuito (no confundir con la impedancia de cortocircuito de la red), que suele ser bastante resistiva tal y como pone en [12].

Obviamente estas impedancias no serán las mismas independientemente de dónde se produzca la falta y por ello es importante saber qué tipo de líneas hay en cada parte del parque eólico. De ese modo se podrá lograr una mejor comprensión de por qué algunos huecos son más severos que otros si se crean en una u otra línea.

Las líneas pueden ser de diferente tipo (subterránea o aérea) y de diferente nivel de tensión (transporte o distribución) pero en general todas ellas se componen de resistencia, inductancia y capacitancia aunque la parte capacitiva se desprecia debido al mínimo efecto que tiene en las corrientes resultantes de las faltas. La resistencia depende de la sección del cable y del material que se utiliza (el cobre es un excelente conductor y tiene baja resistividad al paso de la corriente) mientras que la inductancia depende de las características del conductor y del espacio entre conductores. En general, cuanto mayor es la tensión de la línea mayor es el ratio  $\frac{X}{R}$ . Por lo tanto para líneas de transporte la impedancia de línea es prácticamente inductiva, pero no así para líneas de distribución.

Cuanto más lejana sea la falta del punto de conexión común (punto de medida donde se quiere ver la tensión residual del hueco de tensión) mayor será la tensión residual que tendrá el hueco de tensión. De hecho en [3] la impedancia de falta se expresa como  $\bar{Z}_f = z \cdot L$  de tal manera que  $z$  es la impedancia de falta por unidad de longitud y  $L$  la distancia entre la falta y el punto de conexión común. De ese modo la expresión de la tensión residual se queda como:

$$h = \frac{z \cdot L}{Z_s + z \cdot L}$$

En esa ecuación se puede ver que si la distancia  $L$  fuese nula la tensión residual también lo sería por lo que a mayor distancia mayor tensión residual habrá y por lo tanto para el aerogenerador es mucho mejor que el hueco se genere lo más lejos posible del pcc.

Por otro lado la impedancia  $z$  de las líneas de transporte también es mayor que las de las líneas de distribución y cuanto mayor sea  $z$  para una misma distancia también es mayor la tensión residual.

### 4.2.1. Aparición de transitorios

Las impedancias de línea que forman parte de las impedancias de red y de falta influyen en el desfase que se puede crear al originarse el hueco de tensión. Por lo tanto, siendo la tensión residual  $\vec{h} = \frac{\vec{Z}_f}{\vec{Z}_s + \vec{Z}_f}$ , dependiendo de los argumentos de las impedancias de red y de falta  $\vec{h}$  también variará su argumento. Es importante notar que en caso de que la impedancia de red fuese nula no habría hueco de tensión por lo que se intenta que el valor de esa impedancia sea el menor posible.

La expresión para el argumento de la tensión residual sería:

$$\varphi_h = \arctan \frac{X_f}{R_f} - \arctan \frac{X_s + X_f}{R_s + R_f}$$

Normalmente la impedancia de red es mayor o igual de inductiva que la impedancia de falta y ambas suelen ser más inductivas que resistivas. En caso de existir partes resistiva se obtiene un circuito RL. Como todo circuito RL este se comportará de manera que al principio serán las inductancias las que trabajen para impedir el paso de la corriente creando así un transitorio. De ese modo la tensión residual del hueco durante ese transitorio será:

$$h_{inicial} = \frac{X_f}{X_s + X_f}$$

En la figura 4.2 se puede ver un hueco de tensión trifásico en el que hay un transitorio con una tensión residual inicial de 0.1 pu. De hecho es el único momento en el que hay hueco de tensión porque después la tensión residual aumenta hasta 0.93 pu, que por definición no se consideraría hueco de tensión. Estos transitorios no se han estudiado en este proyecto porque siempre será más dañino un hueco de 0.1 pu durante un tiempo  $\Delta t$  que un hueco de 0.4 pu con un transitorio de 0.1 pu.

El peor caso se daría para una impedancia de falta puramente resistiva ya que al comienzo del hueco la tensión residual sería nula. Tras un breve instante de tiempo la



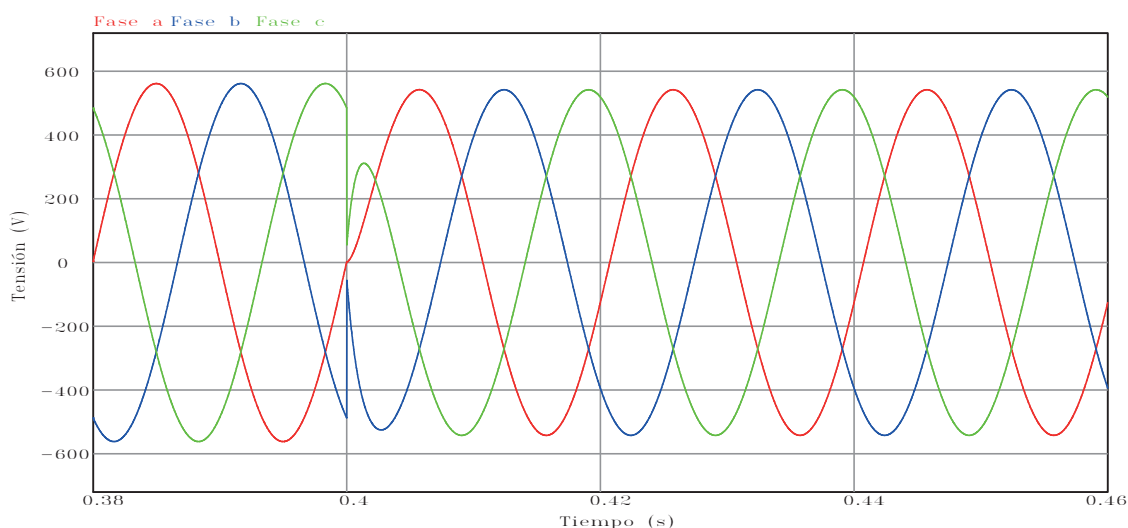


Figura 4.2: Hueco trifásico con una tensión residual inicial de 0.1pu y una tensión residual final de 0.93pu

tensión residual cogería un valor permanente mayor que el que hay al comienzo del hueco por lo que en general, un hueco de tensión residual nula (en realidad sería una interrupción) será peor que un hueco con el peor transitorio y por lo tanto como ya se ha comentado antes no es necesario analizar este último como objetivo de este proyecto. De todos modos el hueco se propagaría igual con transitorio que sin él ya que lo único que hace es cambiar la forma de las tensiones de fase durante el comienzo del hueco.

### 4.3. Influencia de las impedancias de línea durante la propagación

En la figura 4.1 se ha dibujado una impedancia de línea entre el pcc y el aerogenerador llamada  $\vec{Z}_{linea}$ . En realidad esa impedancia no coge únicamente las líneas pero para la siguiente explicación es suficiente con eso.

Lo importante de esa impedancia de línea en cuanto a la propagación del hueco es que cuanto mayor sea más reducirá las corrientes que verá el aerogenerador. De ese modo esta impedancia no influye en la tensión residual del hueco pero sí en la influencia que ese hueco tendrá en el aerogenerador. Cuanto más lejos esté el pcc del aerogenerador mejor para este último por lo que una vez más es menos severo un hueco creado en la línea de transporte que en la de distribución.

## Capítulo 5

# Simulación en un parque eólico

### 5.1. Introducción

En los capítulos anteriores se han visto los diferentes huecos de tensión según su origen y al pasar a través de uno o varios transformadores. En este capítulo se verán esas propagaciones mediante simulaciones y se compararán los resultados.

Las tensiones que llegan al aerogenerador en condiciones normales también se componen de una componente directa, inversa y homopolar. Pero si todo funciona correctamente, que es lo habitual, la única componente no nula es la directa. Al aparecer un hueco de tensión esa componente directa disminuye y las componentes inversa y homopolar dejan de ser nulas dependiendo del hueco de tensión. Por lo tanto, a la hora de estudiar la propagación del hueco una manera de hacerlo es ver cómo esas componentes se propagan hasta llegar al aerogenerador.

### 5.2. Estructura de un parque eólico

Las conexiones dentro de los parques dependen de diferentes factores ya que dependiendo de las características de los aerogeneradores y de las peticiones del cliente habrá diferencias entre parques. De todos modos habitualmente la conexión a grandes escalas suele ser similar. Cada torre suele contener tanto al aerogenerador como al transformador de media tensión, que de no estar en la propia torre está al lado de ella. Por lo tanto se tiene un transformador por cada torre. Si seguimos los cables que salen de cada torre llegará un momento en el que se juntan y después está el transformador de alta que aumenta el rango de tensión a la tensión de transporte. Los huecos de tensión más lejanos al aerogenerador que se simularán en el presente proyecto se producirán en la línea de transporte por lo que hasta aquí es hasta donde llegará el parque eólico a estudiar.

Por lo tanto, el esquema básico de un parque eólico podría ser el de la figura 5.1.



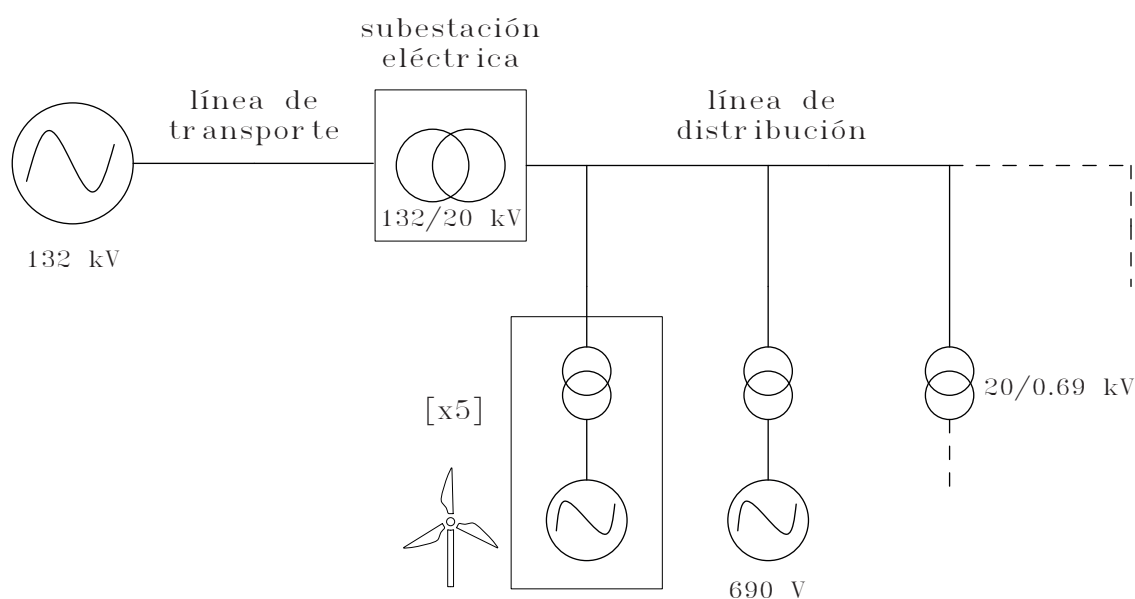


Figura 5.1: Esquema de un parque eólico de 5 aerogeneradores y los transformadores que en él hay

En este proyecto se trata de ver la propagación de los huecos a través del parque y por lo tanto lo importante son tanto la influencia de los transformadores como de las impedancias de los cables. Para que las simulaciones sean lo más realistas posibles los transformadores utilizados tienen las mismas características y conexiones que los transformadores utilizados realmente. Para ello se contactó con la empresa ABB <sup>1</sup>, la cual facilitó datos de ensayos de vacío y cortocircuito con el fin de lograr los valores necesarios para la simulación.

Por otro lado está el aerogenerador. En este caso esta parte no es tan importante ya que la propagación del hueco se quiere estudiar para saber qué hay que analizar de lo que el aerogenerador verá. En este caso el aerogenerador utilizado es un aerogenerador de jaula de ardilla de la marca Elin trabajando a velocidad fija. Las características completas del aerogenerador y de los transformadores se pueden ver en el anexo 1.

### 5.3. Caso de aplicación

En el estudio que realiza este proyecto habrá dos casos de aplicación.

- **Caso de aplicación 1:** Se simularán los diferentes huecos de tensión para un único aerogenerador con tal de ver las diferencias en la propagación según el tipo de hueco. Además se verá la influencia del transformador y de las impedancias de línea.

<sup>1</sup> ABB suministra transformadores para diferentes empresas como por ejemplo Gamesa y Suzlon



- **Caso de aplicación 2:** Se simulará un parque eólico entero para ver la propagación de los huecos tal y como ocurriría realmente. Además se verá que a pesar de haber un gran número de transformadores y aerogeneradores la propagación del hueco no es muy diferente a la vista para un único aerogenerador. Se intentará obtener un circuito simplificado para saber cómo es el tipo de hueco que llega al aerogenerador.

## 5.4. Aplicación a un aerogenerador

Dependiendo el lugar de origen del hueco es posible que los 7 tipos de huecos lleguen al aerogenerador siendo lo más habitual que los huecos se originen en la línea de transporte. De todos modos, para no dejar cabos sueltos se supondrá que los huecos se pueden originar en la línea de transporte, en la distribución y en la propia torre del aerogenerador entre este y el transformador de la torre. De esa manera se verá la diferencia entre los huecos que se propagan simplemente por la línea, los que se propagan a través de un transformador y los que lo hacen a través de dos.

Suponiendo el circuito de la figura 3.1 (que viene a ser un resumen de la figura 5.1) se generan los 4 tipos de huecos posibles en las 3 zonas señaladas. En la zona I se ven las tensiones antes del primer transformador, es decir, del modo en el que se cambian al generarse el hueco. En la zona II aparecen las tensiones tras un transformador y en la zona III tras dos transformadores.

En la tabla 3.3 parece que el cambio de hueco que se produce debido a los transformadores es bastante diferente según el tipo de hueco generado pero para verlo mejor vamos a utilizar las componentes simétricas. En todos los casos se supone que el ángulo inicial de la fase  $a$  es de  $0^\circ$  y la profundidad del hueco es del 50 %.

Para entender la propagación de los huecos a través de los transformadores utilizando las transformadas de Park hay que tener en cuenta una serie de cosas que se verán en las siguientes imágenes:

- Que el ángulo de la componente directa que aparezca sea por ejemplo de  $270^\circ$  respecto de la componente  $d$  no significa que el ángulo inicial real de esa componente directa sea de  $270^\circ$ . Esos ángulos respecto de las componentes de Park se han escogido únicamente por su facilidad para poder compararlos unos con otros.
- En las imágenes vectores de diferente amplitud tendrán el mismo tamaño y el motivo no es otro que facilitar la comprensión de lo que se quiere explicar. Que dos vectores tengan el mismo tamaño quiere decir que su amplitud por unidad es la misma en ambas zonas cogiendo como amplitud base para cada zona el valor de la tensión en caso de que no hubiese hueco. Es decir, utilizando un hueco de tipo A con una magnitud del 50 % las amplitudes de las componentes directas de las zonas I, II y III será iguales dado que

$$V_{pu,I} = \frac{0,5 \cdot V_I}{V_I}; \quad V_{pu,II} = \frac{0,5 \cdot V_{II}}{V_{II}}; \quad V_{pu,III} = \frac{0,5 \cdot V_{III}}{V_{III}}$$

y por lo tanto el valor por unidad en las tres zonas será de 0.5 pu.

### 5.4.1. Huecos originados en la línea de transporte - Zona I

#### Hueco de tipo A

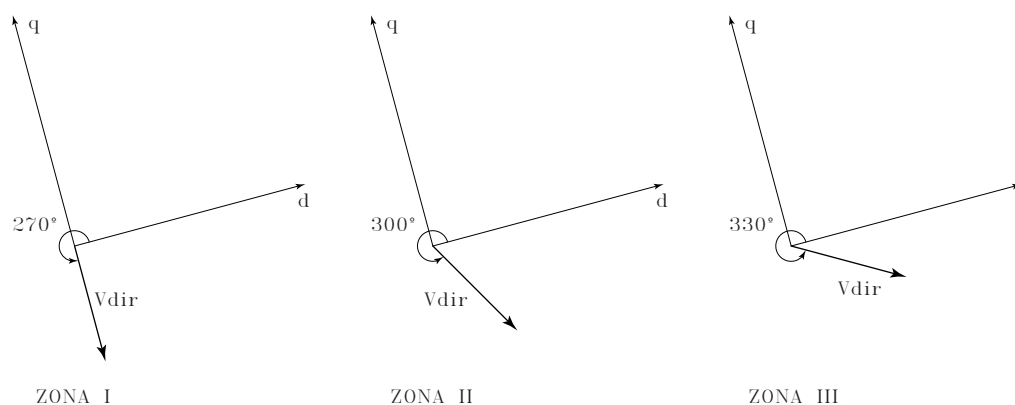


Figura 5.2: Componentes simétricas al generar un hueco de tipo A en la zona I

En la figura 5.2 se puede ver la componente directa de las tensiones en las tres zonas a estudiar. Todos los vectores tienen la misma amplitud por lo que el transformador lo que hace es girar la componente directa  $30^\circ$  ya que por lo demás el hueco sigue siendo el mismo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta los ángulos ya que la influencia en el aerogenerador no será la misma independientemente del ángulo inicial en el que se crea el hueco, pero eso se verá más adelante.

#### Hueco de tipo B

En este caso (figura 5.3) se tienen componentes directa e inversa en todas las zonas y en la zona I también debería haber una componente homopolar que no se ha dibujado porque su propagación consiste en que después de los transformadores desaparece.

La componente directa tiene el mismo ángulo que la componente directa del hueco de tipo A y en este caso también la componente inversa aunque como ya se ha dicho anteriormente esto depende del ángulo inicial en el que se ha creado la onda. En las zonas II y III los huecos son de tipo C\* y D\* respectivamente pero la magnitud por unidad de los vectores es la misma que en la zona I.

Por lo tanto el transformador lo que hace es volver a girar  $30^\circ$  tanto la componente directa como la inversa. En realidad la componente directa se adelanta  $30^\circ$  y la componente inversa se atrasa  $30^\circ$  pero en la imagen se mueven a la vez porque la componente inversa gira en sentido contrario.

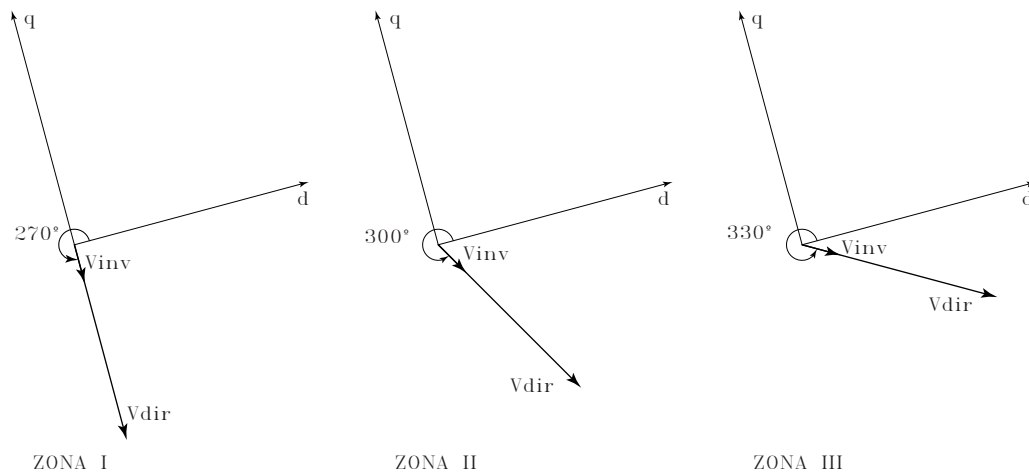


Figura 5.3: Componentes simétricas al generar un hueco de tipo B en la zona I

### Hueco de tipo C

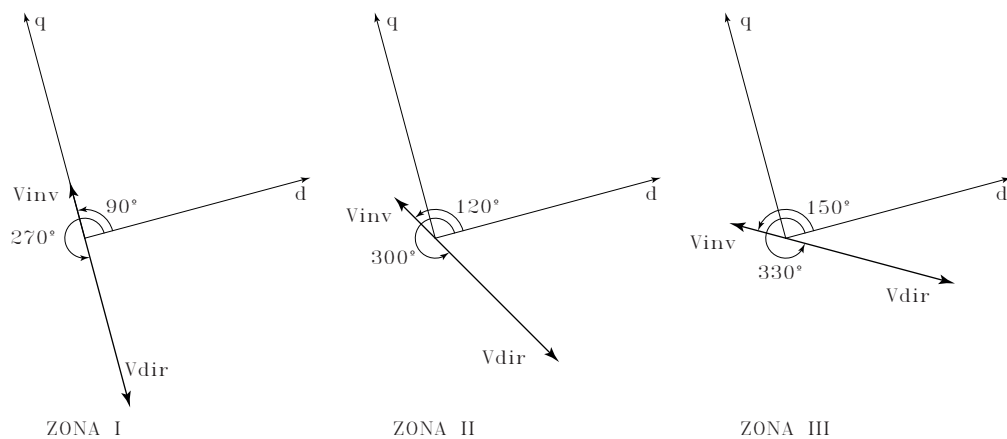


Figura 5.4: Componentes simétricas al generar un hueco de tipo C en la zona I

En este caso la componente directa tiene el mismo ángulo que en los casos anteriores y está  $180^\circ$  desfasada respecto de la componente inversa (figura 5.4).

El cambio de ángulo de las componentes al pasar a través de los transformadores es exactamente igual que el ocurrido en los huecos de tipo A y B.

### Hueco de tipo E

La imagen 5.5 muestra prácticamente las mismas componentes que muestra el hueco de tipo C por lo que la explicación es análoga para los dos casos.

Por lo tanto y sin tener en cuenta el valor de los ángulos parece ser que la influencia del transformador radica en un adelanto o retraso de las componentes directa e inversa

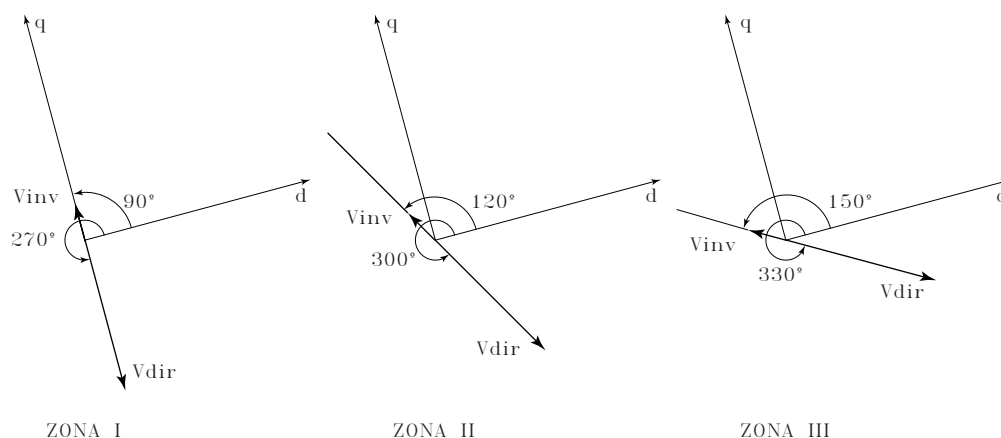


Figura 5.5: Componentes simétricas al generar un hueco de tipo E en la zona I

y la desaparición de la componente homopolar ya que por lo demás las magnitudes de las tensiones por unidad directa e inversa son iguales a ambos lados del transformador. Esto ya se suponía así después de ver en el capítulo 3 de manera matemática cuál iba a ser el cambio de las componentes simétricas.

#### 5.4.2. Huecos originados en la línea de distribución - Zona II

En este caso los huecos que llegarían a la máquina serían los mismos que se han puesto en las imágenes 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 pero sin tener en cuenta la zona I. Es decir, el hueco que verá el aerogenerador es el mismo que vería aunque este se produjese en la zona I. Se podría decir que el hueco que el aerogenerador verá es el mismo que el visto en el caso anterior.

Hay que tener en cuenta que el hueco generado en la zona I es bastante más lejano que el generado en la zona II por lo que la profundidad de este último debería ser menor. Aún así esta parte no tiene mayor importancia a la hora de ver cómo el hueco se propaga a través de los transformadores e impedancias de línea.

#### 5.4.3. Huecos originados en la propia torre - Zona III

Igual que lo ocurrido en la zona II solo que en este caso el hueco llegará al aerogenerador del mismo modo en el que se genera ya que no hay elementos entre este y su creación. Pero al igual que se ha explicado para la zona II, este hueco tendrá la misma forma que los otros pero no la misma magnitud ya que al estar al lado del aerogenerador la impedancia de falta es muy pequeña y ello hace que el hueco sea de mayor profundidad.

Resumiendo, en este apartado se ha podido ver cómo las magnitudes de las componentes simétricas son las mismas independientemente del lugar de la creación del hueco, es decir, independientemente del número de transformadores que tenga que atravesar. Pero eso no significa que los huecos sean los mismos al pasar por el transformador ya que el desfase originado en las componentes hace que un por ejemplo un hueco E y uno F no hagan llegar las mismas corrientes al aerogenerador. El paso por dos transformadores Dyn en cambio sí que crea un desfase tal que es posible crear las mismas corrientes con un hueco de tensión de tipo E o de tipo G. Así que los huecos E y G serán iguales de cara a lo que el aerogenerador de este proyecto verá. Y ocurrirá lo mismo para los huecos B y D\*.

## 5.5. Influencia de los desfases de las componentes

En todas las simulaciones anteriores se ha supuesto que el ángulo inicial era de  $0^\circ$  para la fase  $a$  pero eso no tiene porqué ser así ya que el hueco de tensión se puede crear en cualquier momento y que se cree en el momento que la fase A se anula antes de empezar a crecer sería casualidad.

Cada ángulo que se aumenta el ángulo inicial de la fase A hace que la componente directa se adelante ese número de grados y la componente inversa también, lo que en términos cuantitativos significa que la componente directa aumenta su ángulo respecto del eje  $d$  y la componente inversa lo disminuye.

Para la propagación del hueco ese ángulo inicial de la fase A no tiene importancia ya que la propagación del hueco es la misma independientemente de su valor pero sirve para explicar porque en los huecos de tipo C y E la componente inversa tiene un ángulo de  $90^\circ$  respecto de  $d$  y en cambio en el hueco de tipo B ese ángulo es de  $270^\circ$ .

Para cada tipo de hueco el hueco generado es el mismo pero no así su influencia en el aerogenerador. Según el momento en el que se crea el hueco los picos de corriente son mayores. Casualmente los peores picos de corriente en el estátor del aerogenerador utilizado en este proyecto se dan en el momento que los ángulos de las componentes directa e inversa coinciden. Por lo tanto, el hueco de tipo B que se está generando en esta simulación sería el peor tipo de hueco B posible para una profundidad del 50 %.

Para el hueco de tipo A se ha visto mediante simulaciones que los huecos más dañinos son los creados para ondas iniciales  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $120^\circ$ . Para los huecos C y E las componentes directa e inversa se unirían para un ángulo inicial de la fase  $a$  de  $90^\circ$  ya que la componente directa se adelantaría hasta los  $360^\circ$  ó  $0^\circ$  respecto del eje  $d$  y la componente inversa se retrasaría hasta el mismo punto. Lo mismo ocurre con el par ya que esos ángulos iniciales son los que provocan el mayor pico de par de la máquina.

Estos ángulos son para la fase  $a$  siempre que los huecos sean los mismos que los que aparecen en la tabla 3.2 ya que si por ejemplo en un hueco de tipo B la fase que disminuye su tensión es la  $b$  en vez de la  $a$  ese ángulo no sería el peor.

## 5.6. Aplicación a un parque eólico

Suponemos un parque eólico real en el que se tienen 5 aerogeneradores. Cada torre contiene un aerogenerador y un transformador de 20/0.69 kV y más adelante se encuentra un único transformador de 132/20 kV que elevará la tensión para poder transportarla. Se tiene por lo tanto el esquema de la figura 5.1.

Por lo tanto, cada hueco que se genera en la línea de transporte pasa a través del transformador de alta y luego del transformador de media hasta llegar al aerogenerador. Pero a diferencia del caso anterior la simplificación del sistema para ver como el hueco llega al aerogenerador requiere un pequeño cambio ya que la influencia de los aerogeneradores y transformadores de media tensión entre ellos mismos no es despreciable.

En este apartado se verá que esa influencia se puede simplificar de manera que sea mucho más sencillo analizar la influencia del hueco en el aerogenerador.

Partiendo del circuito de la figura 5.6 que consta de unas impedancias del siguiente valor

$$Z_{s,1} = 0,2178H \quad Z_{f,1} = 0,2178H$$

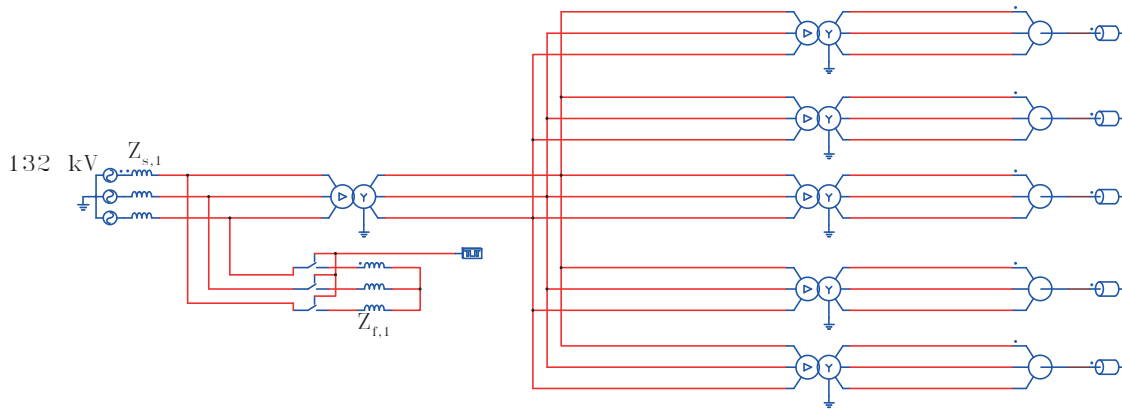


Figura 5.6: Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM

lo que se ha hecho ha sido representar el transformador de alta mediante sus impedancias de fugas. Para ello se pasó todo al secundario obteniendo el circuito de la figura 5.7 en el que el valor de las impedancias es el siguiente:

$$Z_{s,2} = 0,005H \quad Z_{f,2} = 0,005H \quad R_{fugas,2} = 0,033\Omega \quad L_{fugas,2} = 1,273 \cdot 10^{-3}H$$

Lo mismo se puede hacer para el transformador de alta obteniendo el circuito de la figura 5.8 y los siguientes valores para las impedancias:

$$Z_{s,3} = Z_{f,3} = 5,951 \cdot 10^{-6}H \quad R_{fugas1,3} = 3,967 \cdot 10^{-5}\Omega \quad L_{fugas1,3} = 1,515 \cdot 10^{-6}H$$

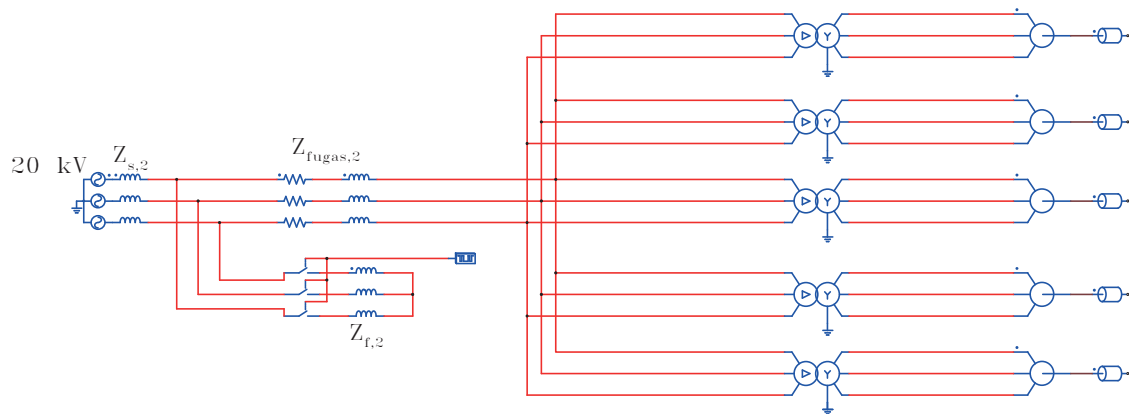


Figura 5.7: Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM con el transformador de alta representado mediante sus impedancias de fugas

$$R_{fugas2,3} = 4,052 \cdot 10^{-4} \Omega \quad L_{fugas2,3} = 3,869 \cdot 10^{-5} H$$

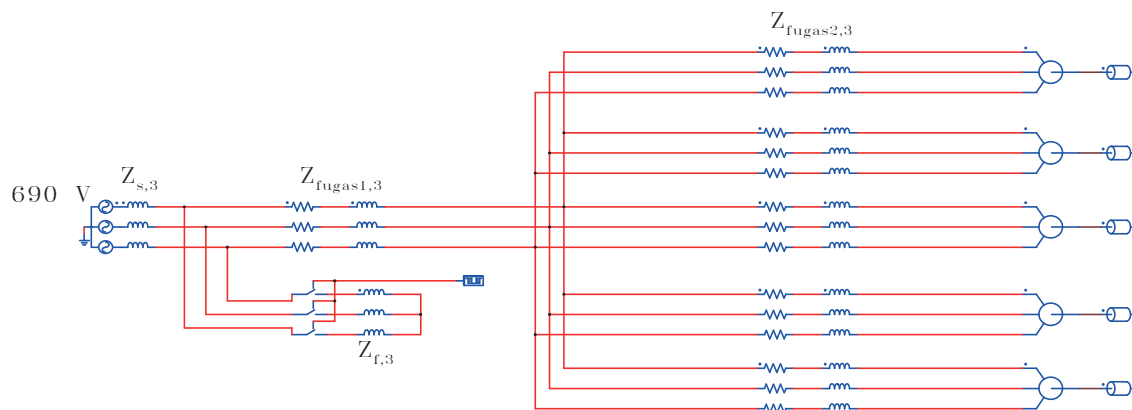


Figura 5.8: Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM con los transformadores representados mediante sus impedancias de fugas

Ahora lo que se quiere es ver qué tipo de hueco llega a cada uno de los aerogeneradores pero sin tener en cuenta todos y cada uno de los aerogeneradores, es decir, se quiere ver la influencia de 4 aerogeneradores y transformadores de torre en el hueco de tensión para ver cómo ese hueco llega al aerogenerador que queda pasando por el transformador de media tensión de este último.

Por lo tanto hay que conseguir que la caída de tensión en la impedancia de red y las impedancias de fugas del transformador de alta sea la misma para ambos casos. Por lo tanto no hay más que multiplicar esa impedancia por el número de aerogeneradores que hubiese conectados a ese punto y se tiene un circuito equivalente como el de la figura 5.9.

Los valores de esas impedancias son:

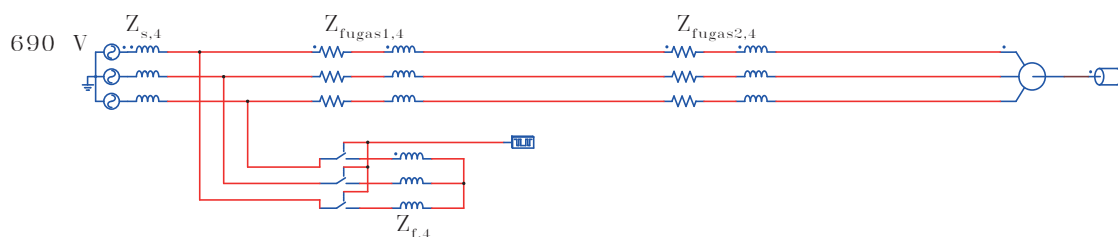


Figura 5.9: Circuito equivalente de parque eólico de 5 aerogeneradores en PSIM

$$Z_{s,4} = Z_{f,4} = 2,976 \cdot 10^{-5} H \quad R_{fugas1,4} = 1,984 \cdot 10^{-4} \Omega \quad L_{fugas1,4} = 7,577 \cdot 10^{-6} H$$

$$R_{fugas2,4} = 4,052 \cdot 10^{-4} \Omega \quad L_{fugas2,4} = 3,869 \cdot 10^{-5} H$$

Por lo tanto el hueco de tensión que llega a cada aerogenerador es el que llegaría en caso de que ese aerogenerador fuese el único que hay y su impedancia de red se multiplicase por el número de aerogeneradores que hay realmente. Esas impedancias no influyen en la propagación del hueco excepto en la caída de tensión que crean como impedancias que son. Además hacen que la corriente sea menor y por lo tanto a mayor impedancia menor será la influencia del hueco en el aerogenerador en lo que a picos de corriente se refiere. Así que cuantos más aerogeneradores haya en un parque eólico menor será la influencia del hueco en el aerogenerador.

Por último, y visto que en la figura 5.9 las impedancias de fugas de los transformadores están en línea con el estátor de la máquina es probable que esas impedancias se puedan sumar al devanado del estátor, quedando de esa manera el circuito de la figura 5.10.

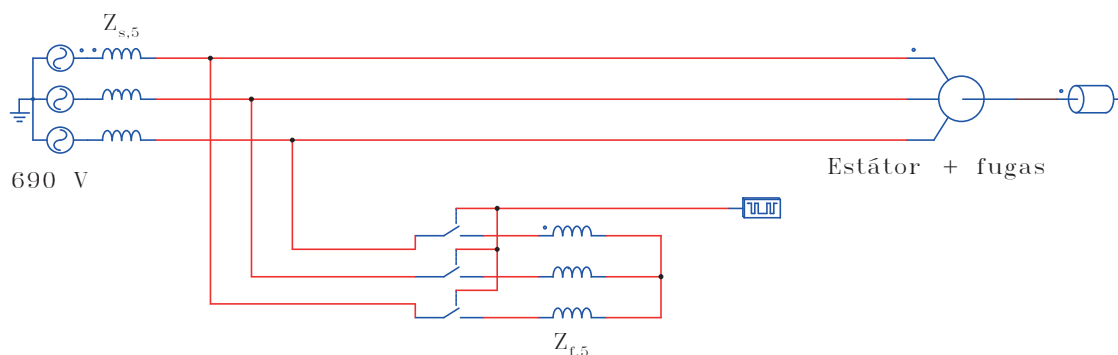


Figura 5.10: Circuito equivalente de parque eólico de 5 aerogeneradores con las impedancias de fugas de los transformadores añadidas al estátor del aerogenerador, en PSIM

Los valores de las impedancias de red y falta son los mismos que para la figura 5.9:

$$Z_{s,5} = Z_{f,5} = Z_{s,4} = Z_{f,4}$$



Las intensidades de la fase  $a$  que ve el estátor de cada aerogenerador en cada uno de los 5 pasos se pueden ver en la figura 5.11. Se puede apreciar que son muy similares por no decir idénticas ya que obviamente PSIM tendrá un pequeño error como todo programa de simulación, al igual que los errores que se han podido cometer en el redondeo de las impedancias. Además hay que tener en cuenta que para que las formas de las intensidades sean iguales se han adelantado  $30^\circ$  las fuentes de 20 kV y  $60^\circ$  las de 690 V. En la figura 5.12 se puede ver que la potencia para cada uno de los casos también es muy parecida.

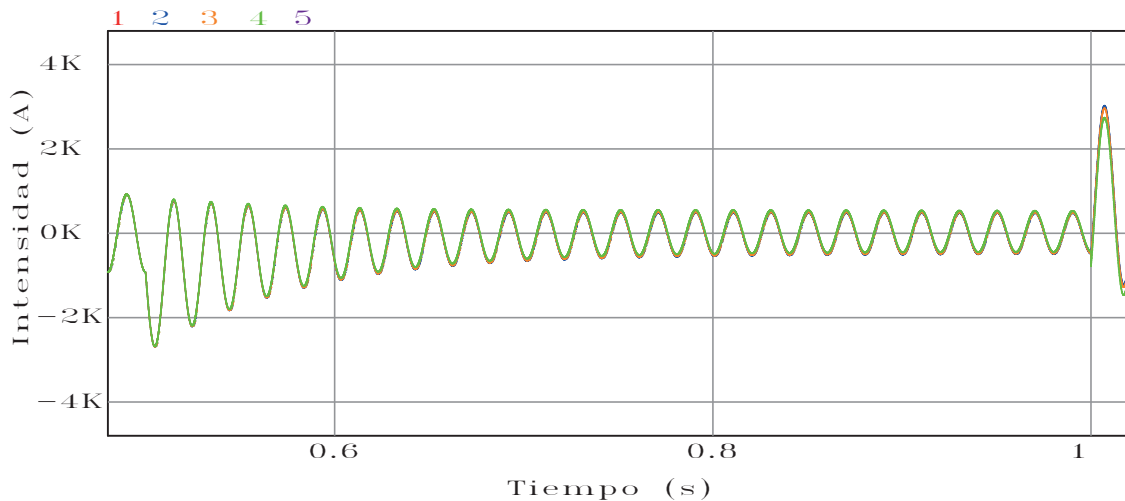


Figura 5.11: Intensidades de la fase  $a$  que llegan al estátor para los 4 parques anteriores que sufre un hueco trifásico con  $h=0.5$  y comprendido entre  $t=0.5$  seg. y  $t=1$  seg.

De todos modos lo realizado en estas simulaciones está hecho para un hueco trifásico que no hay problema en reproducirlo después del transformador porque no cambia en absoluto. Si se quiere hacer lo mismo para un hueco asimétrico hay que hacer por un lado un circuito con la componente directa y otro con la componente inversa tal y como se ve en la figura 5.13. En este caso el hueco asimétrico es un hueco bifásico o de tipo C con una profundidad del 50% y una duración de medio segundo a partir de los 0.5 segundos. Utilizando las componentes de Park explicadas en el capítulo 4 se obtiene el valor de las tensiones de las componentes directa e inversa y se crean dos circuitos en los que se establecen esas tensiones durante el tiempo que dura el hueco. Para ello se utilizan huecos trifásicos.

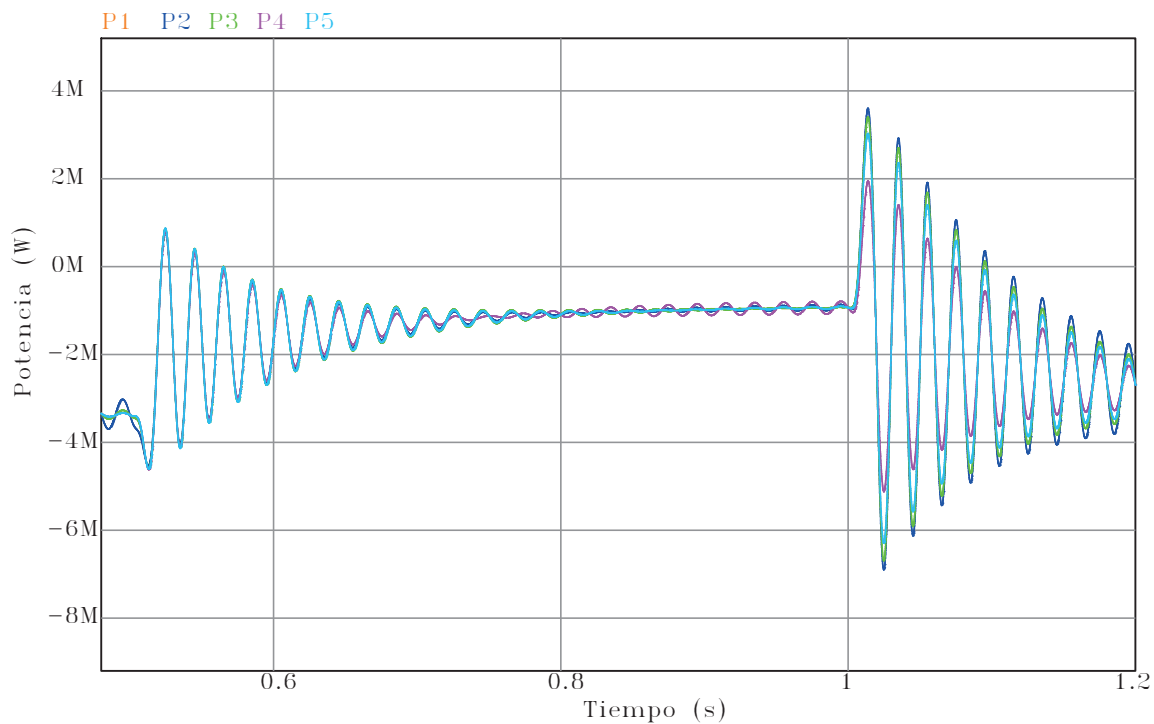


Figura 5.12: Potencia total calculada tras la impedancia de red para los 5 parques cuando sufre un hueco trifásico con  $h=0.5$  y comprendido entre  $t=0.5$  seg. y  $t=1$  seg. Nota: La potencia para los parques 4 y 5 está multiplicada por 5 ya que se han quitado 4 aerogeneradores

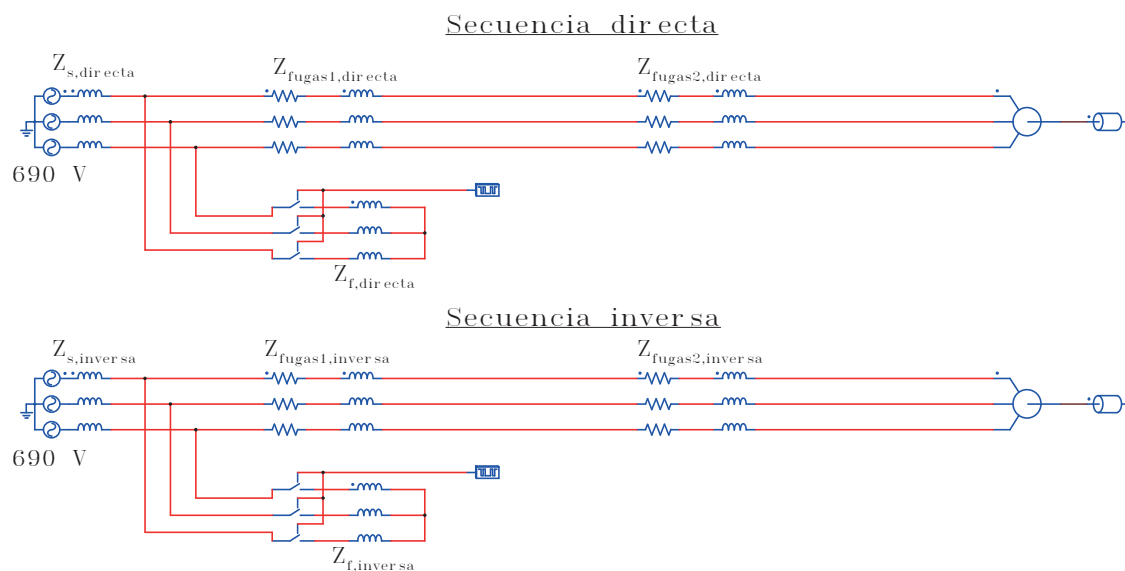


Figura 5.13: Circuitos de las componentes directa e inversa de un hueco asimétrico

Los valores de las impedancias por lo tanto son iguales a las de la figura 5.9 excepto las impedancias de falta:

$$Z_{f,directa} = 8,927 \cdot 10^{-5} H \quad Z_{f,inversa} = 9,919 \cdot 10^{-6} H$$

Otra cosa a tener en cuenta es que la componente directa está presente tanto durante el hueco como durante la ausencia de este mientras que la componente inversa desaparece tras la recuperación del hueco.

Para asegurarnos que esa simulación es correcta comparamos la corriente que llega al aerogenerador en un circuito como el de la figura 5.6 pero con un hueco bifásico en vez de trifásico y la corriente que llega al aerogenerador sumando las corrientes producidas en los dos circuitos de la figura 5.13.

El resultado se puede ver en la figura 5.14. Una vez se recupera el hueco se puede ver que las intensidades no coinciden pero es debido a que es imposible eliminar del todo la componente inversa durante la simulación cuando en la realidad sí desaparece por completo.

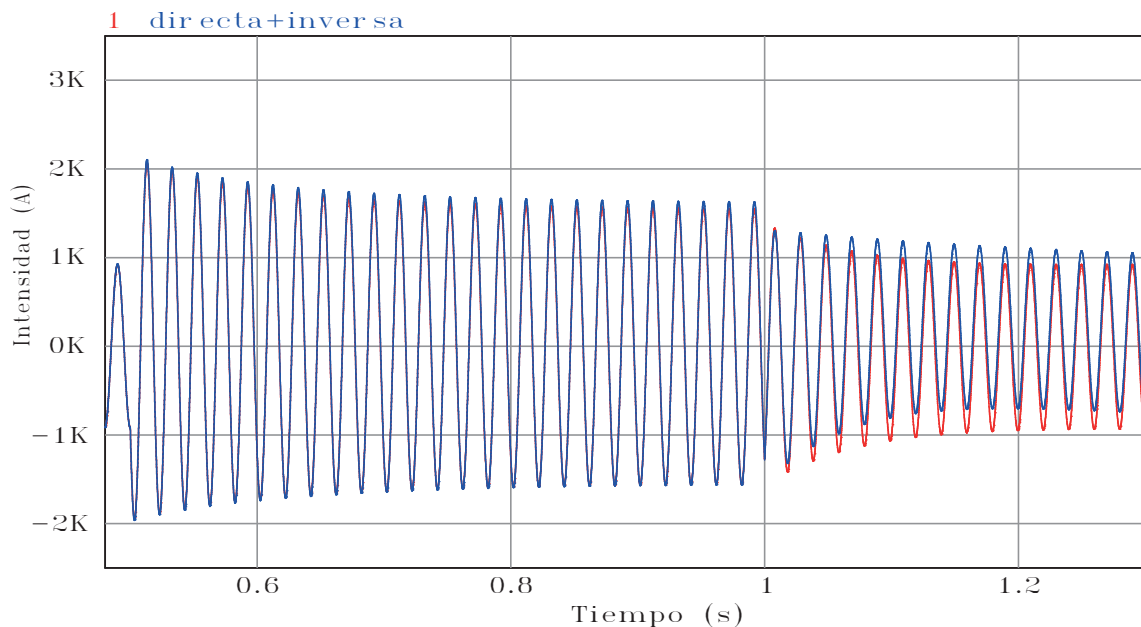


Figura 5.14: Intensidad de la fase a que llega al estátor para un parque que sufre un hueco bifásico con  $h=0.5$  y comprendido entre  $t=0.5$  seg. y  $t=1$  seg. comparada con el mismo hueco separado en componentes directa e inversa y con el circuito simplificado

Se podría realizar la misma operación para cualquier tipo de hueco obteniendo un resultado análogo. Por lo tanto se puede deducir que la reducción del parque a un circuito compuesto de las impedancias de fugas es correcto para cualquier tipo de hueco.

## 5.7. Resultados

Visto lo visto en este capítulo las conclusiones que se pueden sacar son las siguientes:

1. Los transformadores triangulo-estrella, tal y como se vio en el capítulo 3 de manera teórica no cambian el valor de las componentes directa e inversa aunque sí varían el ángulo  $30^\circ$ . La componente homopolar la eliminan por completo. Ese desfase originado por el transformador hace que a pesar de tener las mismas magnitudes de las componentes simétricas las corrientes que luego lleguen al aerogenerador sean diferentes. No curre así al pasar por dos transformadores ya que el desfase creado por ellos hace que el hueco sea el mismo pero sin componente homopolar.
2. La influencia del transformador como impedancia que reduce las corrientes que llegan al aerogenerador se puede poner como su impedancia de fugas. Esa impedancia estará en serie con el estátor de la máquina de inducción por lo que su influencia es la misma que al de aumentar la impedancia del devanado del estátor una cantidad igual a esa impedancia de fugas.
3. El hueco que llega a un aerogenerador dentro de un parque eólico se puede simular como un hueco que llega a ese mismo aerogenerador tras pasar por una serie de resistencias e inductancias que variarán según el número de aerogeneradores del parque y los tipos de transformadores que haya que atravesar. Todas esas impedancias se pueden sumar a las impedancias de los devanados del estátor simplificando así el parque eólico.

## Capítulo 6

# Conclusiones

Tras analizar los elementos más importantes que se pueden encontrar en un parque eólico y su influencia en la propagación de huecos de tensión a través de estos hasta llegar al aerogenerador la conclusión principal es que todos esos elementos se pueden simplificar en una serie de impedancias siempre que se tengan en cuenta los desfases originador por los transformadores, ya que estos desfases hacen que las corrientes que luego ve el aerogenerador no tengan la misma forma que tendrían en ausencia de transformadores.

Es decir, fijándose en las magnitudes de las componentes simétricas éstas no varían al pasar a través de un transformador Dyn y podría parecer que únicamente hay 4 tipos de hueco a pesar de haber 9 nombres diferentes para definirlos. Los desfases creados por el transformador hacen que esas componentes asimétricas no creen las mismas corrientes pero al eliminar la homopolar los 9 huecos se quedan en 7, que serían A, B, C, D, E, F y C\*. Aunque sí es verdad que para  $\frac{1}{3} \leq h < 1$  es posible crear huecos D y C\* mediante los huecos B y C respectivamente

Por lo tanto, sea cual sea el hueco generado en la línea de transporte, el hueco que verá el aerogenerador será ese mismo hueco (mismas componentes simétricas con homopolar nula) pero desfasadas  $30^\circ \cdot n$  siendo  $n$  el número de transformadores que se atraviesen. Y por lo tanto los transformadores se pueden poner como su impedancia de fugas siempre que se tenga en cuenta ese desfase. Además esas impedancias están en línea con el estátor de manera que por cada transformador que atraviesa el hueco de tensión es como si el devanado del estátor aumentase su impedancia.

Por otro lado están las impedancias de las líneas, que como ya se ha visto antes unas influirán en la tensión residual y desfase del hueco y otras en la propagación trabajando como impedancias que reducen las corrientes que llegarán al aerogenerador. Así pues un hueco generado en la línea de transporte será en general menos dañino para el aerogenerador debido a la mayor lejanía del pcc y del propio aerogenerador y también a que la impedancia de línea es mayor para esta línea que para la de distribución.

Por último es necesario comentar que estos huecos originarán picos de corriente y de par en la máquina. Además, para huecos asimétricos se crearán oscilaciones en el



par debido a la componente inversa que hace que la máquina gire en sentido contrario al que gira habitualmente.

## Apéndice A

# Anexo 1: Características del aerogenerador y de los transformadores

### A.1. Características del aerogenerador

- **Marca:** Elin
- **Tipo de máquina:** Generador asíncrono de jaula de ardilla
- **Tensión nominal:** 690 V
- **Potencia nominal:** 750 kW
- **Potencia aparente:** 843 kVA
- **Potencia reactiva a plena carga:** 385 kVAr
- **Número de pares de polos:** 2
- **Velocidad nominal:** 1510 rpm
- **Momento de inercia:**  $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Parámetros del circuito equivalente conectado en estrella y referido todo al estátor:

- **Resistencia del estátor:**  $0.0045 \Omega$
- **Reactancia del estátor:**  $0.0513 \Omega$
- **Resistencia del rotor:**  $0.004 \Omega$
- **Reactancia del rotor:**  $0.066 \Omega$
- **Reactancia de magnetización:**  $2.2633 \Omega$



## A.2. Características de los transformadores

### A.2.1. Transformador de la torre de 20/0.69 kV

En transformadores de tipo seco de 690 V a 20 kV fabricados por la empresa ABB y utilizados para colocarlos en la torre del aerogenerador los datos aproximados son una impedancia de cortocircuito del 6 % para una potencia de 2.35 MVA con unas pérdidas de vacío y cortocircuito de 4.2 y 20 kW respectivamente.

Con ello y utilizando cálculos básicos de transformadores se logran los siguientes datos referidos todos al primario del transformador.

- **Inductancia de magnetización:** 40.693 k $\Omega$
- **Resistencia de fugas:** 1.0213  $\Omega$
- **Inductancia de fugas:** 30.6393  $\Omega$

### A.2.2. Transformador de 132/20 kV

En transformadores de tipo seco de 20 kV a 132 kV fabricados por la empresa ABB los datos aproximados son una impedancia de cortocircuito comprendida entre el 10 y el 15 % siendo el valor más común 13 % (el utilizado para este proyecto) para una potencia de 40 MVA con unas pérdidas de vacío y cortocircuito de 25 y 200 kW respectivamente.

Con ello y utilizando cálculos básicos de transformadores se logran los siguientes datos referidos al primario del transformador:

- **Inductancia de magnetización:** 97.708 k $\Omega$
- **Resistencia de fugas:** 4.356  $\Omega$
- **Inductancia de fugas:** 52.272  $\Omega$

En ninguno de los casos es necesaria la parte resistiva de la rama de excitación del transformador por lo que su cálculo no se ha considerado oportuno.



## Índice de figuras

1.1. Producción eólico de España el 31 de marzo de 2013 . . . . .	10
1.2. Configuraciones típicas de aerogeneradores y conexiones a red: Tipo A, turbina eólica a velocidad fija; Tipo B, turbina eólica a velocidad variable con resistencia rotórica variable; Tipo C, turbina eólica a velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial; Tipo D, turbina eólica a velocidad variable con convertidor de frecuencia a escala completa . . . . .	12
1.3. Tipos de configuraciones instaladas en Europa hasta el año 2010. Fuente: EWEA [5] . . . . .	15
1.4. Tipos de configuraciones instaladas en España hasta el año 2011. Fuente: AEE . . . . .	15
2.1. Esquema de un hueco de tensión . . . . .	18
2.2. Evolución de las tensiones de fase durante un hueco de tensión simétrico . . . . .	18
2.3. Curva tensión-tiempo que define el área “hueco de tensión” . . . . .	20
2.4. Sistema equilibrado (izquierda) y sistema desequilibrado (derecha) . . . . .	21
2.5. Componentes directa, inversa y homopolar . . . . .	21
2.6. Divisor de tensión para calcular los huecos de tensión . . . . .	22
2.7. Esquema de falta trifásica y falta trifásica a tierra . . . . .	23
2.8. Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta trifásica . . . . .	24
2.9. Esquema de falta entre una fase y tierra . . . . .	25
2.10. Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre una fase y tierra . . . . .	26
2.11. Esquema de falta entre dos fases . . . . .	27
2.12. Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre dos fases . . . . .	28
2.13. Esquema de falta entre dos fases y tierra . . . . .	29

2.14. Esquema de los circuitos de las componentes simétricas en una falta entre dos fases y tierra . . . . .	30
3.1. Sistema eléctrico con tres niveles de tensión . . . . .	34
3.2. Diagrama fasorial de un transformador con conexión YNyn0 . . . . .	35
3.3. Diagrama fasorial de un transformador con conexión Yyn0 . . . . .	36
3.4. Diagrama fasorial de un transformador con conexión Dyn11 . . . . .	37
3.5. Circuito equivalente de un transformador con todas las impedancias en el primario . . . . .	45
3.6. Circuito de hueco trifásico con un transformador, en PSIM . . . . .	46
3.7. Circuito equivalente de un transformador despreciando la impedancia de magnetización y con las impedancias de fugas en el secundario . . . . .	46
3.8. Circuito de hueco trifásico con las inductancias de fugas del transformador, en PSIM . . . . .	47
3.9. Transformación de Park . . . . .	48
3.10. Circuito utilizado para obtener las componentes simétricas en PSIM . . . . .	49
3.11. Intensidades de la fase $a$ para un hueco bifásico con $h=0.1$ pu y comprendido entre $t=0.5$ y 1 segundos . . . . .	50
4.1. Esquema para ver la influencia de las líneas en la creación del hueco y en la propagación de este hasta el aerogenerador . . . . .	58
4.2. Hueco trifásico con una tensión residual inicial de 0.1pu y una tensión residual final de 0.93pu . . . . .	60
5.1. Esquema de un parque eólico de 5 aerogeneradores y los transformadores que en él hay . . . . .	62
5.2. Componentes simétricas al generar un hueco de tipo A en la zona I . . . . .	64
5.3. Componentes simétricas al generar un hueco de tipo B en la zona I . . . . .	65
5.4. Componentes simétricas al generar un hueco de tipo C en la zona I . . . . .	65
5.5. Componentes simétricas al generar un hueco de tipo E en la zona I . . . . .	66
5.6. Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM . . . . .	68
5.7. Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM con el transformador de alta representado mediante sus impedancias de fugas . . . . .	69
5.8. Parque eólico con 5 aerogeneradores en PSIM con los transformadores representados mediante sus impedancias de fugas . . . . .	69
5.9. Circuito equivalente de parque eólico de 5 aerogeneradores en PSIM . . . . .	70

5.10. Circuito equivalente de parque eólico de 5 aerogeneradores con las impedancias de fugas de los transformadores añadidas al estátor del aerogenerador, en PSIM . . . . .	70
5.11. Intensidades de la fase a que llegan al estátor para los 4 parques anteriores que sufre un hueco trifásico con $h=0.5$ y comprendido entre $t=0.5$ seg. y $t=1$ seg. . . . .	71
5.12. Potencia total calculada tras la impedancia de red para los 5 parques cuando sufre un hueco trifásico con $h=0.5$ y comprendido entre $t=0.5$ seg. y $t=1$ seg. Nota: La potencia para los parques 4 y 5 está multiplicada por 5 ya que se han quitado 4 aerogeneradores . . . . .	72
5.13. Circuitos de las componentes directa e inversa de un hueco asimétrico . . . . .	72
5.14. Intensidad de la fase a que llega al estátor para un parque que sufre un hueco bifásico con $h=0.5$ y comprendido entre $t=0.5$ seg. y $t=1$ seg. comparada con el mismo hueco separado en componentes directa e inversa y con el circuito simplificado . . . . .	73





# Índice de tablas

1.1. Potencia eólica instalada en 2011 . . . . .	11
3.1. Transferencia de huecos a través de transformadores . . . . .	44
3.2. Tipos de huecos de tensión según el tipo de falta y su paso a través de transformadores en su expresión fasorial . . . . .	52
3.3. Tipos de huecos de tensión según el tipo de falta y su paso a través de transformadores en su expresión temporal . . . . .	53
3.4. Componentes simétricas de los diferentes tipos de huecos de tensión . .	54





## Bibliografía

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2011, 2012. 9
- [2] World Wind Energy Association. World wind report 2011, 2012. 10
- [3] Math H.J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press, 2000. 10, 34, 39, 40, 41, 42, 44, 51, 58
- [4] Thomas Ackermann. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 2005. 11
- [5] European Wind Energy Association. Powering europe: wind energy and the electricity grid, November 2010. 15, 79
- [6] AENOR Comité Técnico de Normalización. UNE-EN 50160 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución, 2011. 17
- [7] IEEE. IEEE std 1159-2009, recommends practice for monitoring electric power quality, 2009. 17, 19
- [8] Jesús López Taberna. *Comportamiento de generadores eólicos con máquina asíncrona doblemente alimentada frente a huecos de tensión*. PhD thesis, Universidad Pública de Navarra, mayo 2008. 19
- [9] Boletín oficial del estado núm.254, 2006. 20
- [10] C.L. Fortescue. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *IEEE Transactions*, 37 part 2: pages 1027-1140, 1918. 20, 22
- [11] Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 1998. 34
- [12] Thomas J. Domin J. Lewis Blackburn. *Protective Relaying*. CRC Press, third edition, 2006. 58

