

ANEXO V- RESULTADOS

TRABAJO FIN DE GRADO INGENIERÍA ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



ISRAEL BAIGORRI GARCIA

ÍNDICE

Contenido

INDICE DE FIGURAS	2
0. INTRODUCCIÓN	3
1. ESCENARIO 1: RED CON PARQUE JAULA ARDILLA EN SERVICIO	4
1.1. ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	4
1.2. ANÁLISIS DINÁMICO.....	5
1.2.1. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 115	5
1.2.2. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 111	12
1.2.3. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 105	16
2. ESCENARIO 2: RED CON PARQUE JAULA ARDILLA EN SERVICIO	19
2.1. ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	19
2.2. ANÁLISIS DINÁMICO.....	20
2.2.1. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 111	20

INDICE DE FIGURAS

IMAGEN 1: FLUJO CARGAS CON JAULA.....	5
IMAGEN 2: FALTA NUDO 115 EN EL ESCENARIO 1.....	6
IMAGEN 3: TENSION 115 TRAS CORTOCIRCUITO	7
IMAGEN 4: Potencia activa (rojo) y reactiva (verde) del parque DFIG	7
IMAGEN 5: CORTOCIRCUITO 115 AFECTA A DFIG.....	9
IMAGEN 6: TENSIÓN EN LA CARGA LD4.....	9
IMAGEN 7: JAULA DE ARDILLA AFECTADO POR CORTOCIRCUITO NUDO 115.....	10
IMAGEN 8: NUDO 111 AFECTADO POR CORTOCIRCUITO NUDO 115.....	10
IMAGEN 9: CORTOCIRCUITO AFECTA A NUDO 111	12
IMAGEN 10: CORTOCIRCUITO AFECTA A NUDO 111 TENSIÓN.....	13
IMAGEN 11: CORTOCIRCUITO NUDO 111 AFECTA A NUDO 115	13
IMAGEN 12: HUECO DE TENSIÓN DFIG TRAS CORTOCIRCUITO NUDO 111.....	14
IMAGEN 13: CORTOCIRCUITO NUDO 111 AFECTA A DFIG.....	14
IMAGEN 14: CORTOCIRCUITO 111 AFECTA A CARGA LD4.....	15
IMAGEN 15: CORTOCIRCUITO 111 AFECTA A PARQUE EÓLICO JAULA ARDILLA	15
IMAGEN 16: CORTOCIRCUITO NUDO 105	16
IMAGEN 17: CORTOCIRCUITO 105 AFECTA A DFIG.....	17
IMAGEN 18: CORTOCIRCUITO NUDO 105 AFECTA A CARGA LD4 TENSIÓN.....	17
IMAGEN 19: CORTOCIRCUITO NUDO 105 AFECTA A DFIG TENSIÓN	18
IMAGEN 20: FLUJO DE CARGAS SIN JAULA	19
IMAGEN 21: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA DE ARDILLA.....	20
IMAGEN 22: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG TENSIÓN	21
IMAGEN 23: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A LD4	21
IMAGEN 24: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG	22
IMAGEN 25: CORTOCIRCUITO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG TENSION	22

0. INTRODUCCIÓN

En este anexo se detalla el proceso de análisis y simulación realizado para la elaboración del presente trabajo fin de grado.

La red analizada se describe en el artículo “A reduced wind power grid model for research and education”. Se realizarán dos tipos de análisis, uno estacionario donde se estudia el escenario de demanda y generación, para ello se empleará el análisis de flujo de cargas y un estudio dinámico donde se estudiará cómo afectan diferentes cortocircuitos a la red, con ellos estudiaremos los huecos de tensión y los compararemos con los que establece la normativa española y danesa.

Las faltas que se establecen son cortocircuitos trifásicos en los siguientes nudos:

- NUDO 105
- NUDO 111
- NUDO 115

Los nudos anteriores se han seleccionado por ser los que en primer análisis se consideraron más conflictivos. El nudo 115 es el punto de conexión a la red del parque eólico de generadores doblemente alimentados y es fundamental que en este punto se cumplan los requisitos de huecos de tensión. El nudo 111 es otro nudo de gran importancia, puesto que es el punto de conexión de la generación eólica de aerogeneradores de jaula de ardilla.

Finalmente el punto 105, es un nudo central de la red, se encuentra localizada la carga de mayor tamaño y uno de los generadores más importantes.

Las simulaciones se han planteado en dos escenarios distintos, en el primero el parque de jaula de ardilla permanece conectado y en el segundo va a desconectarse.

En el estudio de flujo de cargas, los resultados se muestran en el diagrama unifilar de la red, en el que los elementos sobrecargados y los nudos cuya tensión está fuera del rango establecido aparecen coloreados.

Los resultados mostrados para el estudio dinámico corresponden a las gráficas finales de potencia y tensión de los diferentes elementos que constituyen la red.

1. ESCENARIO 1: RED CON PARQUE JAULA ARDILLA EN SERVICIO

1.1. ANÁLISIS ESTACIONARIO.

Para el análisis estacionario se realiza un estudio del flujo de cargas ejecutando el método Newton Raphson en DIgSILENT en la red modelada. La siguiente figura muestra el diagrama unifilar de la red bajo estudio tras su resolución. Para comprobar si existen nudos cuya tensión está fuera de rango es necesario comprobar su color. En caso de que la tensión sea menor que la tensión mínima (0.95 p.u.) aparecerá en color azul, y en caso de que sea superior a la tensión máxima (1.1 p.u.) aparecerá en color rojo. Los elementos cuya corriente sea superior al 80 % de la nominal aparecen en color naranja, y si es superior al 100 % en color rojo.

Como podemos observar en la imagen, todos los transformadores presentan un índice de carga inferior al 100 %.

Los transformadores en color naranja se encuentran funcionando cerca del límite de su capacidad, sin embargo analizando el sistema se observa que se trata de transformadores asociados a centros de generación, por lo que su dimensionamiento se realizó teniendo en cuenta la potencia nominal de dicha generación. Si la central correspondiente se encuentra funcionando cerca de su potencia nominal también lo harán los transformadores asociados.

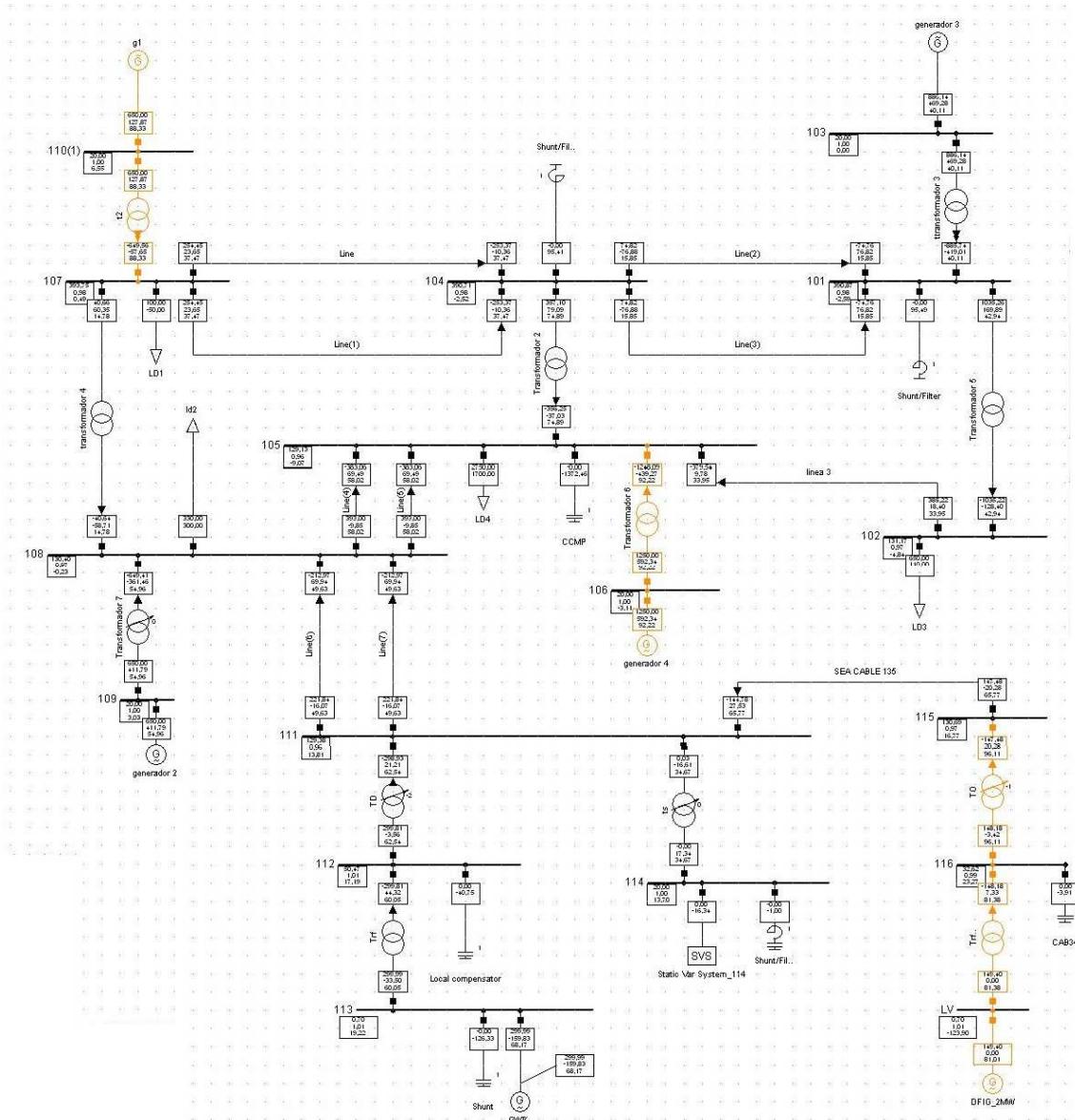


IMAGEN 1: FLUJO CARGAS CON JAULA

1.2. ANÁLISIS DINÁMICO

1.2.1. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 115

La siguiente figura muestra el esquema unifilar de la red bajo análisis en el que se ha producido el cortocircuito en el nudo indicado mediante el icono en forma de rayo.

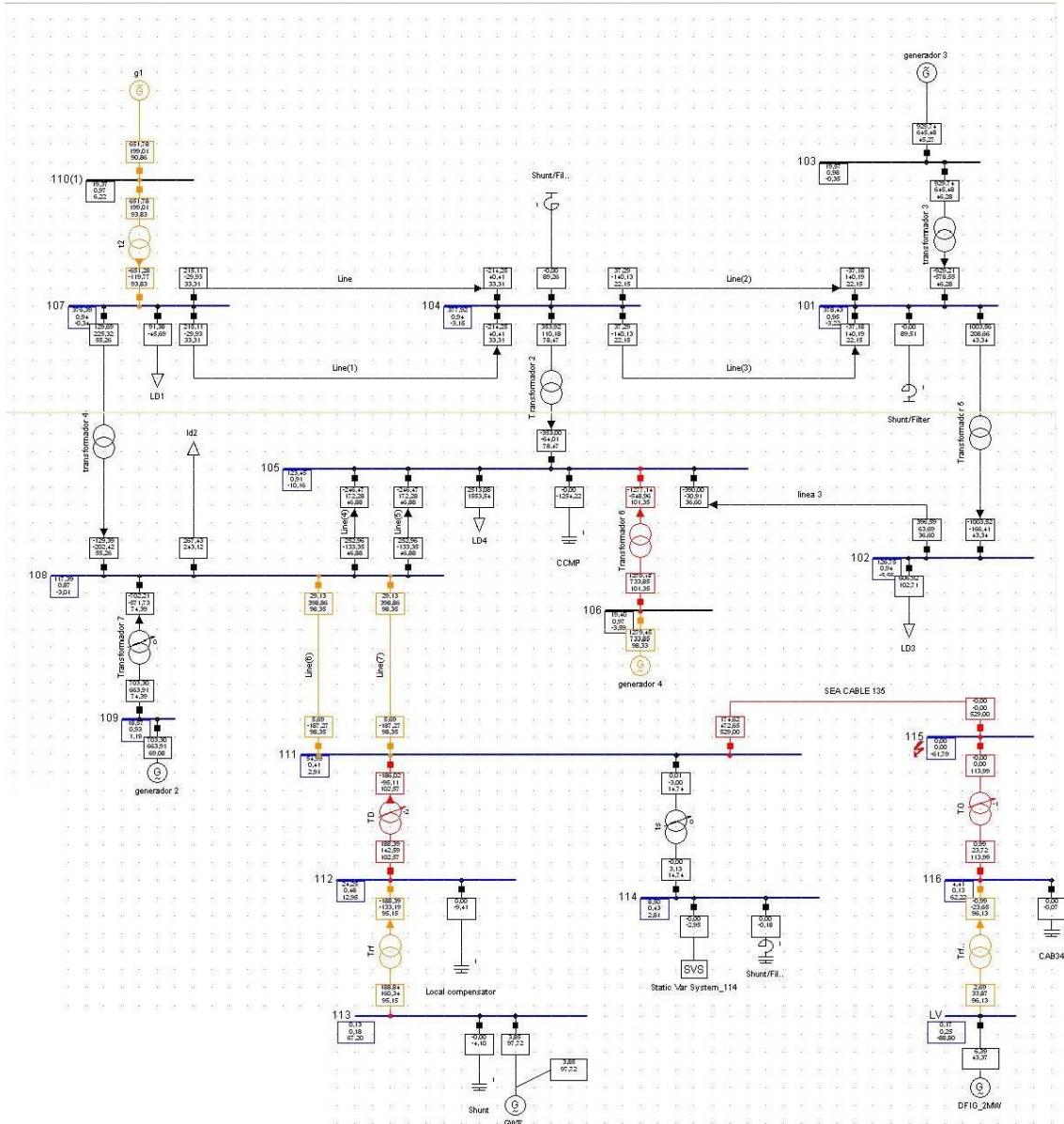


IMAGEN 2: FALTA NUDO 115 EN EL ESCENARIO 1

La siguiente imagen muestra la tensión en el nudo 115, en el que se produce la falta. El cortocircuito se simula en $t = 1$ s y tiene una duración de 150 ms. Se observa que la tensión residual durante el hueco es de 0 p.u. La tensión tras el despeje de la falta vuelve a su valor inicial.

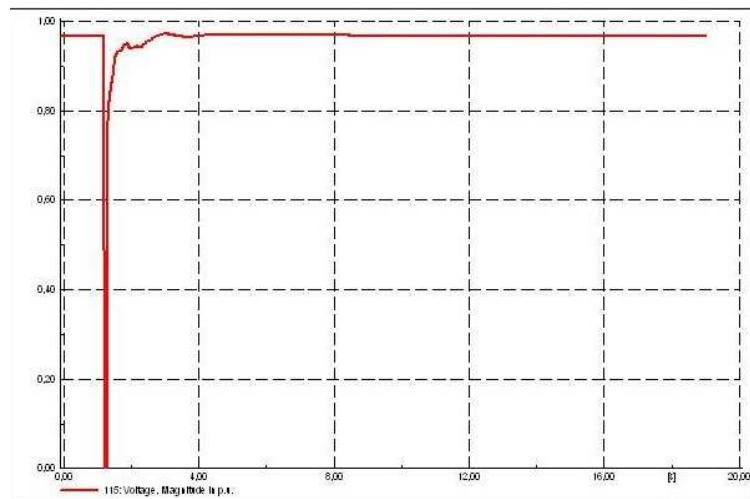


IMAGEN 3: TENSION 115 TRAS CORTOCIRCUITO

La siguiente figura muestra la potencia activa y reactiva generada por el parque eólico formado por generadores doblemente alimentados, cuyo punto de conexión a la red se corresponde con el nudo en falta.

En la figura se observa que, tras la falta, los niveles de potencia activa y reactiva se recuperan a sus valores iniciales, alrededor de 150MW y la reactiva a 0 Mvar.

Cuando se produce la falta se puede observar una disminución de la potencia activa puesto que la tensión cae y un aumento de la potencia reactiva consecuencia.

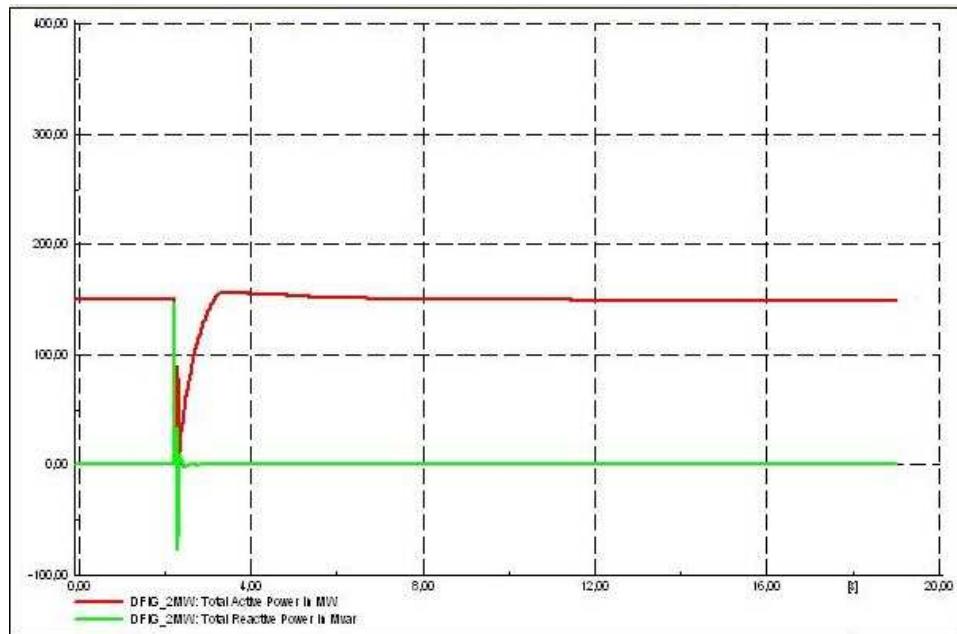


IMAGEN 4: Potencia activa (rojo) y reactiva (verde) del parque DFIG

En la siguiente figura se amplía la imagen entre el tiempo $t = 0.9$ s y $t = 3$ s para que se pueda apreciar lo que hace el parque durante la falta y en los instantes posteriores.

Tal y como se ha comentado en los requisitos de conexión, ante un hueco de tensión de las características que dichos requisitos establezcan, el parque eólico debe ser capaz de permanecer conectado a la red y aportar energía reactiva para ayudar a la recuperación del sistema. En la figura, se observa que, tras un primer transitorio al inicio del hueco de tensión, se produce un aumento en la potencia reactiva generada, cumpliendo así con lo esperado. La potencia activa se reduce drásticamente durante el hueco, pero en ningún momento es negativa, por lo que el parque no llega a consumir. Tras el hueco, los sistemas de control de los aerogeneradores deben ser capaces de devolver la potencia activa y reactiva hasta sus valores pre falta, como así se muestra en la imagen.

El control de potencia activa se realiza mediante el Control Pitch y la potencia reactiva se controla mediante el convertidor, éste está compuesto por dos partes: la parte del rotor y la del lado de red.

El convertidor en el lado del rotor controla el par de la máquina así como la reactiva, por otro lado el segundo, el convertidor del lado de red tiene la misión de mantener la tensión en el bus de continua y controlar la reactiva que existe entre la red y los terminales.

Según los resultados gráficos que se obtienen en la imagen podemos decir que ambos controles implementados en el parque eólico de aerogeneradores DFIG funcionan correctamente y nos garantizarán el servicio.

Ante un hueco de tensión en la red se produce un incremento de corriente en los devanados del estator, como el rotor y el estator están acoplados magnéticamente la corriente por los devanados del estator circulará también por el rotor, lo cual puede ser muy peligroso y causar daños.

Por esta razón, este tipo de aerogeneradores son incapaces de hacer frente de forma directa a huecos de tensión, lo cual nos lleva a tener que disponer de un equipamiento añadido denominado “crowbar activo”.

El “crowbar activo” consiste en provocar un cortocircuito a la salida del rotor conectando a través de tiristores, cuando se detecta un incremento de corriente, unas resistencias y convirtiendo el generador en uno de tipo jaula de ardilla.

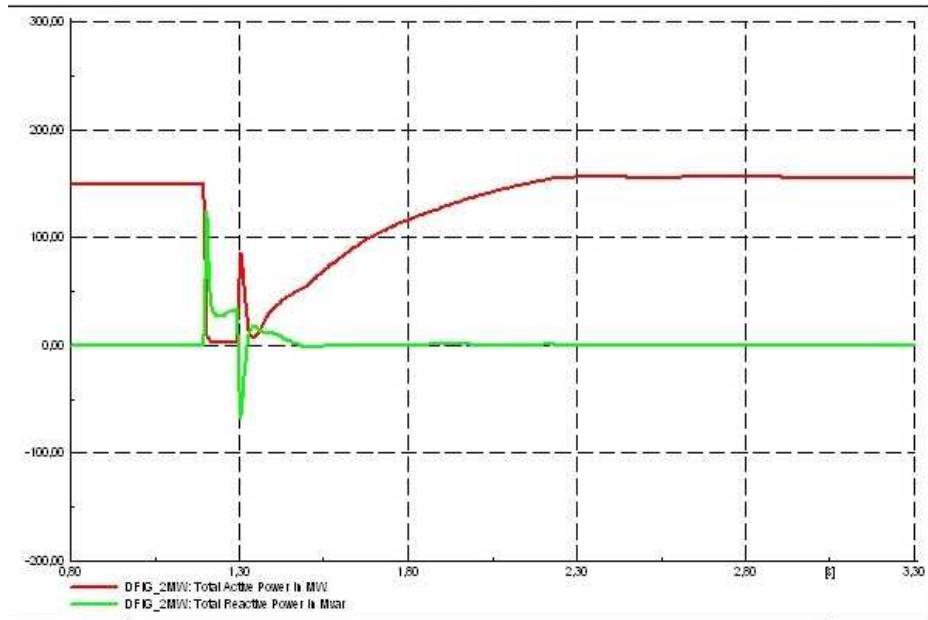


IMAGEN 5: CORTOCIRCUITO 115 AFECTA A DFIG

En este tipo de análisis es especialmente importante comprobar cómo pueden verse afectados los consumidores finales. Por ello, se analiza la tensión en los puntos de demanda de la red, es decir, aquellos en los que se conectan las cargas. En la figura se muestra la tensión en la carga LD4. La tensión se encuentra por debajo de los 0.9 p.u. por lo que se considera que se encuentra fuera del rango normal de operación.

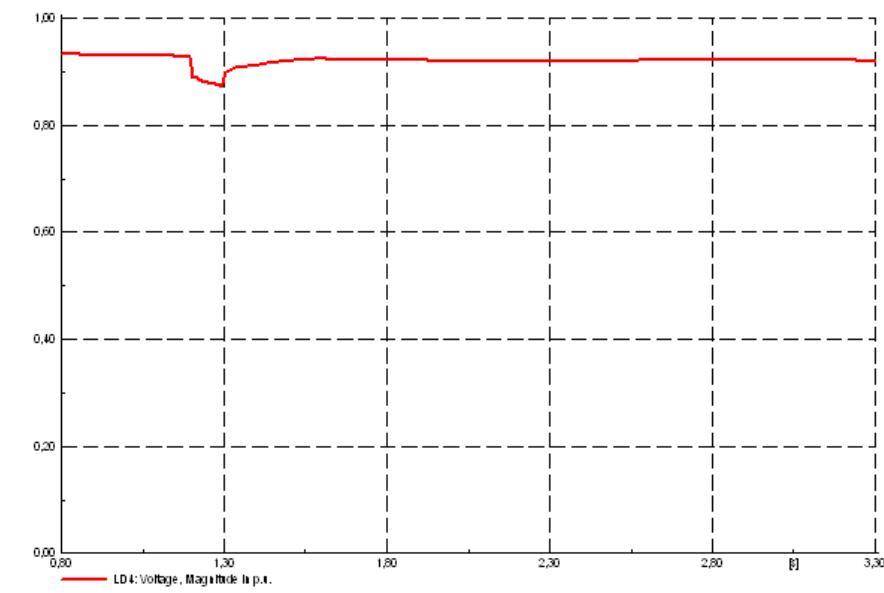


IMAGEN 6: TENSIÓN EN LA CARGA LD4

La siguiente figura muestra la potencia activa y reactiva en el parque eólico formado por aerogeneradores de jaula de ardilla. Este parque eólico no cuenta con sistemas de control que hagan frente a los huecos de tensión, por lo que no se espera que sea capaz de cumplir los requisitos de conexión en cuanto a continuidad de suministro. Además, los aerogeneradores de jaula de ardilla absorben energía reactiva en todo su rango de funcionamiento, por lo que es necesario dotarlos de sistemas de compensación de reactiva para que este consumo no afecte al resto del sistema. Esto se observa en la figura en la que antes y después de la falta, el parque eólico absorbe una potencia reactiva de unos 150 MW.

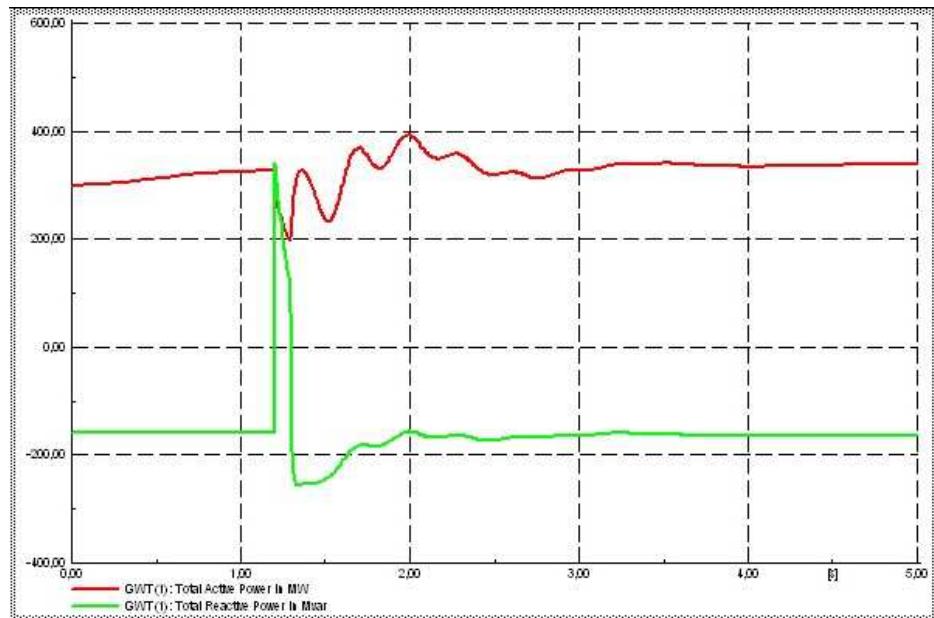


IMAGEN 7: JAULA DE ARDILLA AFECTADO POR CORTOCIRCUITO NUDO 115

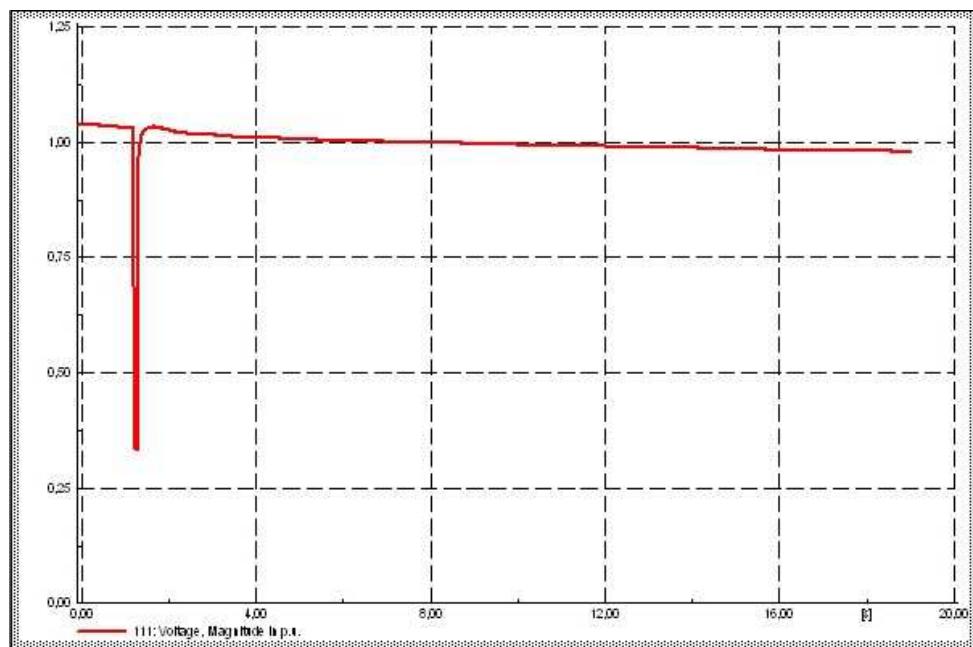


IMAGEN 8: NUDO 111 AFECTADO POR CORTOCIRCUITO NUDO 115

Tal y como muestra la imagen 8, el cortocircuito en el nudo 115 provoca un importante hueco de tensión en el nudo 111 al cual está conectado el parque eólico de jaula de ardilla, como la tensión es inferior a 0,85 p.u y al no disponer de sistemas de control que sean capaces de asimilar el hueco de tensión, el parque eólico debería desconectar aunque los sistemas de protección no han sido modelados.

1.2.2. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 111

La siguiente imagen muestra la red durante el proceso de la falta.

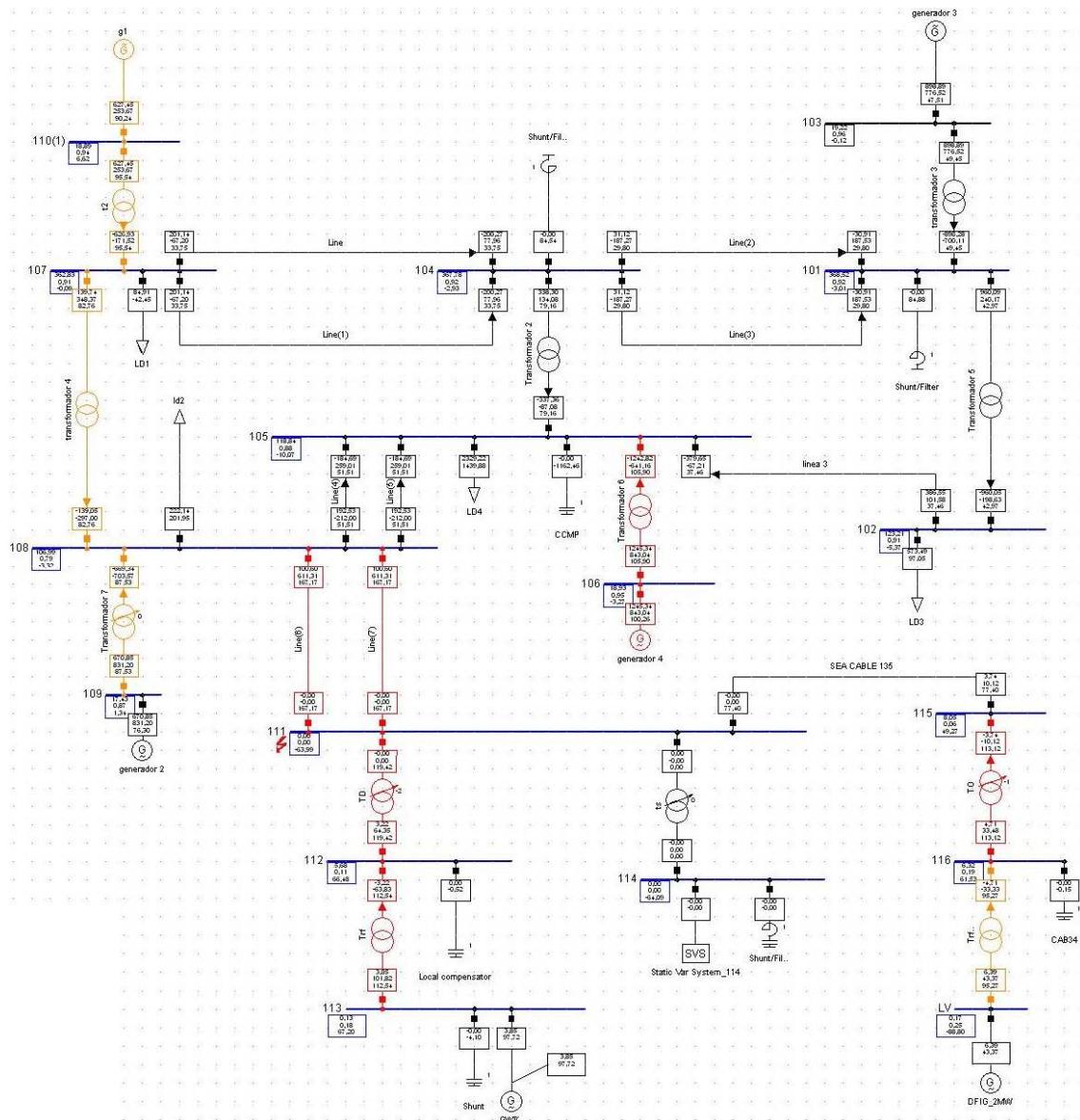


IMAGEN 9: CORTOCIRCUITO AFECTA A NUDO 111

El cortocircuito como en el caso anterior es un desequilibrio trifásico de 150 ms, simulado en el instante 1s para ver lo que le ocurre a la red en el instante previo a la falta y en el posterior.

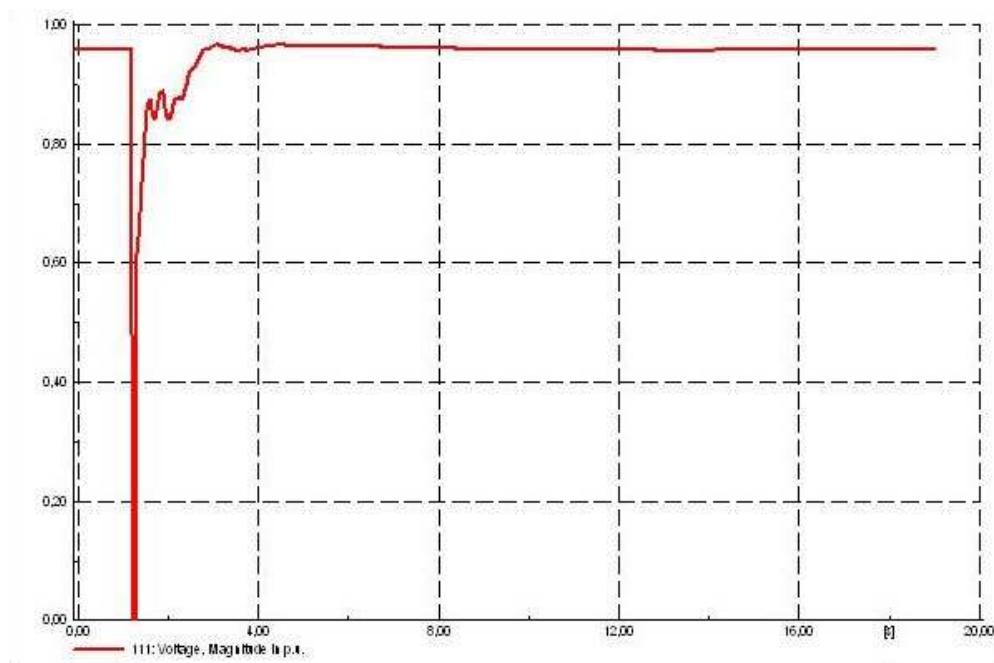


IMAGEN 10: CORTOCIRCUITO AFECTA A NUDO 111 TENSIÓN

La tensión en el momento de la falta cae a 0 p.u. y tras el despeje se sitúa en su valor inicial.

La siguiente figura muestra la tensión en el nudo 115, nudo al que está conectado el parque eólico DFIG, como se observa la tensión residual durante el hueco es inferior al 20 % marcado por la normativa, lo cual indica que la instalación no cumple los requisitos de conexión.

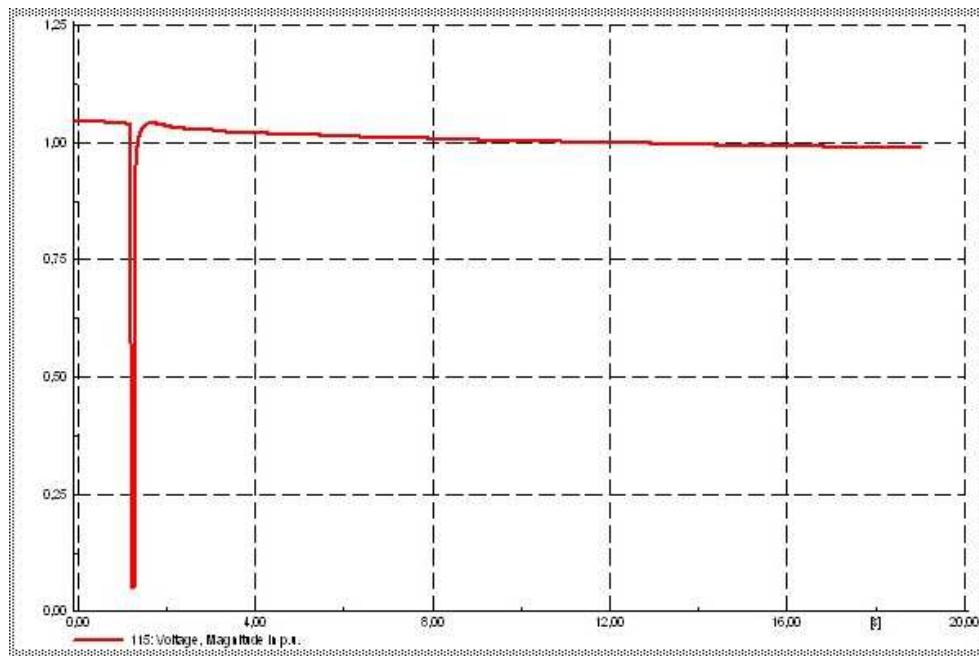


IMAGEN 11: CORTOCIRCUITO NUDO 111 AFECTA A NUDO 115

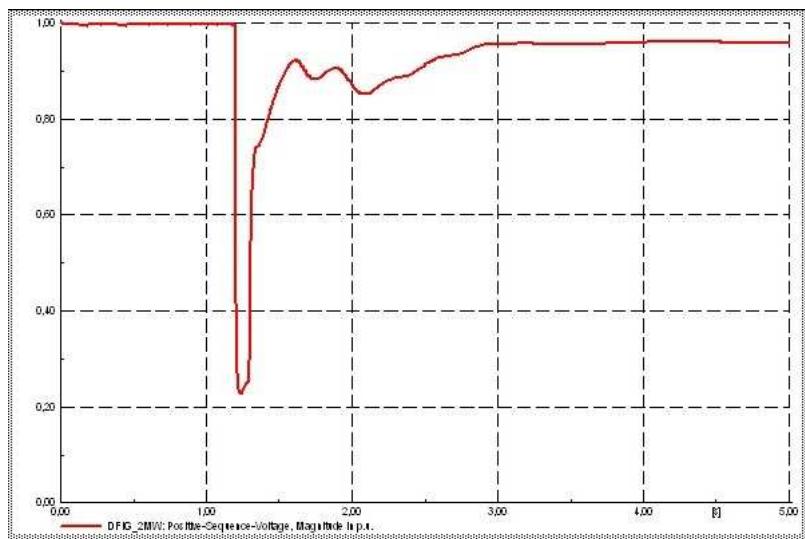


IMAGEN 12: HUECO DE TENSIÓN DFIG TRAS CORTOCIRCUITO NUDO 111

La siguiente figura muestra la potencia activa y reactiva generada por el parque eólico formado por generadores doblemente alimentados, cuyo punto de conexión a la red se corresponde con el nudo 115. El comportamiento y la cantidad de potencia reactiva generada durante el hueco de tensión dependen de la profundidad, por lo que en este caso la reactiva es algo menor. De nuevo, tras el hueco de tensión, la potencia activa y reactiva vuelven a sus valores iniciales.

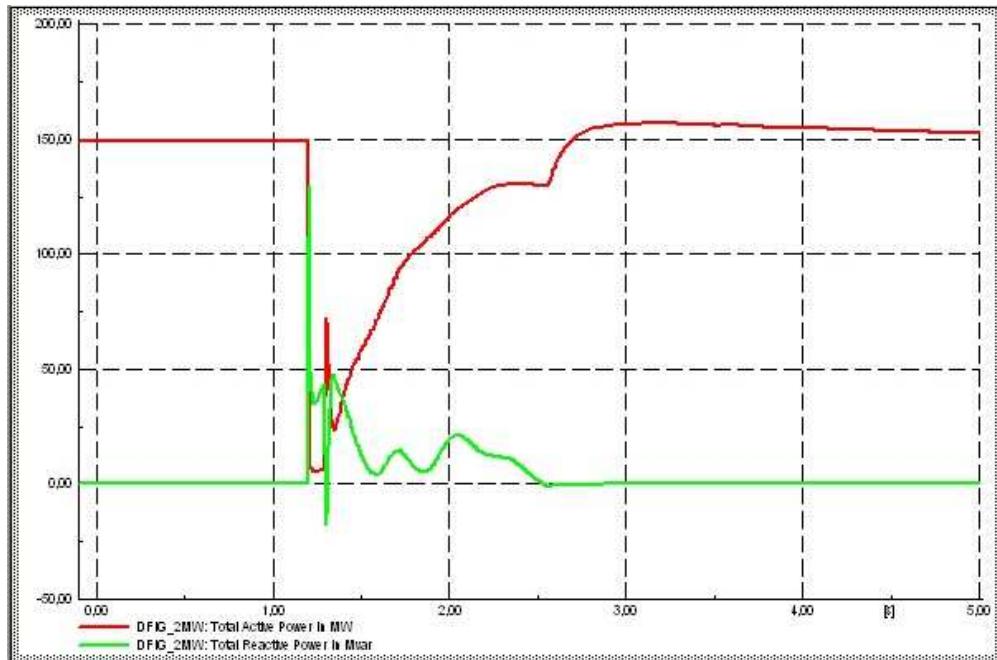


IMAGEN 13: CORTOCIRCUITO NUDO 111 AFECTA A DFIG

En lo que respecta a la carga, como en el caso anterior, el hueco es poco pronunciado no llegando apenas a percibir la falta.

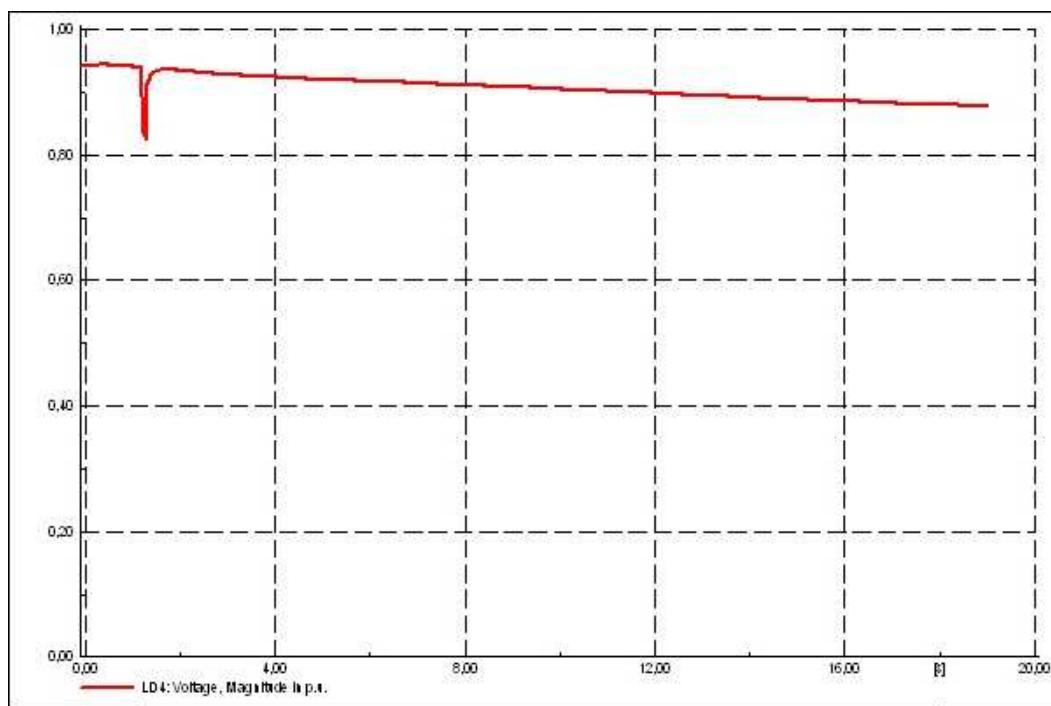


IMAGEN 14: CORTOCIRCUITO 111 AFECTA A CARGA LD4

El parque eólico de Jaula de Ardilla presenta unos valores diferentes al caso anterior, en este caso el pico de reactiva generado es más elevado llegando a valores de 500 MVar y la potencia activa cae a cero en la falta.

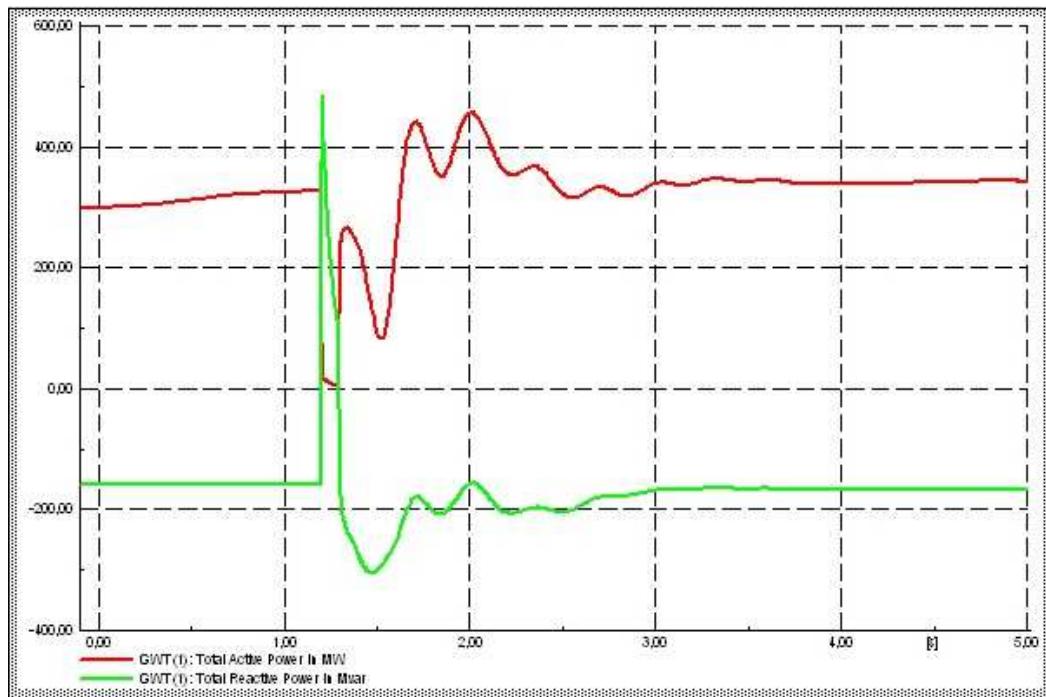


IMAGEN 15: CORTOCIRCUITO 111 AFECTA A PARQUE EÓLICO JAULA ARDILLA

1.2.3. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 105

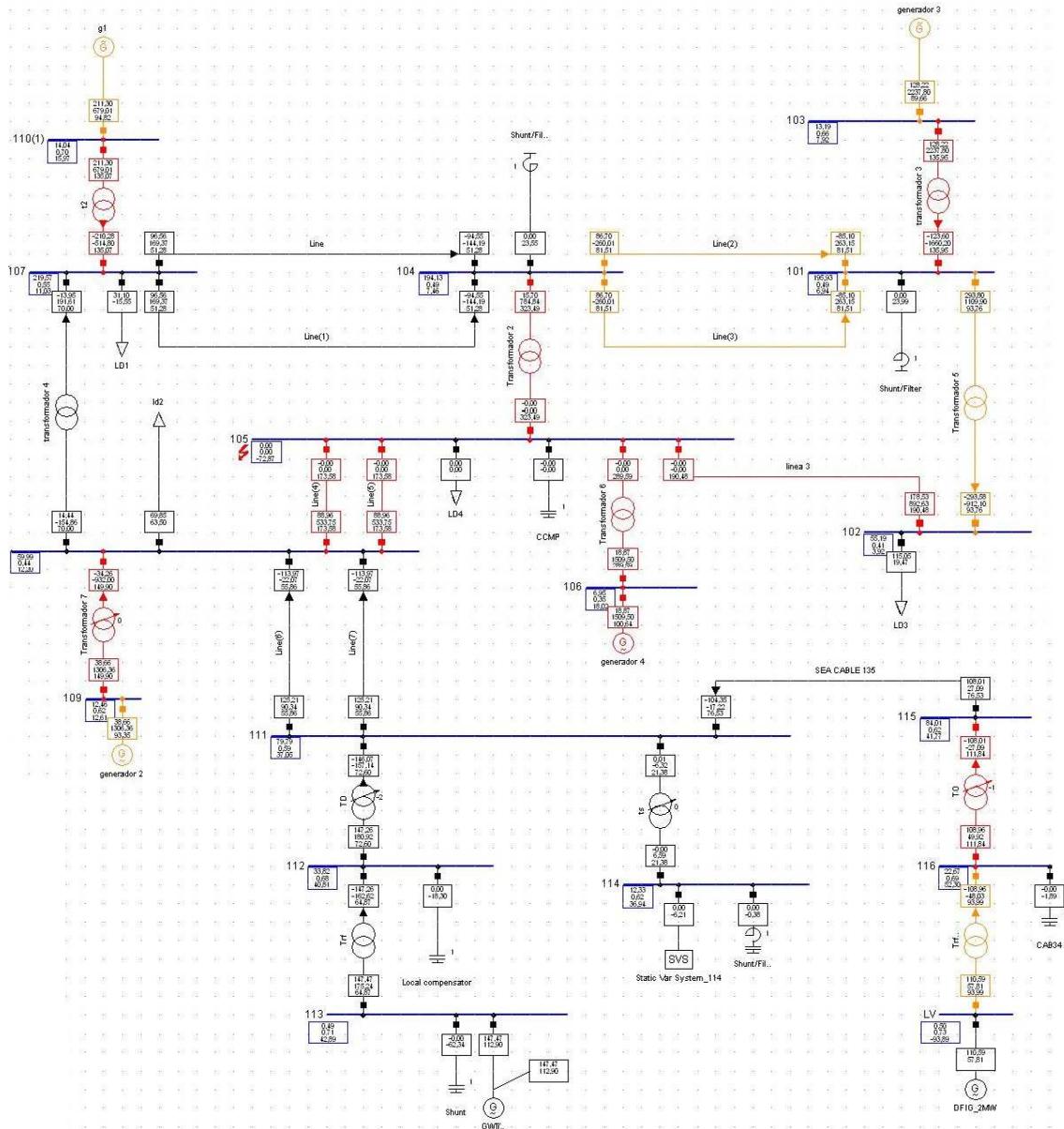


IMAGEN 16: CORTOCIRCUITO NUDO 105

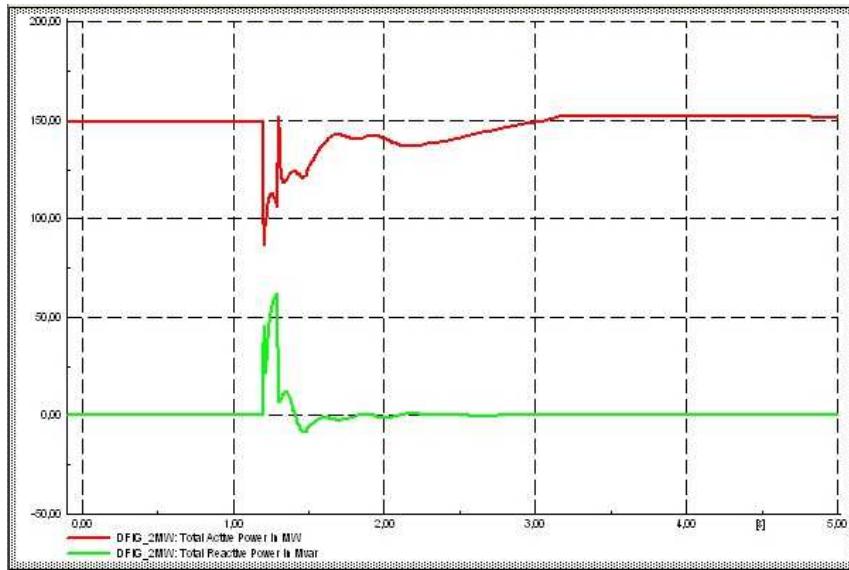


IMAGEN 17: CORTOCIRCUITO 105 AFECTA A DFIG

El cortocircuito del nudo 105 como podemos observar en la imagen 17 afecta en menor manera al parque eólico DFIG, presentando valores de activa y de reactiva inferiores a los calculados para los cortocircuitos anteriores.

La carga en este caso al estar conectada al nudo en falta se queda sin tensión, por lo tanto el cliente se quedará sin servicio, posterior al despeje de la falta el servicio se restablece.

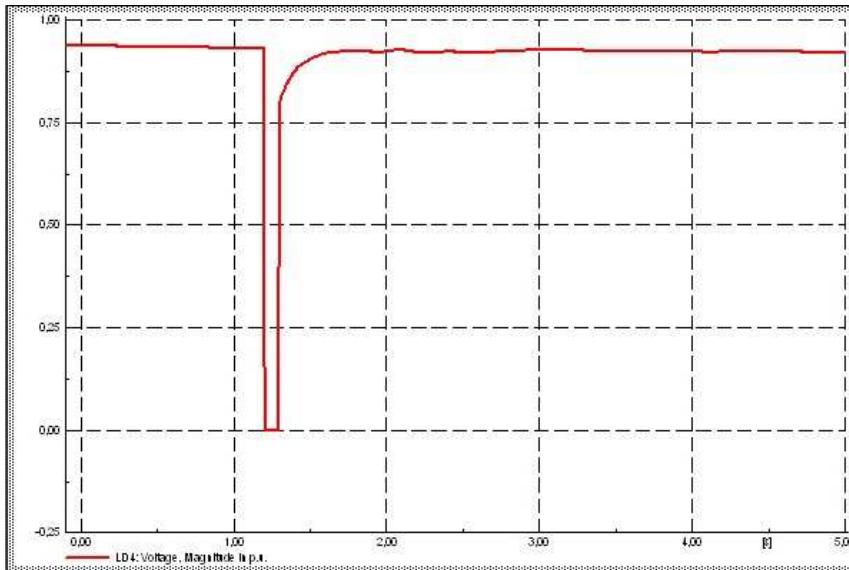


IMAGEN 18: CORTOCIRCUITO NUDO 105 AFECTA A CARGA LD4 TENSIÓN

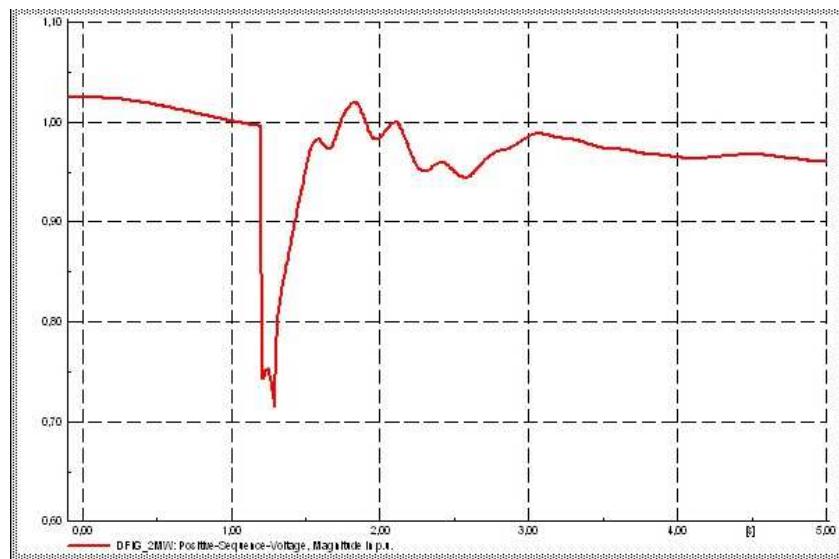


IMAGEN 19: CORTOCIRCUITO NUDO 105 AFECTA A DFIG TENSIÓN

La imagen anterior muestra gráficamente cómo afecta el cortocircuito al DFIG, en la imagen y como en los casos anteriores la profundidad del cortocircuito no supera el límite inferior de 0.2 p.u. por lo tanto cumple la legislación.

2. ESCENARIO 2: RED CON PARQUE JAULA ARDILLA EN SERVICIO

2.1. ANÁLISIS ESTACIONARIO.

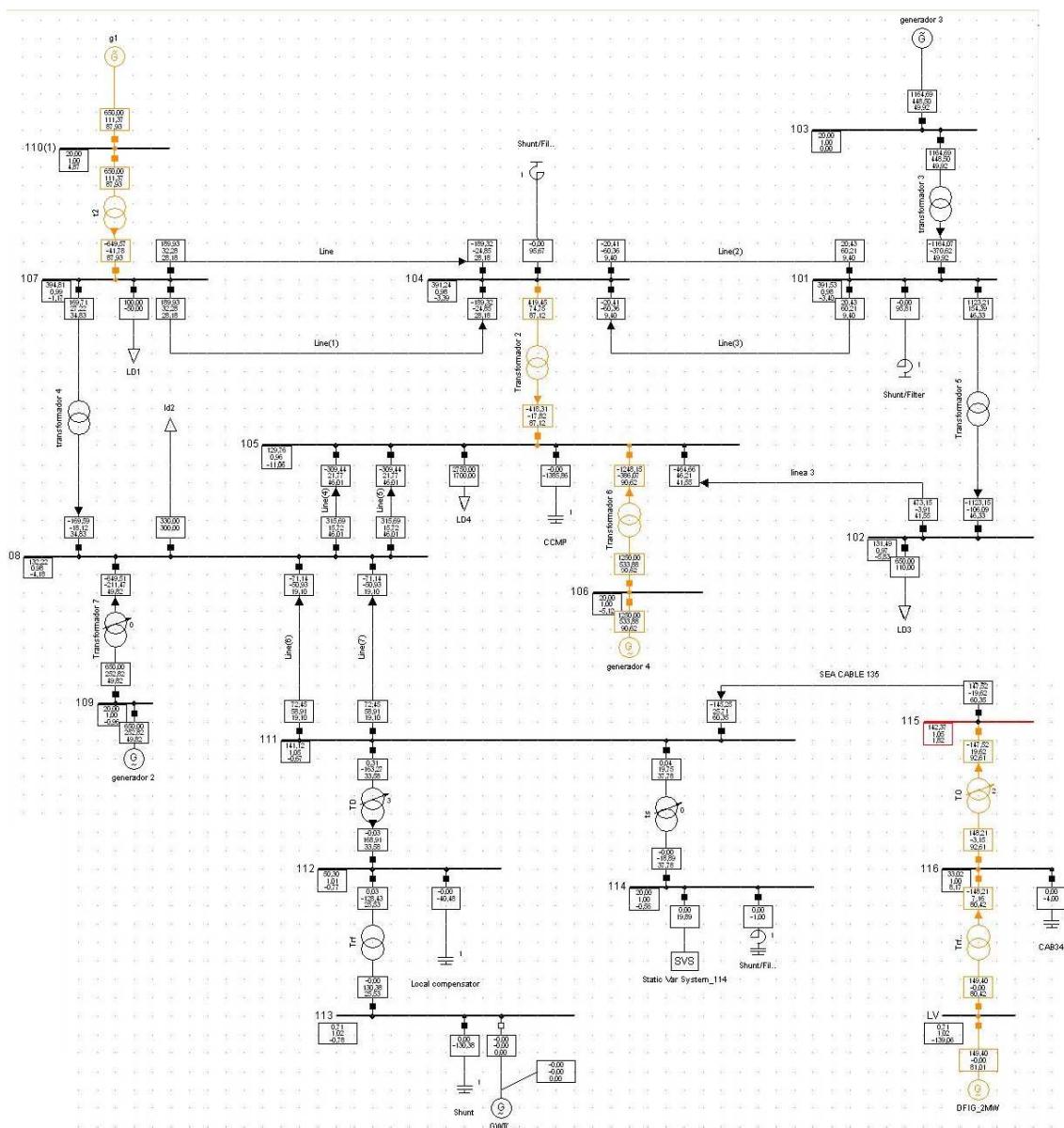


IMAGEN 20: FLUJO DE CARGAS SIN JAULA

Como se puede observar en la imagen anterior el parque de Jaula de Ardilla se encuentra fuera de servicio, ante su ausencia el flujo de potencias no desequilibra en demasía la red, los elementos marcados de color naranja son consecuencia normal ya que son los generadores

que tienen que hacer frente a la ausencia del parque de jaula de ardilla para compensar la demanda y su respectivo transformador.

2.2. ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis dinámico sólo voy a analizar el nudo 111 ya que es el que directamente le afecta la ausencia del parque de Jaula de ardilla.

2.2.1. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL NUDO 111

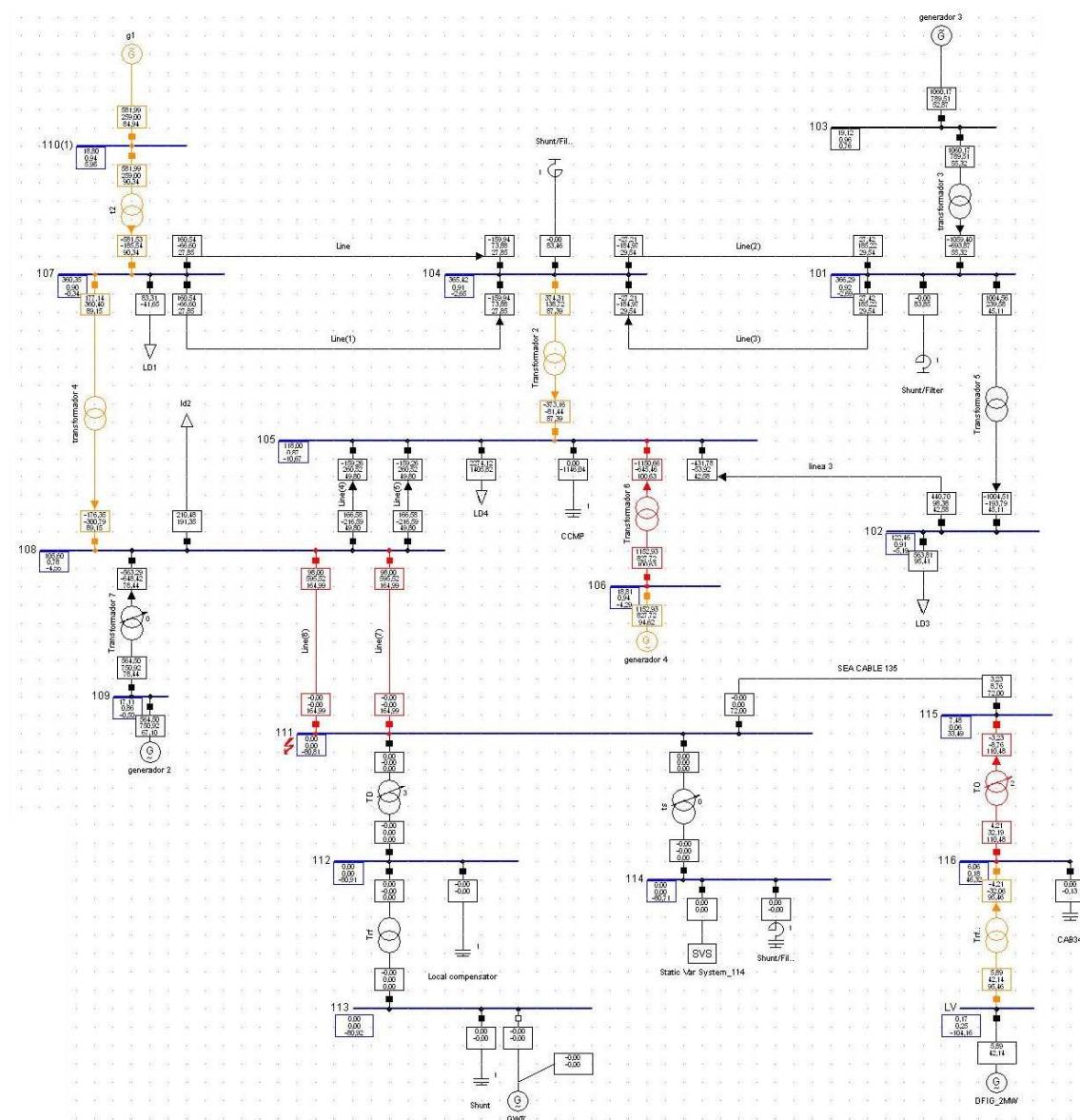


IMAGEN 21: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA DE ARDILLA

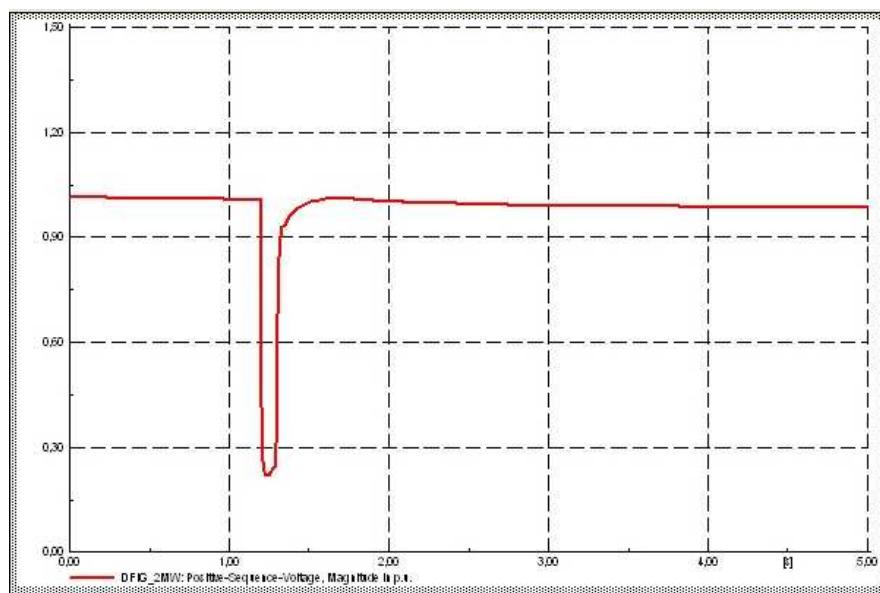


IMAGEN 22: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG TENSIÓN

Si comparamos esta gráfica con la imagen 13, observamos que en este caso la profundidad del hueco de tensión es más pronunciada, sin embargo los valores del hueco siguen dentro de los límites marcados para la instalación, por lo tanto cumple con la normativa.

La carga en este caso se ve afectada por el hueco de tensión, presentando un comportamiento anormal fuera de rango.

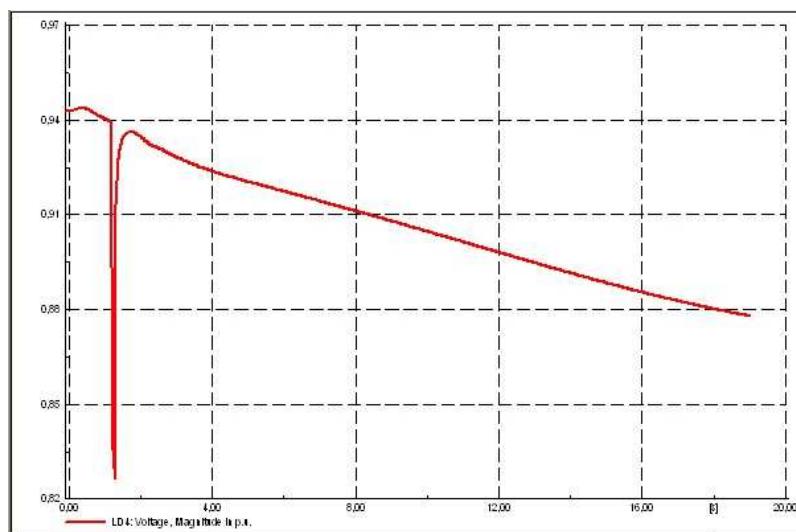


IMAGEN 23: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A LD4

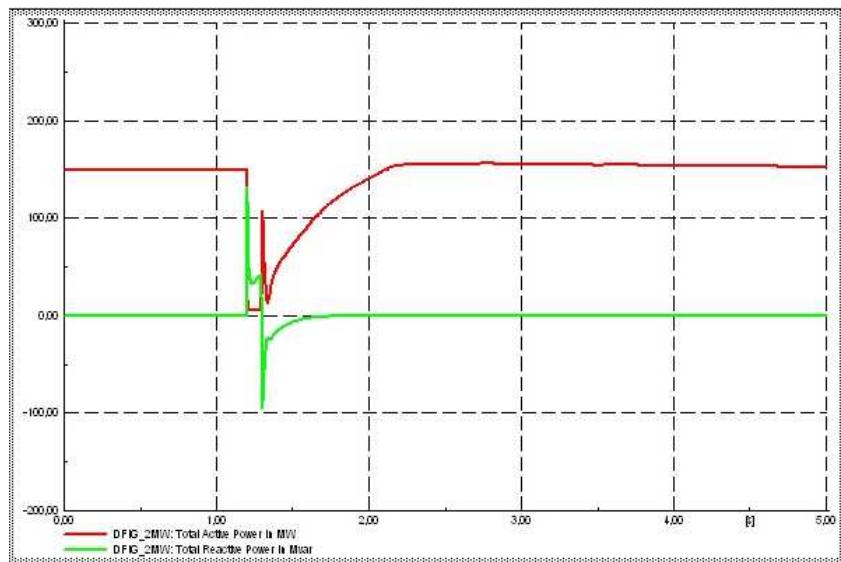


IMAGEN 24: CORTOCIRCUITO NUDO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG

En la siguiente imagen se muestra la tensión en el punto de conexión del parque de aerogeneradores DFIG, como se observa en este caso la tensión no es inferior al umbral de 0.2 p.u marcado por la normativa, por lo tanto para este caso la instalación cumpliría la normativa.

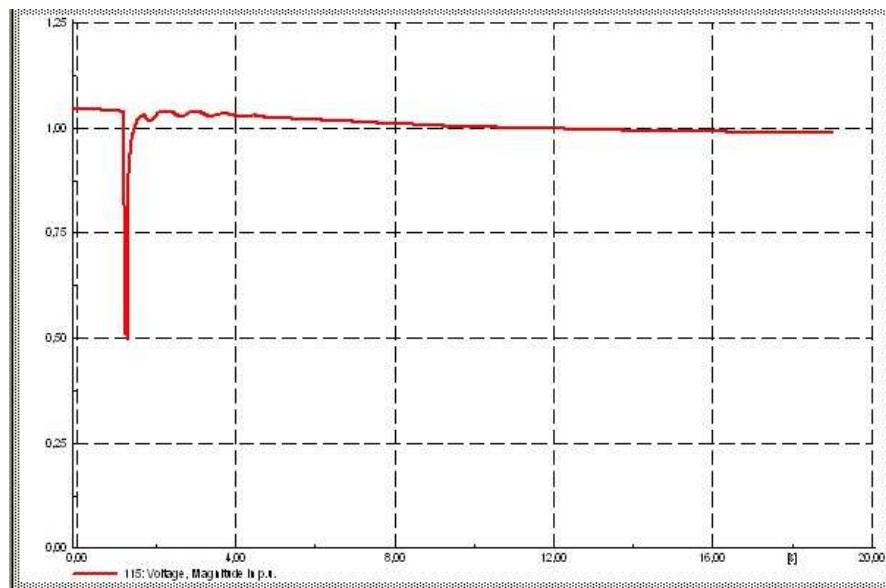


IMAGEN 25: CORTOCIRCUITO 111 SIN JAULA AFECTA A DFIG TENSION