

## **10. Regulación de potencia reactiva con perturbaciones de tensión de larga duración.**

### **10. Regulación de potencia reactiva con perturbaciones de tensión de larga duración.**

Aunque este documento está centrado en la evaluación de las faltas de tensión transitorias, existe también una normativa específica para perturbaciones de escasa magnitud pero de larga duración. En estos casos, lo que se establece es que la instalación debe aportar una cierta potencia reactiva, ya sea impuesta por el operador de red, o bien, en función de alguna regla con respecto a la tensión de red. Como se puede apreciar, las bases de actuación son parecidas, aporte de potencia reactiva para controlar la tensión de red, con la salvedad de que no se paraliza la inyección de potencia activa en la red.

Este tipo de medidas se aplican en multitud de países como España, Italia, USA... y suelen depender de las exigencias del operador de red y las características del estado de la red eléctrica en el punto de conexión a red (PCC).

A continuación expondremos un estudio del comportamiento de estas medidas sobre una instalación fotovoltaica de  $300MW$  en Arabella, Estados Unidos. Para ello elaboraremos una simulación en el entorno de simulación PSCAD v4.2 y detallaremos los resultados obtenidos.

#### **10.1. Ejemplo de aplicación.**

Arabella es una central eléctrica de  $300MW$  donde está planificado instalar cientos de inversores fotovoltaicos de gran potencia. Los inversores están situados en un área extensa, y el punto de conexión a la instalación está al otro extremo de una línea de transmisión muy larga (cientos de kilómetros), lo que representa una gran impedancia entre la conexión de la subestación de  $345KV$  y la estación de Arabella. Así que, el sistema de control debe compensar los efectos de esta línea de transmisión con la inyección de potencia reactiva.

Existen dos posibilidades para inyectar la potencia reactiva requerida, o bien, utilizar un compensador paralelo en el punto de conexión a red, o bien, utilizar un método de generación distribuida entre cada uno de los inversores de la instalación. Ambos métodos son válidos, y se puede obtener una respuesta parecida en el punto de conexión a red. Si bien, la solución más económica es la generación distribuida de potencia reactiva, la utilización de un compensador paralelo representa menor complejidad en el control de la planta y la reactiva generada.

En la instalación de Arabella se optó por considerar la opción de una generación distribuida. El objetivo final será pues, conseguir esta potencia reactiva mediante el aporte individual de una cierta cantidad por cada inversor.

### 10.1 Ejemplo de aplicación.

En una primera aproximación, el modelo de la planta solar ha sido dividido en ocho subbloques, cada uno de  $37,5MW$  de capacidad de generación, y se ha utilizado un modelo de línea RL entre los buses de generación (conexiones con los módulos fotovoltaicos) y los transformadores  $345KV/34,5KV$ . Finalmente, se ha utilizado un modelo  $\pi$  para la línea de transmisión que llega a la estación.

Para una simulación más precisa, el transformador T4 y sus ocho alimentadores han sido modelados en detalle, incluyendo una línea de impedancia para cada uno de ellos. Los alimentadores están conectados a un modelo equivalente de inversor PV que concentra la generación de todos los inversores que incluye. En una segunda aproximación, el octavo alimentador de T4 ha sido modelado en detalle, considerando diez transformadores de  $1MW$  de  $34,5KV/240V$  (con impedancias RL entre ellos). Finalmente, cada transformador tiene conectado un modelo ideal de un inversor PV de  $1MW$ , y uno de ellos tiene dos PVs de  $500KW$  en paralelo. Un esquema unifilar de la arquitectura propuesta es mostrado en la figura 138.

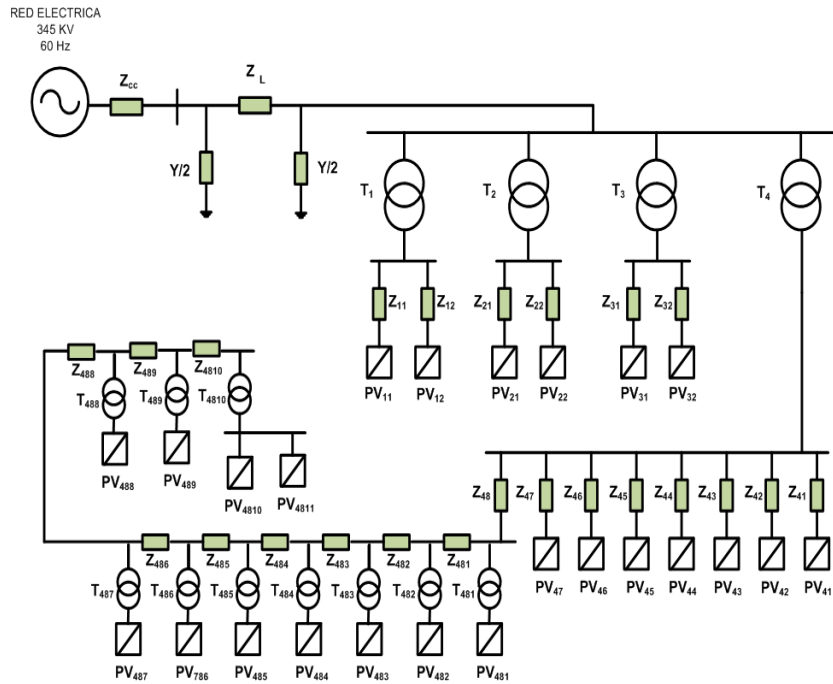


Figura 138: Esquema unifilar del modelo de la planta Arabella.

Por otra parte, es necesario un modelo equivalente de la red de  $345KV$  para poder establecer una relación entre la generación de potencia reactiva y la variación de la tensión en el bus. Se ha considerado un modelo conservador de una fuente ideal de tensión de  $345KV$  y su correspondiente inductancia de cortocircuito de  $2000MVA$ .

## 10.2 Especificaciones.

### 10.2. Especificaciones.

El controlador principal del sistema tiene que compensar las perturbaciones de tensión para garantizar la estabilidad de la línea de tensión en el punto de conexión de la planta. Por ello, debe fijar una referencia de potencia reactiva a los inversores, en orden para incrementar o disminuir la tensión del bus de  $345KV$ .

Este control está limitado en un rango de actuación del  $\pm 0,95$  factor de potencia en el punto de conexión. Sin embargo, cada inversor es capaz de generar  $550MVA$  a plena carga, lo que representa unos  $230KVAr$  por cada uno. Así que la capacidad total de la planta está en unos  $330MVA$ . En caso de hueco de tensión o baja generación de potencia activa, cada inversor sería capaz de aportar aproximadamente  $550MVAr$ , e incluso más si se considera sólo un corto espacio de tiempo.

El hecho de que la planta en su conjunto tenga un determinado factor de potencia no implica que todos los PVs individualmente deban tener el mismo factor de potencia. Aquellos inversores que generen una potencia activa menor alcancen la saturación de potencia reactiva inyectada a red más tarde que los que están produciendo más. Así que el perfil del factor de potencia a lo largo de toda la planta no tiene por qué ser plano cuando se requiere un aporte de reactiva importante.

Las especificaciones requeridas al sistema se muestran en la tabla 3.

Característica	Unidad	Valor
Potencia activa nominal	$MW$	300
Tensión de línea en PCC	$KV$	345
Sobretensión máxima	$p.u.$	1,1
Subtensión mínima	$p.u.$	0,9
Factor de potencia capacitivo máximo	$p.u.$	0,95
Factor de potencia inductivo máximo	$p.u.$	-0,95

Tabla 3: Especificaciones del sistema Arabella.

### 10.3. Técnica de control.

El sistema tiene dos controles. El primero, en el punto de conexión de la red eléctrica, en donde se situará un controlador con efecto integrativo. Este controlador genera una referencia de potencia reactiva para poder seguir la referencia de tensión. Esta referencia de potencia reactiva es enviada a todos los inversores. Para no exceder el factor de potencia límite, se ha introducido un nivel de saturación en el controlador integrativo, así que la referencia es truncada cuando alcanza su valor máximo permitido.

El segundo controlador está en el nivel de cada inversor, en donde combinamos la referencia general con el algoritmo de control local. Basicamente, el inversor fotovoltaico permite seguir una referencia de potencia activa marcada por un algoritmo de extracción de máxima potencia de paneles solares (algoritmo MPPT). De forma simultánea, la referencia externa de potencia reactiva también se sigue. Pero esta referencia tiene un punto de saturación, que en el caso de ser alcanzado a la vez en varios inversores, el control central subirá la referencia de potencia reactiva para que otros inversores aporten el resto. Un diagrama de bloques completo del sistema de control y su interacción con la planta es mostrado en la figura 139.

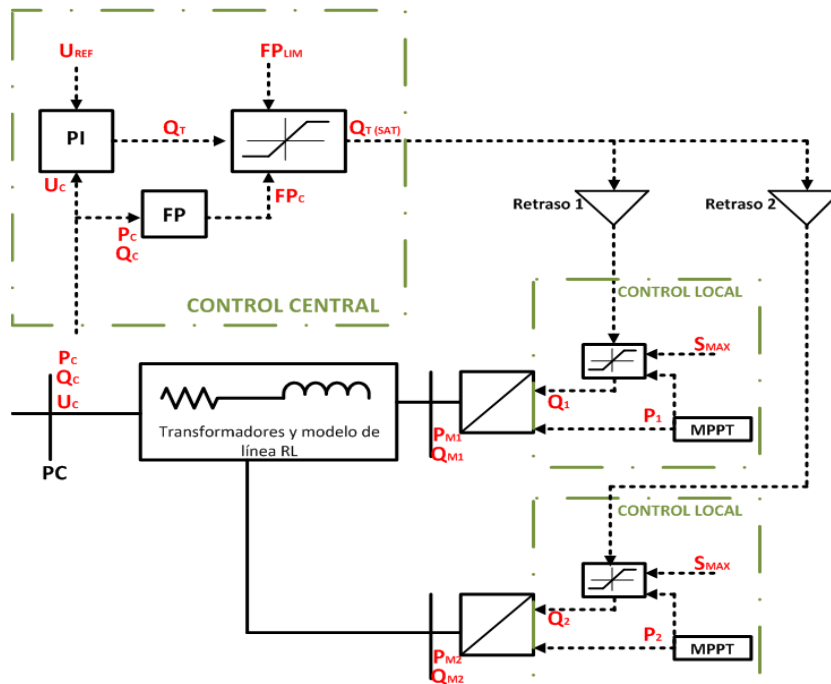


Figura 139: Diagrama de bloques del control de reactiva de Arabella.

#### 10.4. Resultados.

El sistema bajo estudio será testeado en algunas de las situaciones extremas dentro del estado de operación normal de la planta, y con posterioridad se comentarán los resultados obtenidos.

Se han simulado dos perturbaciones de larga duración (100 segundos) para poder evaluar la respuesta del sistema ante sub y sobretensiones (se han asumido los valores límite de las especificaciones de la tabla 3, tensiones de  $0,9p.u.$  y  $1,1p.u.$ ). En la figura 140 se muestra el perfil de tensión impuesto en la red.

*Nota: En los próximos resultados mostrados, todas las medidas han sido realizadas considerando el flujo de potencia desde la planta solar hacia la red eléctrica, así que el signo de la potencia reactiva viene impuesto por este factor.*

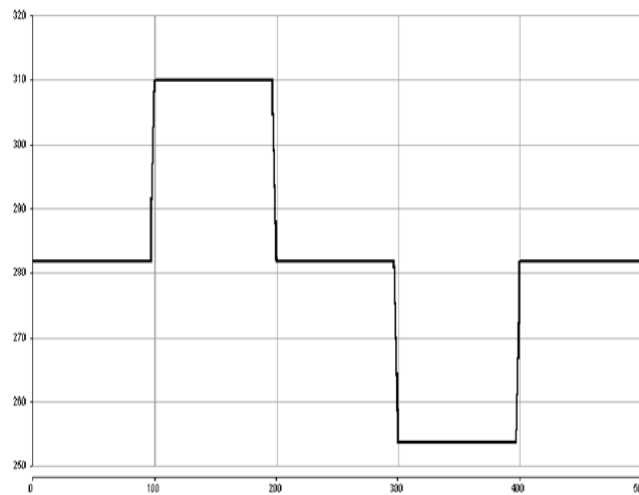


Figura 140: Arabella. Perfil de tensión impuesto para la prueba.

## 10.4 Resultados.

### 10.4.1. Sistema sin control de reactiva.

En primer lugar introduciremos la respuesta del sistema si no existe ningún tipo de control de reactiva. Esto simplificará la posterior evaluación del sistema de control. Las próximas figuras muestran los resultados obtenidos en esta situación. En la figura 141 y 142 se muestran las potencias y tensiones registradas para sub y sobretensiones en un diagrama unifilar. Después, en las figuras 143 a 148 se muestran las repuestas transitorias de algunos puntos de la instalación.

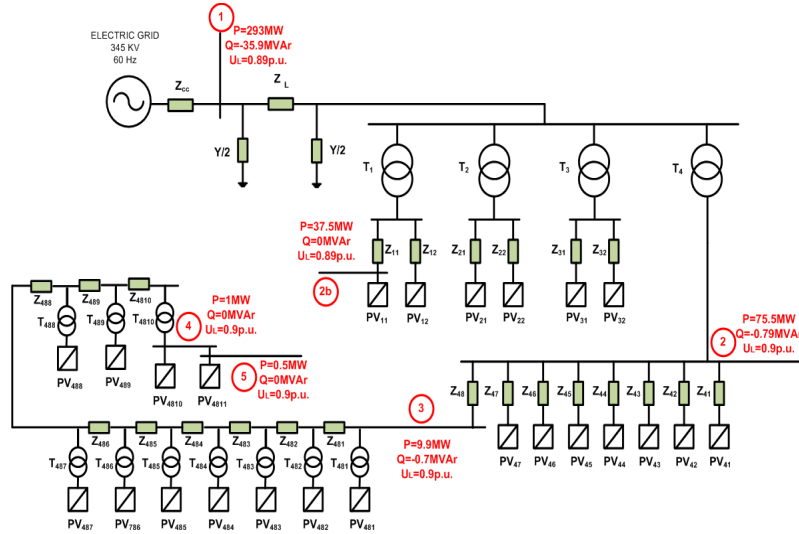


Figura 141: Arabella. Caso 1.  $V = 0,9 \text{ p.u.}$  Potencias y tensiones en la instalación.

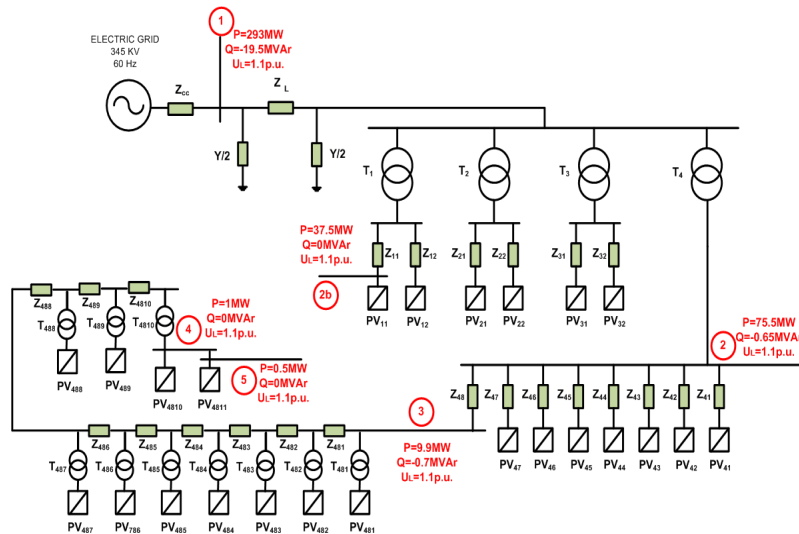


Figura 142: Arabella. Caso 1.  $V = 1,1 \text{ p.u.}$  Potencias y tensiones en la instalación.

## 10.4 Resultados.

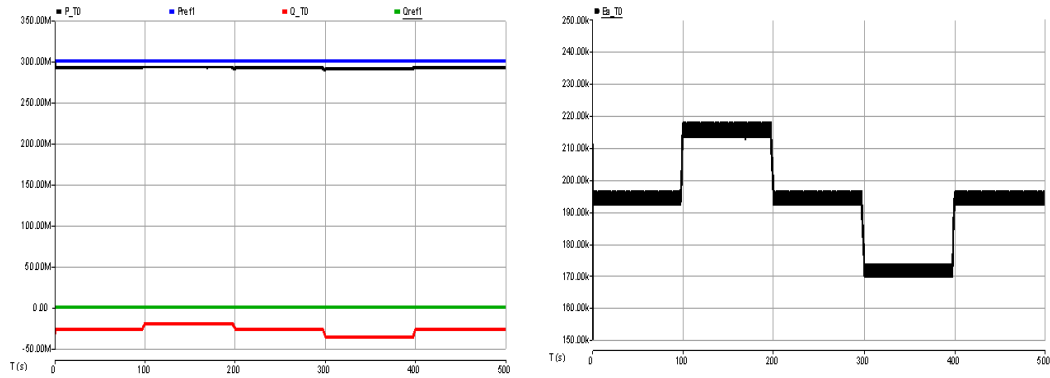


Figura 143: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 1.

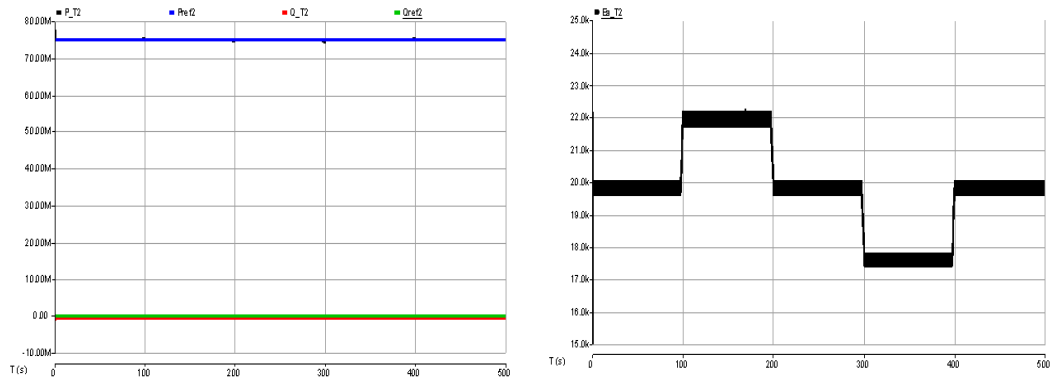


Figura 144: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 2.

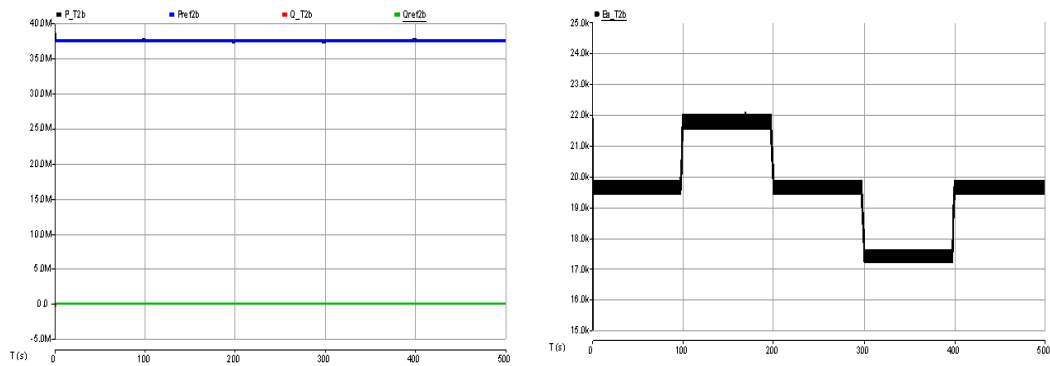


Figura 145: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 2b.

## 10.4 Resultados.

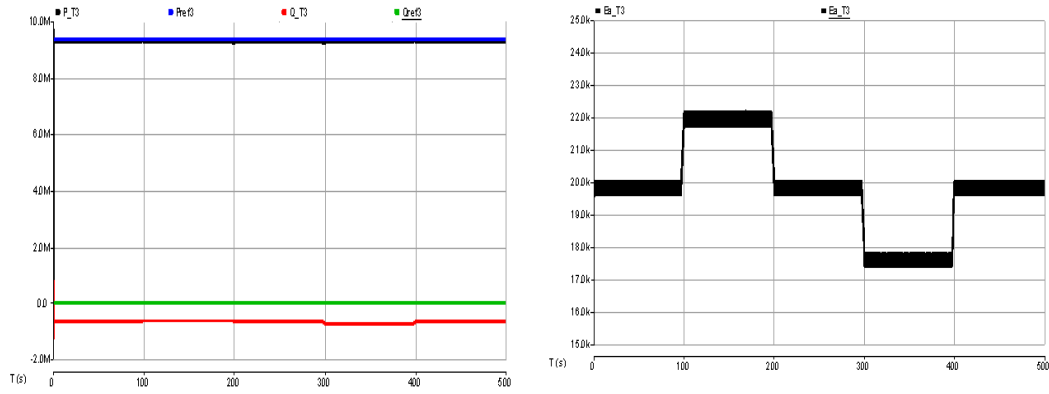


Figura 146: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 3.

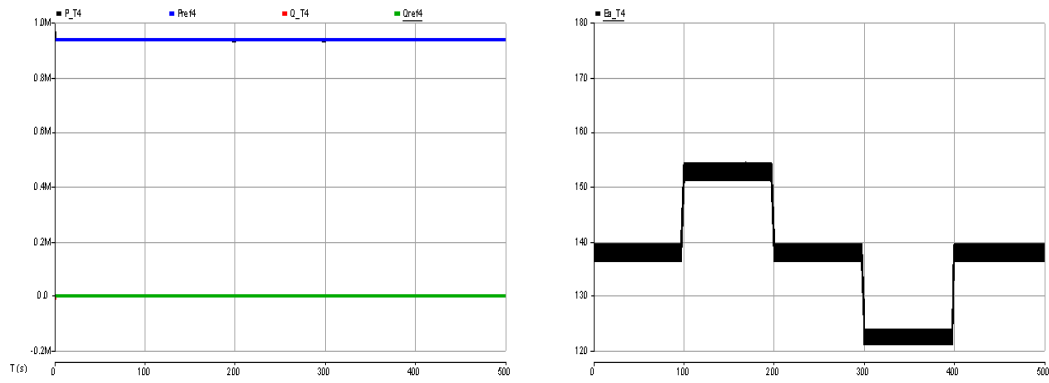


Figura 147: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 4.

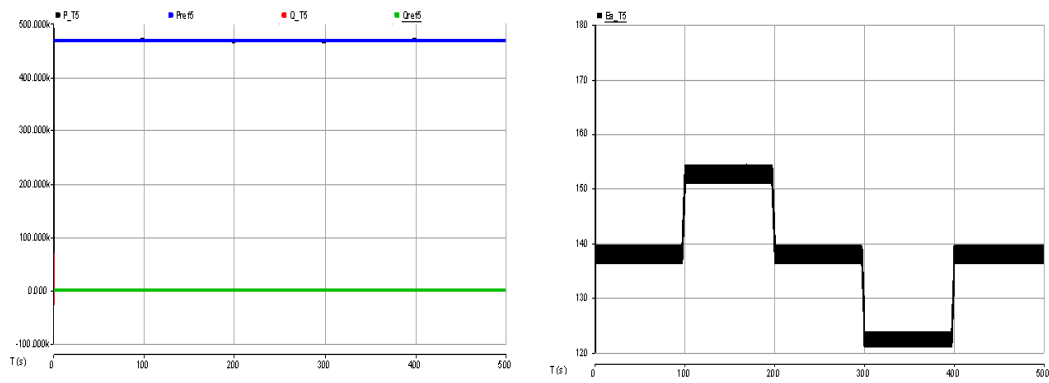


Figura 148: Arabella. Caso 1. Potencias y tensiones en el punto 5.



## 10.4 Resultados.

### 10.4.2. Sistema con control de reactiva a plena carga.

En primer lugar introduciremos la respuesta del sistema si no existe ningún tipo de control de reactiva. Esto simplificará la posterior evaluación del sistema de control. Las próximas figuras muestran los resultados obtenidos en esta situación. En la figura 141 y 142 se muestran las potencias y tensiones registradas para sub y sobretensiones en un diagrama unifilar. Después, en las figuras 143 a 148 se muestran las repuestas transitorias de algunos puntos de la instalación.

En este caso introduciremos el algoritmo de control propuesto con la instalación a plena carga y observaremos los resultados. De nuevo, se muestra un resumen en las figuras 149 y 150, y de forma más detallada en las figuras 151 a 156.

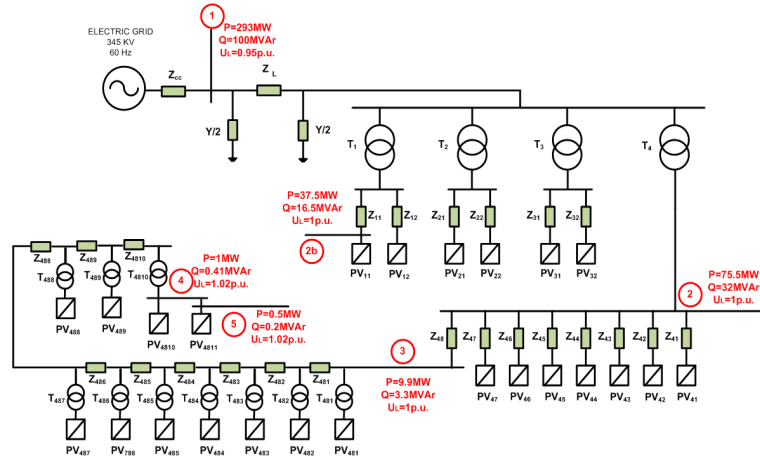


Figura 149: Arabella. Caso 2.  $V = 0,9p.u.$  Potencias y tensiones en la instalación.

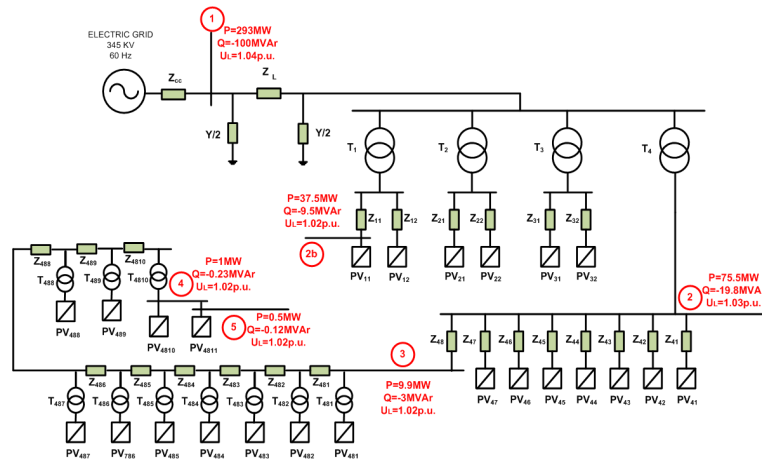


Figura 150: Arabella. Caso 2.  $V = 1,1p.u.$  Potencias y tensiones en la instalación.

## 10.4 Resultados.

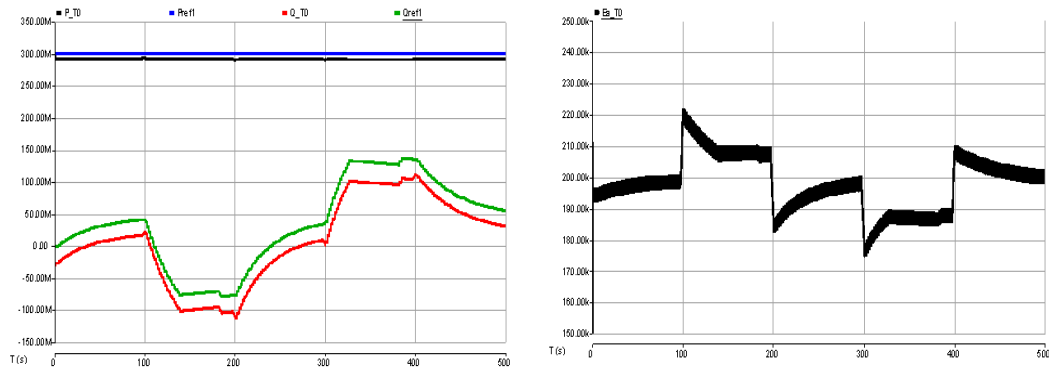


Figura 151: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 1.

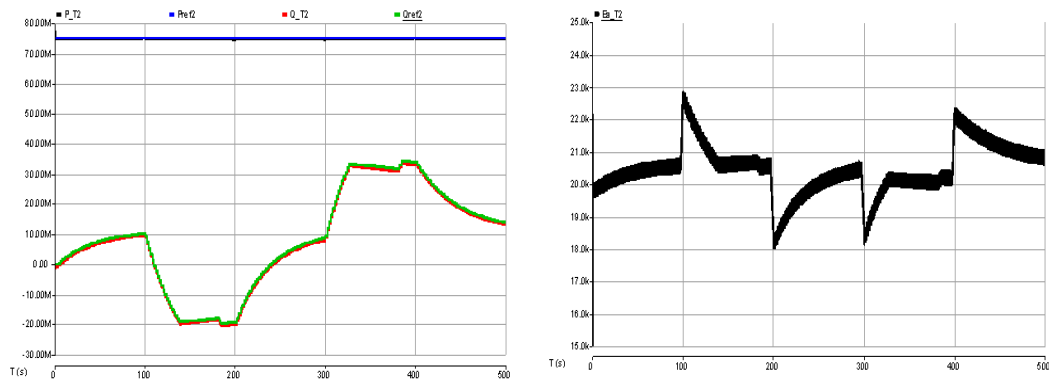


Figura 152: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 2.

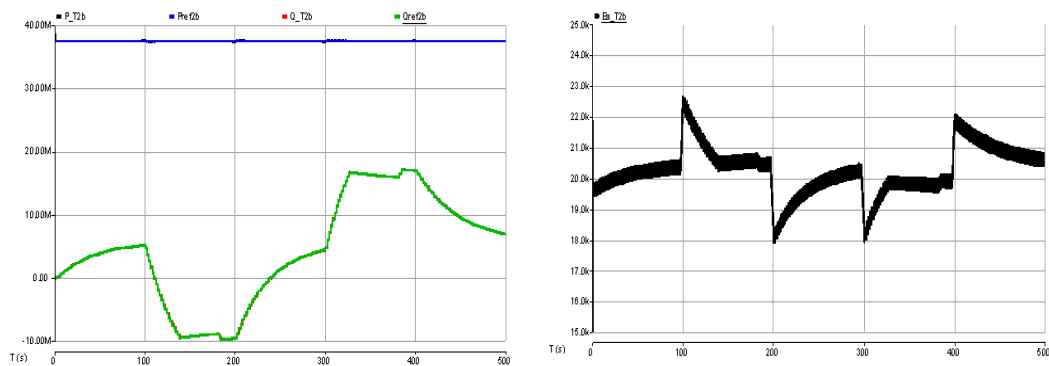


Figura 153: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 2b.

## 10.4 Resultados.

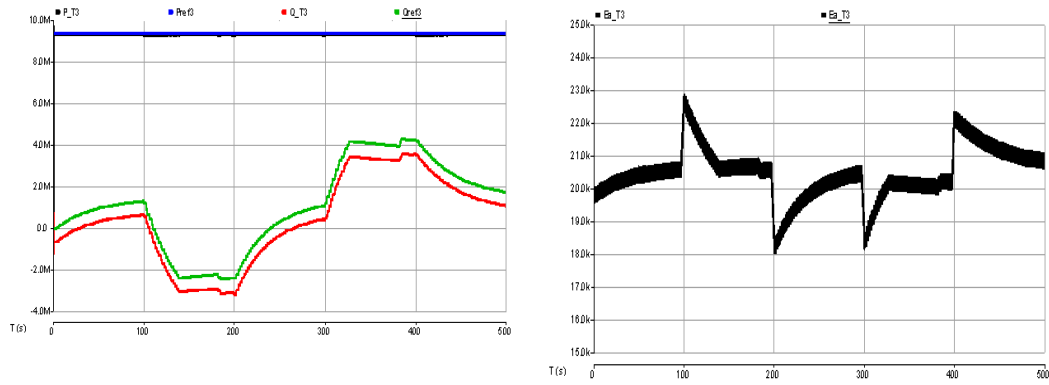


Figura 154: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 3.

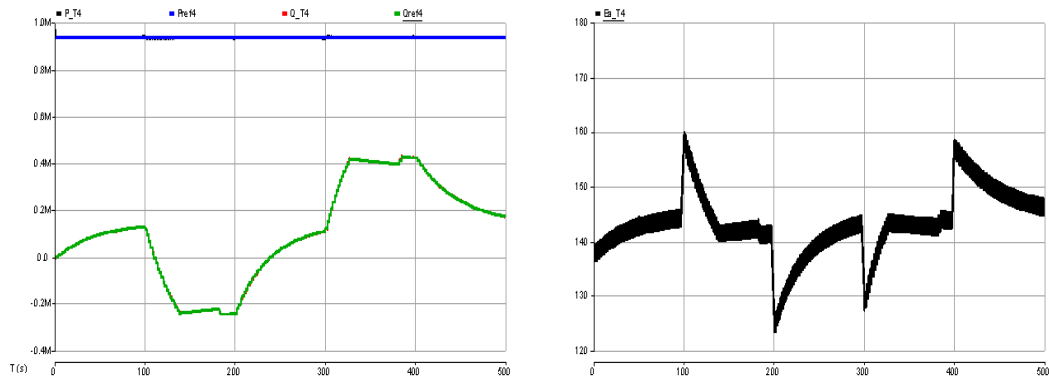


Figura 155: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 4.

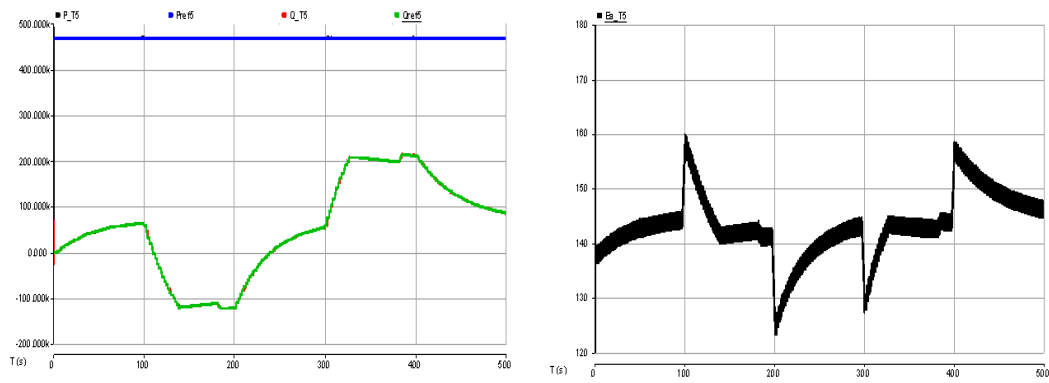


Figura 156: Arabella. Caso 2. Potencias y tensiones en el punto 5.

### 10.5. Pérdidas en las líneas de transmisión.

Por último, analizaremos el incremento de las pérdidas en las líneas de transmisión cuando se está utilizando el método de inyección de potencia reactiva distribuida entre los inversores PVs. En la tabla 4 mostramos estos resultados.

Tal y como podemos apreciar, las pérdidas máximas causadas por el sistema de compensación de tensión propuesto son altamente aceptables (hay que señalar que los datos aportados se refieren a situaciones extremas), ya que a tensión nominal no se inyecta potencia reactiva, y no habrá pérdidas adicionales. El incremento en las pérdidas causado por el compensador en la línea de 345KV será pues del 13,6 % para sobretensiones, y del 15,3 % para subtensiones.

## 10.5 Pérdidas en las líneas de transmisión.

	Pérdidas línea 34, 5KV (8 colectores) [KW]	Total pérdidas líneas 34, 5KV [KW]	Pérdidas en la línea de transmisión [KW]	Pérdidas totales [KW]
Estado nominal sin compensación	13, 91	111, 26	555, 75	667, 01
Pérdidas máximas en estado de sobretensión	15, 80	126, 40	555, 75	682, 15
Pérdidas máximas en estado de subtenión	16, 04	128, 35	672, 45	801, 80
Incremento de pérdidas por la compensación (sobretensión)	1, 89	15, 14	0, 00	15, 14
Incremento de pérdidas por la compensación (subtenión)	2, 13	17, 09	116, 7	134, 79

Tabla 4: Pérdidas en las líneas de transmisión de la planta Arabella.

## 10.6. Conclusiones.

En esta aplicación, se ha presentado y evaluado un sistema de control de planta sobre inversores POWER PV500 de GPTECH obteniendo resultados satisfactorios. La estrategia propuesta utiliza la capacidad de generación de potencia reactiva disponible de los PV500s para alcanzar el total de potencia reactiva requerido en el punto de conexión a red. Resumimos las principales conclusiones a continuación:

- El sistema inyecta potencia reactiva para compensar sobre o subtensiones en el PCC. Incluso si se alcanza el factor de potencia límite, la potencia reactiva disponible ayuda a alcanzar la tensión deseada.
- El sistema de control funciona correctamente independientemente del nivel de carga de los inversores.
- El sistema funciona correctamente independientemente de si se enfrenta a sub o sobretensiones.
- El sistema ha sido evaluado considerando retrasos aleatorios en el envío de referencias, probándose que se trata de un sistema muy robusto.
- Si se produce una falta dentro de la central por un accidente o una desconexión no programada, el resto de la planta puede trabajar en régimen normal de operación, y el control central de reactiva no es afectado. Obviamente la capacidad máxima de inyección de reactiva disminuye, pero al hacerlo también la potencia activa, se sigue pudiendo cumplir con el factor de potencia especificado.