



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

Alejandro Rico Secades

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

Análisis y modelado de algoritmo de regulación de fluctuaciones de potencia para plantas fotovoltaicas mediante sistemas de almacenamiento de energía y generadores diésel.

FEBRERO 2014

Título del Proyecto:

Análisis y modelado de algoritmo de regulación de fluctuaciones de potencia para plantas fotovoltaicas mediante sistemas de almacenamiento de energía y generadores diésel.

Empresa de desarrollo del Proyecto:

TSK Electrónica y Electricidad S.A.



Autor del proyecto:

Alejandro Rico Secades D.N.I.: 71665515 – E

Tutor del proyecto:

Antonio Corral

Tutor Académico:

Antonio Robles

Contenido

1.	Introducción	5
2.	Alcance del proyecto	6
3.	Objetivo del proyecto	7
4.	Conceptos básicos de un sistema fotovoltaico conectado a red.....	8
4.1	Características.....	8
4.2	Condiciones técnicas de la conexión	10
4.3	Componentes básicos	10
4.3.1	Módulo fotovoltaico	10
4.3.2	Inversor DC/AC.....	11
4.3.3	Centros de transformación	12
5.	Descripción de la instalación Fotovoltaica al estudio	¡Error! Marcador no definido.
5.1	Ubicación.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2	Características Técnicas de la Instalación	¡Error! Marcador no definido.
5.3	Descripción de los Principales Componentes de la Instalación.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3.1	Módulos fotovoltaicos.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3.2	Inversores.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3.3	Sistema de almacenamiento de energía	¡Error! Marcador no definido.
5.3.4	Generadores diésel	¡Error! Marcador no definido.
5.3.5	Sistema de predicción de Irradiancia	¡Error! Marcador no definido.
6.	Requisitos técnicos en el punto de conexión	¡Error! Marcador no definido.
6.1	Control de Variación de Potencia (Ramp Rate Control)	¡Error! Marcador no definido.
7.	Análisis Inicial.....	¡Error! Marcador no definido.
7.1	Estudio de la Evolución de la potencia en una planta	¡Error! Marcador no definido.
8.	Descripción del Algoritmo	¡Error! Marcador no definido.
8.1	Sistema de prevención para Arranque de motores diésel.....	¡Error! Marcador no definido.
8.2	Sistema de Deslastre de Nuberu.....	¡Error! Marcador no definido.
8.3	Sistema de Baterías.....	¡Error! Marcador no definido.
8.4	Sistema de Generadores diésel.....	¡Error! Marcador no definido.
9.	Simulación	¡Error! Marcador no definido.
9.1	Hipótesis de partida	¡Error! Marcador no definido.
9.2	Datos de entrada	¡Error! Marcador no definido.
9.3	Limitaciones de la simulación	¡Error! Marcador no definido.

- 9.4 Código del Programa de simulación.....**¡Error! Marcador no definido.**
10. Resultados finales.....**¡Error! Marcador no definido.**
11. Bibliografía.....**¡Error! Marcador no definido.**
12. Presupuesto.....**¡Error! Marcador no definido.**
13. Diagrama de ejecución de tareas.....**¡Error! Marcador no definido.**

ANEXOS

Anexo 1 “Código Matlab de la simulación”

Anexo 2 “Balance de Energía sistema de baterías – Peor Escenario”

Anexo 3 “Metodología de Evaluación Cumplimiento MTRs Rampa y Frecuencia”

1. Introducción

En la actualidad, las necesidades energéticas de la humanidad van aumentando a una velocidad muy considerable, esto es debido a la gran industrialización que están sufriendo países grandes como China, Brasil o India. Para hacer frente a esta demanda energética se recurre mayoritariamente a combustibles fósiles, como son el carbón, el gas y el petróleo, lo que a la larga está generando una gran alerta debido a los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera.

Es necesario pensar en la implantación de las energías renovables para suplir la demanda energética, y dejar a un lado la dependencia de los combustibles fósiles. Con las energías renovables se aportan una serie de beneficios, como son, la reducción en las inversiones de las infraestructuras, mayor bienestar para los consumidores y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Puede aparecer un problema, una alta penetración de generación eléctrica mediante la utilización de plantas de energías renovables del tipo intermitente, como son la energía fotovoltaica o la eólica, pueden presentar un riesgo para la seguridad y la estabilidad para la Red eléctrica de un país, en el caso de que se trate de una red débil, o pequeñas islas con una red propia de autoabastecimiento, en la que cualquier variación se hace muy notable.

En el caso de la energía fotovoltaica, las variaciones de la radiación solar, tiene efectos directos sobre las variaciones en la inyección de energía activa en la red, frecuencia, voltaje y otros problemas eléctricos, por lo que para la realización de una instalación de grandes dimensiones conectada a la red eléctrica, se suelen establecer unos requisitos de obligado cumplimiento. Estos requisitos los proporciona la propia compañía eléctrica, que tras un exhaustivo análisis de su red, y de un análisis de las perturbaciones que puede provocar la nueva planta de generación, establecerá unos parámetros de generación que no pueden ser traspasados.



Imagen 1: Planta Fotovoltaica (Fuente: TSK)

En muchas ocasiones en las plantas fotovoltaicas, por sí solas, no se puede realizar un control ni realizar una gestión eficaz para cumplir con los requisitos de la compañía, por lo que se hace necesaria la implantación de elementos externos que funcionarán junto con la planta fotovoltaica para realizar las regulaciones que sean necesarias, así como, los aportes de energía en los momentos que se requiera. Estos elementos externos pueden ser baterías, generadores diésel etc....

La evolución de la tecnología en los últimos años, ha hecho posible que la energía Fotovoltaica se haya convertido en la herramienta que está cambiando el paradigma de la generación y el consumo energético en todo el mundo, ya que se está convirtiendo en una de las opciones más requeridas para hacer frente a la demanda energética de diversos países, ya que ésta crece a de una forma exponencial.

2. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto se centra en la integración de energías renovables dentro de redes de distribución débiles, en las cuales se hace necesaria una regulación en la generación para no crear una desestabilización en la red.

En algunos países, sobre todo en islas, la instalación de plantas de generación no gestionable, ya sean de tipo fotovoltaico, eólico, termo-solar u otro tipo, pueden generar desestabilizaciones en la red por las variaciones bruscas de inyección de energía a dicha red. En el caso de la generación fotovoltaica, estas fluctuaciones son producidas por los cambios de los valores de irradiancia solar, que son debidas a los diferentes fenómenos meteorológicos y que son más acentuados en zonas, como por ejemplo, la zona de Centro-América, cuyo clima es muy variable a lo largo del día.

La realización de este proyecto se realizará sobre una instalación fotovoltaica de 20 MW nominales ubicada en la zona de Centro América, donde existe un clima muy variable que origina variaciones muy bruscas en plazos de tiempo muy cortos, y que, causan desestabilizaciones al realizar una inyección en la red eléctrica de la zona.

Para operar junto con la planta fotovoltaica se dispone de un sistema de almacenamiento de baterías, un sistema de generación compuesto por tres motores diésel, y también, un sistema denominado Nuberu, capaz de analizar mediante visión artificial el movimiento de las nubes y predecir los valores futuros de irradiancia sobre la planta.

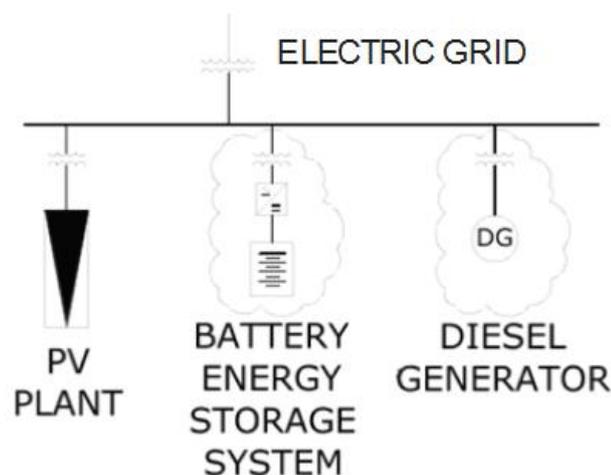


Imagen 2: Conexión de la planta fotovoltaica y de los sistemas de almacenamiento y generación de energía a la red eléctrica. (Fuente: TSK)

Con todo esto se debe realizar un control y una regulación de la energía que se inyecta a la red. Con estos sistemas se podrá realizar un aporte de energía en los momentos clave en los cuales la generación fotovoltaica sufra unas variaciones que se alejen de los requisitos previamente establecidos por la compañía eléctrica.

3. Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto es la simulación del funcionamiento normal de la planta fotovoltaica de San Fermín, ubicada en Puerto Rico, aplicando un algoritmo de control que actuará sobre los inversores y sobre los sistemas externos de generación de energía adicional, para corregir las fluctuaciones de potencia que genera la planta de forma natural por las variaciones de irradiancia, todo para que la potencia que entregue la planta en el punto de interconexión con la red eléctrica cumpla los requisitos establecidos por la compañía eléctrica del lugar.

La forma de proceder para la realización del proyecto parte de la simulación de la planta sin ningún tipo de regulación y sin la utilización de ninguno de los sistemas externos de los que dispone. Para la simulación de dicho funcionamiento se utilizarán los datos de generación de potencia de diversos días de una planta de características similares ubicada en la misma zona que la planta a analizar.

A partir de estos resultados, se observarán los incumplimientos que genera la planta a la hora de inyectar a la red, en comparación con los requisitos preestablecidos por la compañía eléctrica, todo para desarrollar un algoritmo de control para utilizar los sistemas externos (sistema de almacenamiento, sistema de generación diésel y sistema Nuberu) junto con la planta fotovoltaica.

Este algoritmo actuará gestionando las consignas del sistema de almacenamiento de energía, del sistema de generación diésel y de los inversores fotovoltaicos. Todo para conseguir una gestión eficaz de la planta fotovoltaica y asegurar cumplir los requerimientos en el punto de interconexión.

El objetivo principal de centra en el control de la rampa de generación RRC (Ramp Rate Control), es decir, evitar las variaciones bruscas de potencia activa, que normalmente se establecen entre un 5% y un 20% de la potencia nominal de la planta en un minuto.

Estos requisitos vienen detallados en el Anexo 3 “Metodología de Evaluación Cumplimiento MTRs Rampa y Frecuencia”.

4. Conceptos básicos de un sistema fotovoltaico conectado a red

Un Sistema Fovovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional.

Como se muestra en la figura 1, un sistema fotovoltaico conectado a red se compone del generador fotovoltaico, un inversor DC/AC y un conjunto de protecciones eléctricas.

La energía producida por este sistema será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo. Es común que existan mecanismos de retribución económica que compensan al propietario del sistema por la energía que su sistema intercambia con la red. (Fuente: *Energía solar fotovoltaica*; Autor: Oscar Perpiñán Lamingueiro)

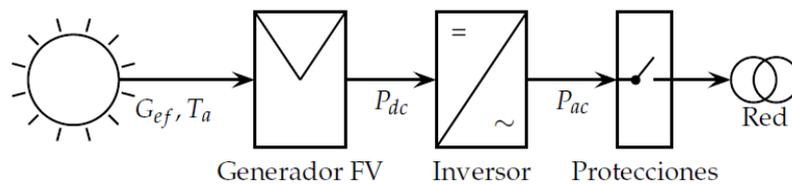


Imagen 3: Componentes de un sistema fotovoltaico conectado a red (fuente: Libro *Energía Solar fotovoltaica* Oscar Perpiñán Lamingueiro)

4.1 Características

Entre los Sistemas fotovoltaicos conectados a red instalados sobre suelo existen dos tipos:

- Los sistemas estáticos, con una inclinación y orientación fija, y
- Los sistemas de seguimiento, que varían la posición del generador a lo largo del día y año para maximizar la radiación efectiva incidente.

El diseño de un Sistema fotovoltaico conectado a red sobre suelo, tiene como objetivo maximizar la producción energética anual del sistema con el menor coste y con la menor ocupación de terreno posibles. Como primera clasificación se distinguen los sistemas estáticos, aquellos cuya inclinación y orientación permanece inalterable, y los sistemas de seguimiento. En la imagen se puede apreciar como es una instalación estática.



Imagen 4: Instalación Fotovoltaica estática (fuente: TSK)

Como segunda clasificación se distinguen los sistemas fotovoltaicos con seguimiento. El fundamento de los sistemas de seguimiento es doble: en primer lugar, la radiación incidente aumenta al seguir al sol; además, las pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora. Por tanto, el objetivo de estos sistemas es reducir el ángulo formado entre la línea que une el generador con el sol y la perpendicular al plano del módulo y así apuntar al sol a lo largo de su movimiento celeste.

Las diferentes técnicas de seguimiento buscan concretar ese objetivo general sacrificando un apuntamiento perfecto en aras de conseguir sistemas estructurales más económicos y mejores aprovechamientos del terreno. Así, el mejor método de seguimiento desde la perspectiva de la producción eléctrica es el denominado a doble eje, que consigue apuntar al sol con precisión a lo largo de todo su recorrido. En el siguiente puesto de los que optimizan la producción destaca el seguimiento acimutal, que sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos. El método consiste en girar de este a oeste sobre un eje vertical. Su uso está decreciendo en comparación al método de doble eje.



Imagen 5: Seguidor solar de dos ejes

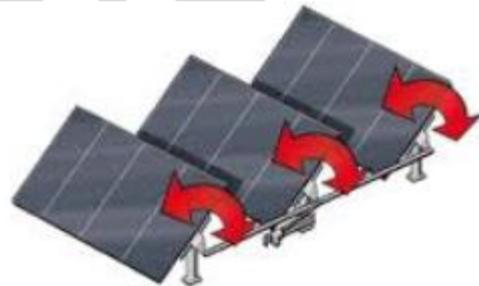


Imagen 6: Seguidor solar de un eje

(Fuente: LINAK)

Otro planteamiento diferente es el utilizado por el seguimiento polar. El único eje sobre el que se produce el giro está inclinado de forma paralela al eje de rotación de la Tierra, consiguiendo que el generador aparezca al sol como perpendicular a sus rayos durante gran parte del recorrido. No obstante, las complicaciones estructurales y de giro, y la dificultad de su implantación en grandes plantas han provocado que su uso sea ocasional. Por último se debe mencionar el método de seguimiento horizontal con eje Norte-Sur. Sus ventajas son la sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios), la facilidad de motorización, así como el mejor aprovechamiento del terreno en relación a un sistema de doble eje.

El mejor aprovechamiento de terreno depende directamente del porcentaje de radiación que quedará sombreada por los seguidores cercanos, lo que se conoce como sombras mutuas. En general, cuanto más

exacto es el método de seguimiento, menos eficiente es su aprovechamiento de terreno: para un mismo valor de radiación sombreada, la separación entre seguidores aumenta en sistemas que apuntan mejor.

De ahí que los sistemas estáticos sean la opción preferida cuando el terreno disponible sea limitado y se desee alcanzar una potencia instalada determinada (por ejemplo para aprovechar toda la capacidad que ofrece el punto de conexión concedido) o limitar la inversión económica a costa de reducir la productividad del sistema.

Los sistemas instalados sobre suelo frecuentemente superan la potencia de 100 kW, y en varios casos superan los 50MW, y por tanto, suelen contar con una instalación de evacuación en Media Tensión. En este tipo de SFCR una proporción importante del trabajo de ingeniería se dedica al diseño del sistema de interconexión de los módulos para formar el generador, el sistema eléctrico que conecta el generador con los equipos inversores, el sistema de evacuación a red de la energía producida y la red de tierras.

4.2 Condiciones técnicas de la conexión

Para realizar una conexión a una red de distribución general, pueden ocurrir situaciones distintas. Cuando se trata de instalaciones con una potencia baja (de entre 50 kW y 400 kW), estas pueden evacuar la energía producida directamente en la red de baja tensión ya que difícilmente generarán perturbaciones en la línea, el problema aparece cuando la instalación es de una potencia mayor, decenas incluso alcanzando la centena de MW, entonces la evacuación de energía a la red se efectúa en Media Tensión, y pueden aparecer perturbaciones en la red de distribución al inyectar una gran cantidad de energía. Ante esto las compañías eléctricas especificarán unos requerimientos técnicos para que se cumplan, mediante un control de la instalación fotovoltaica.

4.3 Componentes básicos

4.3.1 Módulo fotovoltaico

Los paneles o módulos fotovoltaicos, son los generadores de energía. Están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (energía solar fotovoltaica). El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación de 1000 W/m²
- Temperatura de célula de 25 °C (no temperatura ambiente).

Los módulos fotovoltaicos se dividen en:

- Cristalinas
 - Monocristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los 4 lados cortos, si se puede apreciar en la imagen, se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada).

- Policristalinas: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado.

Su efectividad es mayor cuanto mayores son los cristales, pero también su peso, grosor y coste. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 20% mientras que el de las últimas puede no llegar al 10%, sin embargo su coste y peso es muy inferior.



Imágen 7 : Módulos fotovoltaicos poli-cristalino y mono-cristalino.(Fuente: sitiosolar.com)

4.3.2 Inversor DC/AC

La señal de potencia suministrada por un generador fotovoltaico iluminado es en tensión continua, por lo que debe ser acondicionada para permitir el correcto acoplamiento a la red eléctrica en alterna. El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la conversión de continua a alterna cumpliendo con determinados requisitos de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, eficiencia y rendimiento, seguridad eléctrica, etc.

Los inversores cuentan con sistemas de búsqueda del MPP (punto de máxima potencia), es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico con el fin de extraer siempre la máxima potencia del panel en cada momento.

Otro parámetro importante a tener en cuenta en los inversores a la hora de realizar cálculos es el Umbral de arranque que según las unidades en las que se expresa, puede indicar la radiación solar incidente en el generador (W/m^2) o la potencia de entrada (W) necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.



Imagen 8: Inversor fotovoltaico del fabricante SMA. (Fuente: SMA)

4.3.3 Centros de transformación

Son el elemento necesario, para acondicionar la energía eléctrica producida y adaptarla a las condiciones de intensidad y tensión de la línea de transporte.

Los transformadores que se utilizan en fotovoltaica son los mismos que se utilizan para la distribución de energía, al final un transformador lo que hace es elevar/bajar la tensión entre una red de MT y otra de BT, por lo que no hay transformadores específicos. Por eso se utilizan las potencias típicas o normalizadas de 50, 160, 250, 400, 630, 800 y 1.250 KVA. Las plantas fotovoltaicas que se conectan en BT, hasta 100 kW, por encima de este valor estamos hablando de media o alta tensión.

En los parques, con potencias de evacuación elevadas, se hace uso de centros de transformación elevadores BT/MT (uno o varios por parque) para finalmente conectarse a la red de distribución en la red de media tensión.

Los centros de transformación del parque cumplirán lo exigido en el Reglamento de centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación. Además, el centro de entronque cumplirá también con lo exigido por la Empresa Distribuidora de la zona a la que se va a conectar. Según el acuerdo entre Promotor y Empresa distribuidora, se puede instalar una celda de medida en MT en el centro de entronque para medir la totalidad de la energía vertida a la red de distribución MT.



Imagen 9: Centros de transformación de maniobra exterior (izquierda) y maniobra interior (derecha)



Análisis y modelado de algoritmo de regulación de fluctuaciones de potencia para plantas fotovoltaicas mediante sistemas de almacenamiento de energía y generadores diesel.



CONTENIDO CONFIDENCIAL.

PARA LEER EL CONTENIDO DEL PROYECTO PONERSE EN CONTACTO CON EL AUTOR.

CONFIDENCIAL