1º INFORME DE SEGUIMIENTO:

Fecha: 1 de Julio 2015

PROYECTO GEMEI: Desarrollo de una plataforma para experimentación y desarrollo de nuevos sistemas de regulación y control de sistemas de Generación con Energía Eólica conectados a Microrredes Eléctricas Inteligentes.

ANTECEDENTES

Tal como se refiere en la memoria de la solicitud, con esta actuación se pretende establecer la semilla de colaboración entre la Universidad de Cuenca (Ecuador) y la Universidad Politécnica de Madrid, para, a partir de nuestra experiencia y conocimiento, aplicar conjuntamente soluciones en el área de Integración en red de sistemas de generación con Energías Renovables. Es esa línea, con la financiación concedida y como objetivo tecnológico de la actuación, se realizará la primera fase del desarrollo de un emulador físico que permita validar experimentalmente, a nivel de laboratorio, la eficacia de la aplicación de nuevas técnicas de control de aerogeneradores y parques eólicos para adaptar sus condiciones de generación de acuerdo a los requisitos de los operadores de las futuras microrredes inteligentes que es previsible que se integren en el Sistema Eléctrico de Ecuador para favorecer en ellas la integración masiva de este tipo de generación.

De acuerdo al montante de la financiación concedida, el alcance tecnológico del proyecto incluye ciertas tareas definidas dentro de las actividades A1 y A3 descritas en la solicitud. Concretamente, estas tareas son:

- Tarea T1 (Actividad A1). Colaboración en el desarrollo de los modelos matemáticos que permitan la implementación del control activo de una microrred eléctrica con generación fotovoltaica cuando se agrega generación eólica a la misma.

- Tarea T2 (Actividad A3). Estudio, diseño y construcción de un accionamiento con un sistema acondicionador electrónico de potencia, para el control del motor de MI para emular la turbina eólica de aerogeneradores.

ACTIVIDAD

Tarea T1, Actividad A1: Desarrollo de los modelos matemáticos que permitan la implementación del control activo de una microrred eléctrica con generación fotovoltaica cuando se agrega generación eólica a la misma.

En un sistema eléctrico de potencia convencional, la frecuencia viene establecida por los generadores eléctricos síncronos convencionales, que están provistos de controladores de velocidad para mantenerla constante. Adicionalmente, la inercia acumulada en las masas rotativas de los conjuntos turbina-generador supone un efecto estabilizador sobre las variaciones de frecuencia debidas a los constantes desequilibrios entre generación y demanda en los sistemas eléctricos.

En el caso de los generadores eólicos, en contraposición con los generadores convencionales, su sistema de control se encarga de regular la velocidad de su eje en función del viento

existente con el objetivo de optimizar el rendimiento de la turbina eólica en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Como consecuencia, un aerogenerador mantiene un nivel de potencia activa en su salida relativamente independiente de las variaciones de frecuencia en la red eléctrica a la que está conectado. En consecuencia, desde la perspectiva del sistema, prácticamente carece de respuesta inercial. Por otra parte, en el caso de los generadores fotovoltaicos, en los que no hay masas rotativas, obviamente no hay respuesta inercial ninguna.

Por tanto, en una microrred con generación eólica y fotovoltaica, la práctica carencia de inercia compromete su estabilidad en caso de conexión débil con el sistema externo o en caso de operación aislada. No obstante, como se ha mencionado, los aerogeneradores sí disponen de recursos de inercia, aunque están prácticamente ocultos para la red eléctrica por la acción del sistema de control. En este proyecto se explora la factibilidad de la modificación del sistema de control para aprovechar dichos recursos para el soporte de frecuencia de la red.

En primer lugar, se ha desarrollado un modelo aproximado de aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), orientado al análisis de potencia-frecuencia. Se ha simplificado el modelo matemático de algunos de sus principales componentes y se han omitido ciertos detalles para permitir su utilización dentro de un modelo de microrred. La figura 1 muestra los distintos componentes del modelo y junto con sus variables de entrada y salida.



Figura 1. Componentes del modelo electromecánico del aerogenerador DFIG.

Donde:

v= Velocidad del viento incidente en el aerogenerador (m/s).

f= frecuencia de la red (Hz).

 P_{eol} = Potencia activa a la salida del aerogenerador (por unidad, pu).

Posteriormente, se ha validado el modelo desarrollado en el dominio del tiempo por comparación con el modelo de referencia comercial disponible en Matlab. Como muestra de este proceso de validación, en las siguientes figuras se evidencian la evolución de la potencia activa de salida y de la velocidad del aerogenerador ante un régimen de vientos variable obtenida mediante el modelo desarrollado y el de referencia.



Figura 2. Potencia activa de salida y velocidad del aerogenerador ante un régimen de vientos variable, con incrementos de 1m/s cada 20 segundos en el rango 7-15-7 m/s.

Como resultado de esta etapa de desarrollo se dispone de un diseño modular, con todas sus variables expresadas en por unidad, con el objetivo de brindar flexibilidad a la incorporación de componentes auxiliares adicionales.

Respecto a la modelación de la microrred eléctrica con generación fotovoltaica, este trabajo ha sido realizado por nuestros colaboradores en la Universidad de Cuenca-Ecuador, en el marco del proyecto "Control Óptimo de la Demanda y la Generación de una Micro-red eléctrica mediante Sistema de Control de Red" cuyo ámbito de actuación pretendemos complementar, al añadir el control de la integración de la generación eólica. Dentro de las actividades del proyecto mencionado, se ha propuesto un modelo dinámico de simulación, con el fin de pronosticar la oferta y demanda de energía que tendría una microrred eléctrica, compuesta por una vivienda que dispone de una instalación de auto-generación fotovoltaica, teniendo como carga la demanda propia de la vivienda a lo largo del día. El pronóstico de la oferta se determina considerando los parámetros tanto físicos como climáticos que determinan la capacidad de generación (figura 3), mientras que, para la determinación de la característica de la demanda, se considera el equipamiento de la vivienda, tanto de aparatos que estén relacionados con la actividad de sus residentes como de los aparatos que tienen un consumo no relacionado con la actividad de ellos (figura 5). Todas estas consideraciones han permitido integrar las curvas de carga y generación diaria que tendría la microrred (figuras 4 y 6).



Figura 3. Modelo para la estimación de la radiación solar para el sistema de generación de una vivienda.



Figura 4. Simulación radiación solar horaria diaria.



Figura 5. Modelo para pronosticar la demanda de una vivienda.



Figura 6. Simulación del consumo horario de energía en una vivienda.

Tarea T2, Actividad A3: Estudio, diseño y construcción de un accionamiento con un sistema acondicionador electrónico de potencia, para el control del motor de MI para emular la turbina eólica de aerogeneradores.

Para analizar con precisión la estabilidad de los sistemas eléctricos, es imprescindible disponer de modelos fiables de los grupos de generación de las centrales eléctricas que están conectados a dicho sistema. Esto cobra especial relevancia en micro-redes, especialmente trabajando en modo aislado.

Por otro lado es previsible que estas microredes sean abastecidas por múltiples pequeños grupos de generación con energías renovables de diversas tecnología y, entre ellos, posiblemente los minigeneradores tengan una presencia destacada.

Así las cosas el objetivo de esta tarea es diseñar y construir un modelo informático y un emulador experimental de un accionamiento regulado constituido por un sistema de control vectorial sobre el par de un motor de inducción, capaz de reproducir con fiabilidad la operación de turbinas eólicas. El dispositivo debe ser lo suficientemente versátil para poder configurar turbinas de diversas características.

A continuación se describe el grado de ejecución del sistema.

1.- Se ha desarrollado, en primer lugar, un modelo completo para dicho accionamiento utilizando la plataforma de programación Matlab-Simulink. La figura 7 muestra un esquema de constitución del sistema desarrollado.



Figura 7. Esquema general del accionamiento emulador de una turbina eólica.

En dicha figura se distinguen 4 bloques constituyentes:

Bloque Aerodinámica-Turbina: Este bloque dispone de un algoritmo que, recibiendo como datos la velocidad del viento "V_w" y el ángulo de calado de las palas " β_{ω} " (pitch angle), determina el valor del par que desarrollaría la turbina eólica "T_{ref}" en función del régimen de giro del eje "n_{eje}".



Figura 8. Curvas típicas potencia-velocidad para diversas velocidades del viento de una turbina eólica.

La figura 8 muestra una familia de curvas potencia-velocidad típica de una turbina eólica real. Este bloque permite especificar las características constructivas y aerodinámicas que definen la turbina que se desea emular (Radio, Cp(λ , β) etc ...). La salida de este bloque, establece el valor de referencia del par "T_{ref}" que debe reproducir el accionamiento en su eje. *Bloque DTC-Control Par*: Este bloque debe elaborar las señales de consigna de la tensión que deben alimentar cada una de las fases del motor " $u_{a,b,c}$ ", de forma que realice un control vectorial directo sobre el par electromagnético " T_{eje} " del motor de inducción, capaz de reproducir el par de referencia " T_{eje} = T_{ref} ".



La figura 9, muestra el diagrama del sistema de control implementado.

Figura 9. Diagrama de control vectorial del par electromagnético del motor.

Se puede observar que se aplica la técnica de control vectorial sobre cada una de las componentes del vector intensidad del motor, en eje directo y en cuadratura, "i_{sd}" e "i_{sq}" proyectadas en un sistema de coordenadas, solidario con el giro y posición del campo magnético en el motor, y así se realiza un control independiente sobre el flujo " $\phi = K_{\phi} i_{sd}$ ", y sobre el par electromagnético "T_{eje}" = K_T·i_{sq}", logrando un control muy robusto del sistema.

Bloque Convertidor-Motor: Este bloque reproduce, a través del modelo del inversor, en la alimentación de cada fase del motor las tensiones establecidas por el bloque de control anterior " $u_{a,b,c}$ ". Por otra parte dispone de un modelo para régimen transitorio del motor de inducción, que evalúa o reproduce el par electromagnético " T_{eje} " en el eje, a partir de la tensión de alimentación en cada una de sus fases.

Bloque Generador-Carga: Por último se precisa un bloque que permita someter al accionamiento a diversas condiciones de carga en su eje, "T_{carga}" de forma que se pueda modificar sus puntos de operación y, por tanto, evaluar las prestaciones (rapidez, precisión) del emulador que se está realizando con este accionamiento. Este bloque dispone de un generador síncrono trifásico de imanes permanentes "PMSG" acoplado al eje del motor, cuyas fases del estator están conectados a una carga resistiva "R_{carga}" cuyo valor óhmico puede modificarse. La figura 10, representa las características par-velocidad que se obtienen de este conjunto, para diversos valores de la resistencia.



Figura 10. Curvas par de carga-velocidad del eje del generador PMSG para diversas cargas R_{carga}.

En dicha figura se muestra en color rojo las curvas de par de carga-velocidad " $T_{carga}(n_{eje})$ ". En ellas se observa que, a medida que se aumenta la impedancia, la curva de par presenta un comportamiento más lineal. También superpuesta y en color negro, se representa una curva par -velocidad " $T_{ref}(n_{eje})$ " perteneciente a una turbina eólica en una condiciones de viento y ángulo determinadas, similar a las que se quieren reproducir. Evidentemente los puntos de corte permitirían validar la precisión del accionamiento emulador.

Un modelo con esta estructura, se ha desarrollado en la plataforma Matlab-Simulink, cuyo diagrama de bloques de programación se representa en la figura 11



Figura 11. Capa 1 Estructura de programación en Matlab-Simulink del simulador del accionamiento completo para emular el comportamiento dinámico de una turbina eólica

Se pueden identificar cada uno de los módulos anteriormente descritos

- Turbina_Aerodinámica: Los algoritmos están programados en código editado en las funciones "turbina-Eólica" y "w-g". Dispone de un limitador del par establecido por las condiciones asignadas.
- Convertidor-Motor: El convertidor está programado como tres fuentes de tensión variable una por fase "Ua, Ub, Uc" que reproduce los valores de consigna. La funciones del bloque "motor de inducción" disponen de un modelo vectorial en coordenadas de campo.
- PMSG-Carga: Las funciones del bloque "motor síncrono de imanes" disponen de un modelo vectorial en coordenadas de campo para esa máquina. El bloque de carga son 3 resistencias lineales.
- DTC-Control: por último la figura 12 representa el diagrama de programación del subsistema correspondiente al "bloque de control" que reproduce fielmente la estructura de control vectorial del par electromagnético del motor en coordenadas de campo magnético, representada y definida en la figura 9. Recibe como entradas la referencia de par "Tref", toma las medidas de la velocidad del eje "weje" y de las intensidades por las fases del motor "iabc", y elabora el valor de referencia para la tensión que debe haber en cada una de las fases del motor "Ur Us Ut" para que el convertidor las reproduzca



Figura 12. C Subsistema del bloque de control vectorial con consigna de par

Por último, se muestran algunos resultados de la ejecución de algunos casos utilizando el programa de simulación desarrollado.

Así, en la figura 13, se representa las características par eje-velocidad " $T_{eje}(n_{eje})$ " obtenidas para un valor fijo de ángulo de pala " $\beta_{\omega}=0^{\circ}$ " y para 3 valores de velocidad del viento de " $V_w=7$, 11, 15m/s"



Figura 13. Curvas de par en función de la velocidad de giro de la turbina para velocidades del viento de 7 m/s, 11 m/s y 15 m/s con β =0

Así mismo, en la figura 14, se representa las características par eje-velocidad " $T_{eje}(n_{eje})$ " pero ahora obtenidas para un valor fijo de velocidad del viento " V_w = 11m/s" y 2 valores de ángulo de pala " β_{ω} =0°,5°".



Figura 14. Curvas de par en función de la velocidad de giro de la turbina para velocidad del viento constante 11 m/s y dos posiciones de $\beta=0, 5^{\circ}$

En ambas figuras se puede observar que las curvas muestran una gran similitud a las que se derivan de las curvas de potencia habituales en turbinas eólicas (Ver figura 8).

Por otro lado, en la figura 15 y con el objetivo de evaluar las prestaciones del sistema de control de par, se representa el seguimiento que realiza el modelo del accionamiento al cambio en escalón de la consigna de par.



Figura 15. Evolución temporal del seguimiento de par de consigna

También aquí se puede comprobar las altas prestaciones tanto en rapidez como en precisión del sistema de control del simulador, tanto en lo que se refiere a la respuesta frente a cambios incrementales como decrementales en la referencia.

2.- Después de desarrollar el simulador, adicionalmente también en este periodo, se ha especificado y definido el equipo preciso para construir el accionamiento. Se refiere a continuación:

Bancada Motor de Inducción Generador Síncrono de Imanes, Carga: (Figura 16)

El motor de Inducción es de la marca AEG, modelo DD82-60-2. Tiene una potencia útil de 1 kW W, un par nominal de 3,3 N·m, una velocidad nominal de 2850 rpm (a 50 Hz) y consta de 1 par de polos. En cuanto a sus características eléctricas, sus valores nominales de tensión e intensidad son 380 V y 3,8 A, respectivamente.

La máguina síncrona de imanes permanentes es un servomotor marca ESTUN, modelo EMJ-04APB22. Tiene una potencia útil de 400 W, un par nominal de 1,27 N·m, una velocidad nominal de 3000 rpm (a 200 Hz) y consta de 4 pares de polos. En cuanto a sus características eléctricas, sus valores nominales de tensión e intensidad son 200 V y 2,7 A, respectivamente.



Figura 16. Bancada Motor de Inducción Generador Síncrono de Imanes

- Puente rectificador-Inversor y sistema de adaptación de señales (figura 17)

Se precisarían construir 2 puentes trifásicos IGBT-DIODOS en disposición BACK-TO-BACK para 10A/400V como el representado en la figura y sus respectivas tarjetas de adaptación, respectivamente para disparo y comunicación entre el Micro_DSP y los semiconductores IGBT de las ramas de los puentes.



Figura 17. Puente rectificador-Inversor y sistema de adaptación de señales

- Placa de sensores y adquisición de datos (figura 18)

Se precisaría construir una placa de toma de datos para albergar 6 Sensores de Efecto Hall 20A/1000V como los de la figura para medida de tensión y corriente e incluir su tarjeta de adaptación de señales entre el micro-DSP y los sensores Efecto Hall. Se precisaría añadir la tarjeta decodificadora para la señal del encoder absoluto/incremental



Figura 18. Placa de sensores y adquisición de datos

- Microprocesador DSP y placa de conexión (figura 19)

Todo ello se controlaría desde un Micro DSP coma flotante del tipo TEXAS TSM320 o similar y circuito driver para acondicionamiento de señal de disparo



Figura 19. Microprocesador DSP y placa de conexió