

# Modelación de la Inercia mediante la Máquina Sincrónica Virtual en PowerFactory para un Sistema Máquina Barra Infinita

Diego Albán Muñoz  
Departamento de Energía Eléctrica  
Escuela Politécnica Nacional  
Quito- Ecuador  
albandiego1998@gmail.com

José Oscullo Lala  
Departamento de Energía Eléctrica  
Escuela Politécnica Nacional  
Quito- Ecuador  
jose.oscullo@epn.edu.ec

**Resumen**—Mediante la revisión del estado del arte de la modelación de la máquina síncrona virtual (VSM) se desarrolla el modelo en DigSILENT Simulation Language (DSL) del software de ingeniería PowerFactory. Se analiza la respuesta dinámica de la VSM cuando se considera un generador no convencional conectado en el punto de conexión a un sistema máquina barra infinita, esta es comparada con la respuesta de la máquina síncrona empleada por la generación convencional. Para esto se realiza la simulación en el dominio del tiempo de la frecuencia del sistema eléctrico, donde se observa que el sistema presenta una respuesta inercial que permite amortiguar las oscilaciones debido a la operación o perturbaciones que afronta el sistema a pesar de que la generación no convencional conectada no cuenta con esta característica, como es el caso de un generador fotovoltaico.

**Keywords**—Máquina síncrona virtual (VSM), Modelación de inercia, Generador síncrono, Máquina Barra Infinita.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia debido a la alta penetración de fuentes de energía renovables con fines de generación eléctrica, la cual se caracteriza por presentar un aporte reducido o nulo en la inercia al sistema eléctrico de potencia (SEP). La inercia en el SEP ha sido proporcionada de manera natural por el grupo turbina-generador, mediante los cuales, el SEP contaba con mecanismos naturales de amortiguamiento de oscilaciones, control primario de frecuencia, entre otros; los mismos que permiten al sistema llevar una operación cuasi estacionaria para alcanzar el balance generación demanda en cada instante [1].

En los últimos años esta nueva situación operativa se ha constituido en un reto para la ingeniería a fin de desarrollar dispositivos que permitan incrementar la inercia y dependiendo de las propuestas han recibido la denominación de máquina síncrona virtual (VSM), generador síncrono virtual (VSG) y sincroconverter cada uno con sus ventajas y desventajas [2], [3]. Sin embargo, la modelación no se ha implementado en software comercial lo que se busca desarrollar por medio de este trabajo.

Las diferentes técnicas de emular la inercia en la red eléctrica, busca principalmente simular el comportamiento dinámico de la máquina síncrona tradicional en la representación de la ecuación de oscilación. Siendo la más desarrollada y con implementaciones físicas la VSM, cuyas características son las siguientes: [2], [4], [5], [6]

- La dinámica de la máquina síncrona considera un modelo de quinto a séptimo orden. En este trabajo PowerFactory permite considerar el modelo de sexto orden la máquina síncrona.
- Una combinación de algoritmos de control y dispositivos electrónicos que permiten monitorear las señales de voltaje

y corriente del punto de conexión del generador no convencional.

- De la señal de voltaje se obtiene la amplitud, frecuencia y ángulo de fase del punto común de conexión al sistema (PCC) por medio del lazo de control de fase (PLL), mediante este es posible determinar la inyección o absorción de la potencia de acuerdo con las condiciones operativas.
- Permite ajustar la inercia del sistema de acuerdo con las condiciones operativas.

En [7] establece a la VSM como la mejor técnica para emular la inercia. En este artículo presenta su modelación, en PowerFactory y mediante el análisis de la frecuencia del sistema analizar su impacto. El documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 describe algunos aspectos clave para la implementación de la VSM, la sección 3 presenta como se obtiene la respuesta dinámica, la sección 4 muestra el caso de aplicación, en la sección 5 se realiza la discusión de los resultados encontrados y en la sección 6 se presenta las conclusiones.

## II. MARCO TEÓRICO

La VSM tiene como objetivo proporcionar inercia en el PCC de la generación no convencional, a fin de que el sistema cuente con la inercia en ese punto de conexión de manera semejante a la de un generador síncrono [3]. Físicamente está constituida por elementos electrónicos, cuya dinámica puede ser modelada en un software de ingeniería o en un conjunto de ellos como es el caso de PowerFactory de DigSILENT.

El modelo dinámico de la máquina síncrona virtual se crea mediante el lenguaje de programación DSL de PowerFactory donde se consideran los sistemas de control, las unidades de medición y los bloques de transformación dq0 de las variables de voltaje y corriente [7]. Mismo que se estructura como se muestra en la Figura 1

- El bloque de transformación  $ri/dq$  obtiene los valores de voltaje y corriente desde el punto de conexión de la VSM y lo transfiere al sistema de referencia dq0.
- El control de inercia virtual y control de potencia activa es el encargado de determinar la inercia virtual que aportará la VSM al sistema.
- El control de potencia reactiva es el encargado de proporcionar la amplitud del voltaje de referencia.
- El control PLL proporciona un valor estimado de la frecuencia.
- El control de voltaje se encarga de las referencias de corriente del generador.
- El amortiguamiento activo se utiliza para variaciones de voltaje mediante un filtr

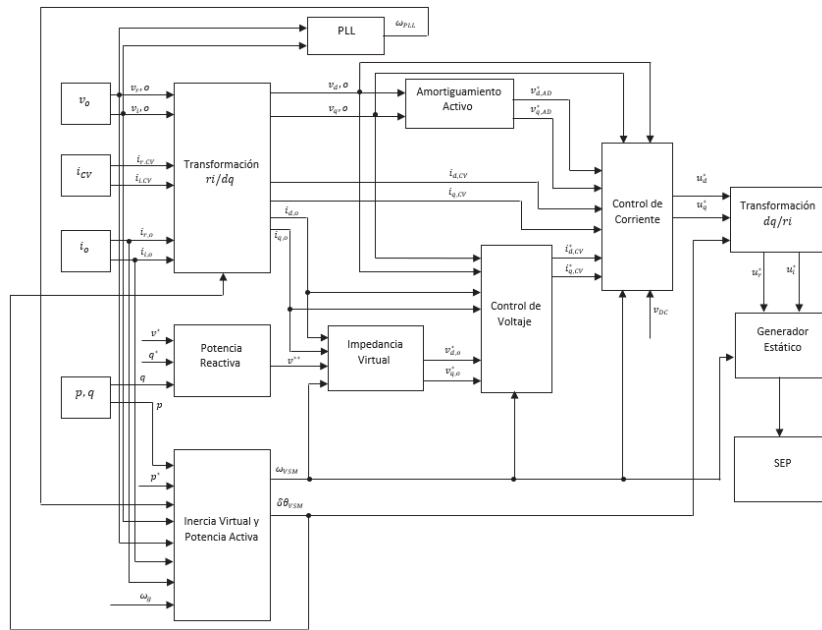


Figura 1. Esquema de control de la máquina síncrona virtual [7]

- La impedancia virtual introduce una impedancia adicional entre el convertidor del generador no convencional y la carga conectada al sistema.
- El control de corriente se encarga de las referencias de voltaje del generador.
- La transformación dq/ri transforma de vuelta las señales al sistema abc para que puedan ser enviadas al generador estático.
- El generador estático permite modelar el generador no convencional que puede ser eólico, solar u otro.

Del esquema de control de la VSM, se puede acotar que para que el sistema funcione en conjunto primero se deben crear los modelos comunes de cada uno de los sistemas de control. Es aquí en donde se representan las expresiones matemáticas que rigen su comportamiento [7]. La Figura 2 muestra el modelo común del sistema de Inercia Virtual y Potencia Activa, en el que la potencia activa y reactiva ( $p$  y  $q$ ) junto con las señales de entrada dan paso a la representación de la ecuación (1.1).

$$\frac{d \omega_{VSM}}{dt} = \frac{1}{T_a} (p^* - p - k_d(\omega_{VSM} - \omega_{PLL}) - k_w (\omega_{VSM} - \omega_{VSM}^*)) \quad (1.1)$$

Donde:

- $\omega_{VSM}$ : Velocidad de la máquina síncrona virtual en pu.
- $\omega_{VSM}^*$ : velocidad de referencia en pu.
- $T_a$ : constante de tiempo expresada en segundos.
- $p^*$ : potencia eléctrica de referencia en pu.
- $p$ : potencia eléctrica del punto de conexión del generador no convencional en pu.
- $k_w$ : ganancia de caída de velocidad.
- $k_d$ : constante de amortiguamiento
- $\omega_{PLL}$ : frecuencia de la red obtenida en el PCC en pu.

Para el caso de estudio se realiza la modelación sin la respuesta dinámica de la demanda del sistema, por lo que se omite el comportamiento de la constante de amortiguación ( $k_d$ ). La potencia y la frecuencia están estrechamente relacionadas con la ganancia de la constante ( $k_w$ ) y la

diferencia entre la velocidad de la VSM ( $\omega_{VSM}$ ) y su valor de referencia ( $\omega_{VSM}^*$ ) [7].

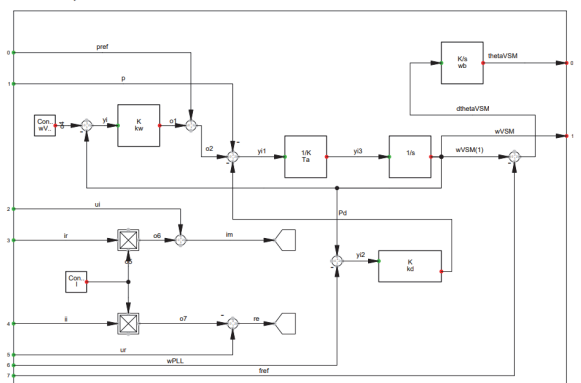


Figura 2. Modelo común del sistema de Inercia Virtual y Potencia Activa

Cada sistema de control posee su propio modelo común, posterior a ello se crea el modelo compuesto en donde se incluyen las unidades de medición y los bloques de transformación dq0 de las señales de voltaje y corriente [7]. Mismo que se estructura como se muestra en la Figura 3.

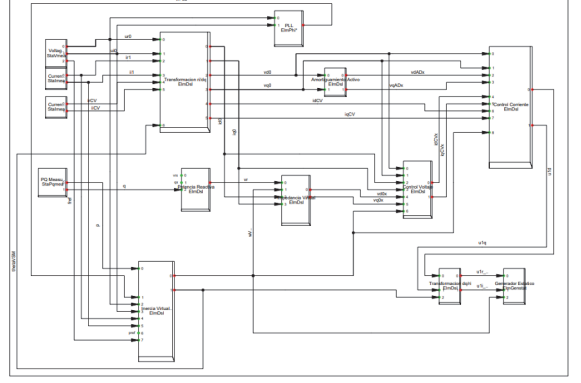


Figura 3. Modelo compuesto de la máquina síncrona virtual.

### III. METODOLOGÍA

A continuación, en la Figura 3 se presenta la metodología utilizada para analizar la respuesta de la modelación de la VSM en un sistema máquina barra infinita.

#### A. Selección del sistema y tipo de generador

En el PCC se considera un generador sincrónico que cuenta con inercia, en ese mismo punto se conecta un generador fotovoltaico que cuenta con la VSM y la misma presenta un valor de inercia similar al generador sincrónico.

#### B. Casos de estudio

Se establece un caso de estudio con el incremento del 60% de la demanda del sistema. Se realiza el análisis de la frecuencia del sistema en el PCC con la finalidad de observar el desempeño de los sistemas de control de la VSM y si existe o no el aporte de inercia correspondiente.

#### C. Visualización de resultados

Para los casos de estudio se selecciona la frecuencia y potencia del generador del PCC para determinar su respuesta en el dominio del tiempo.

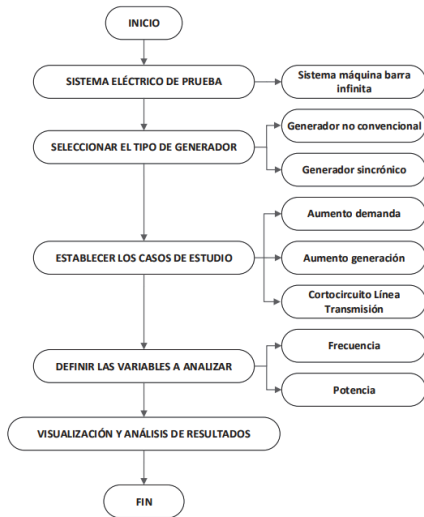


Figura 4. Esquema de la metodología de análisis de la respuesta dinámica de la VSM

### IV. RESULTADOS

#### A. Sistema de Prueba

El sistema eléctrico de prueba se presenta en la Figura 5, conformado por 3 barras a un voltaje de 0.69 kV y frecuencia de 60 Hz. Para el estudio se considera un sistema máquina barra infinita con dos tipos de generación. Generación no convencional (fotovoltaica) en la cual se incluye la VSM y el generador sincrónico convencional conectados al PCC en la barra terminal. A continuación, se presenta el caso de estudio realizado considerando la VSM.

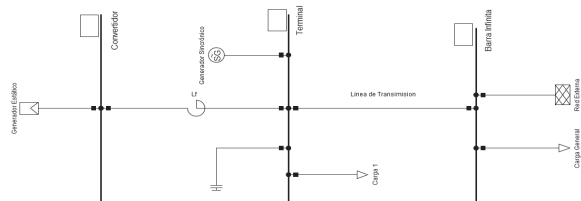


Figura 4. Sistema eléctrico de prueba.

#### B. Aumento de carga

Cuando la carga del sistema se incrementa en un 60%, la respuesta natural de la frecuencia es disminuir su valor. La respuesta de frecuencia con la VSM se ve favorecida por la actuación del sistema de control de Inercia Virtual y Control de Potencia Activa que es la encargada, mediante la configuración de sus parámetros, de manejar el aporte de inercia que tendrá la VSM. De esta manera en la Figura 5 se observa que la frecuencia presenta una razón de  $-0.888$  Hz/s retomando a su valor nominal a los 3.73 s

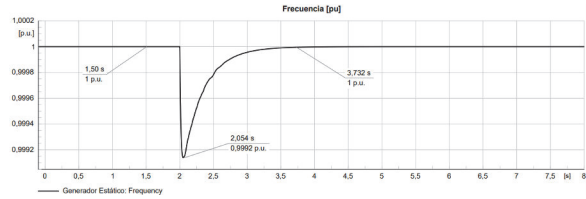


Figura 5. Frecuencia del sistema considerando la VSM.

En la Figura 6, se analiza la respuesta de la frecuencia en el PCC considerando un generador sincrónico, con un valor de inercia semejante a la que proporciona la VSM al generador no convencional. Debido a la naturaleza de almacenamiento de energía de los elementos que conforman el generador sincrónico el sistema presenta oscilaciones amortiguadas con una razón inicial de caída de la frecuencia de  $-0.93$  Hz/s, más el sistema vuelve a alcanzar su frecuencia nominal aproximadamente a los 5.34 s.

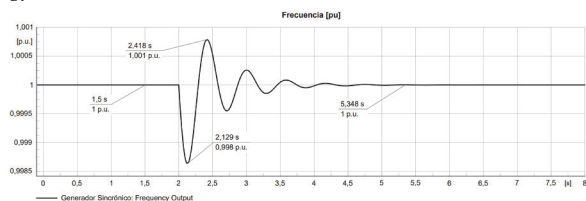


Figura 6. Frecuencia del sistema de prueba con el generador sincrónico.

### V. DISCUSIÓN

Para el caso de estudio analizado se observa que el modelo de la VSM permite al sistema contar con inercia, y debido a la característica de que la dinámica de los elementos electrónicos que la conforman la respuesta de la frecuencia no presenta oscilaciones. La VSM para el caso analizado permite incluir la inercia de un generador que no la posee o es mínima en comparación a la que naturalmente tiene el generador sincrónico gracias a los elementos que forman parte del circuito electromagnético. Se considera únicamente el aporte de inercia que genera la VSM al sistema determinando como ideal el comportamiento del generador no convencional.

### VI. CONCLUSIONES

La inclusión de una máquina sincrónica virtual (VSM) a un generador no convencional permite incluir inercia al sistema.

Contar con un modelo adecuado de la VSM mediante un software de ingeniería permite obtener la respuesta dinámica de estos nuevos dispositivos.

La VSM al ser un dispositivo conformado por elementos de electrónica de potencia que no almacenan energía permiten reducir las oscilaciones en la dinámica de las variables del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] J. Tarrasó Martínez, «Virtually synchronous power plant control», Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [2] U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, y R. Tonkoski, «Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions», *Appl. Sci.*, vol. 7, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 2017, doi: 10.3390/app7070654.
- [3] F. Bignucolo, R. Stecca, y M. Coppo, «Advantages of the Virtual Synchronous Machine regulation for integrating Low-Inertia Variable Renewable Generation in Transmission Systems», en *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, sep. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8542034.
- [4] K. S. Ratnam, K. Palanisamy, y G. Yang, «Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 124, p. 109773, may 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109773.
- [5] S. D'Arco y J. A. Suul, «Virtual synchronous machines — Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids», en *2013 IEEE Grenoble Conference*, jun. 2013, pp. 1-7. doi: 10.1109/PTC.2013.6652456.
- [6] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, y J. M.-Y. Lim, «Virtual Inertia-Based Inverters for Mitigating Frequency Instability in Grid-Connected Renewable Energy System: A Review», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 24, Art. n.º 24, ene. 2019, doi: 10.3390/app9245300.
- [7] B. Barać, M. Krpan, T. Capuder, y I. Kuzle, «Modeling and Initialization of a Virtual Synchronous Machine for Power System Fundamental Frequency Simulations», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 160116-160134, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3130375.