



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**“MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA EXCITATRIZ BASADO EN UN
GENERADOR DE CD”**

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

PRESENTA

LUIS GONZALO BAUTISTA ORTA

ASESOR

**DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
DR. GILBERTO GONZALEZ AVALOS**

Morelia, Mich.

Abril del 2018

AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo de tesis me gustaría agradecer a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad el sueño anhelado el cual solo él sabe por todo lo que he vivido para poder llegar a este momento.

A la UNIVERSIDAD por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional a través de sus pruebas, sus cursos para ser mejor y aprender algo nuevo.

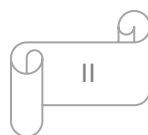
A mi asesor Dr. Gilberto Gonzales avalos por su esfuerzo y dedicación quien, con sus conocimientos, su experiencia, su motivación y en especial su paciencia que ha tenido en mi para lograr que pueda terminar mis estudios con éxito.

También a mis profesores durante toda la carrera profesional porque todos ha aportado un granito de arena a mi formación, también a mis compañer@s (mi familia de la facultad) que siempre me apoyaron en los momentos difíciles de la formación en especial cuando estaba a punto de terminar.

Y por último y lo más importante a mi familia padres Miguel Bautista y Alicia Orta Ochoa por todo su apoyo incondicional, los cuales me han motivado durante mi formación y nunca me han dejado solo a pesar de lo difícil que ha sido, a mis hermanos que son con los que siempre puedo contar en cualquier momento.

También a mi tío José y su esposa mi tía Lilia quienes estuvieron apoyándome en una de las etapas más difíciles de mi vida.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones. Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.



DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor que desde niño me ha dado en cada paso que doy en mi camino. Por ser lo más importante de mi vida.

A mi madre Alicia

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor y su apoyo que nunca me faltó en los momentos más difíciles donde creía no poder seguir adelante.

A mi padre Miguel

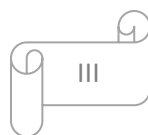
Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y no rendirme por muy difícil que se parezca el problema.

A mis hermanos

Con los que siempre puedo contar en el momento menos indicado y por muchas diferencias que tengamos siempre podremos contar el uno con el otro.

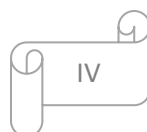
A mi familia

Que fueron los que estuvieron hay cuando mas los necesite apoyando a mis padres.

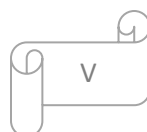


INDICE

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
INDICE	IV
RESUMEN	VI
PALABRAS CLAVE	VII
ABSTRACT	VIII
KEYWORDS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLO Y ABREVIATURA	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 La importancia de la excitatriz de la máquina síncrona	12
1.2 Objetivo	14
1.3 Justificación	15
1.4 Metodología	15
1.5 Contenido de la tesis	16
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE LA MÁQUINAS ELÉCTRICAS	17
2.1 Máquinas eléctricas y su historia	17
2.1.1 Significado de las Máquinas eléctricas	19
2.2 Tipos de máquinas eléctricas	20
2.2.1 Máquinas de corriente continua	20
2.2.2 Motores de inducción	21
2.2.3 Transformadores	23
2.2.4 Generador síncrono	25
2.3 Centrales eléctricas	30
CAPÍTULO 3 MODELADO DE UN GENERADOR SINCRONO	33
3.1 ¿Que es 20-sim?	33
3.2 Transformación de Park o D-Q	35
3.3 Simulación de un generador síncrono	37
3.3.1 Transformación de park aplicada	38
3.3.2 Ecuaciones de enlace de flujo	40
3.3.3 Auto inductancias estator	41
3.3.4 Auto inductancia del rotor	41



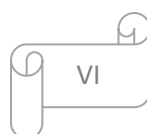
3.3.5 Inductancias mutuas del estator	42
3.3.6 Inductancias mutuas del rotor	42
3.3.7 Inductancias mutuas de estator a rotor	42
3.3.8 Transformación de inductancias	43
3.3.9 Ecuaciones de voltaje	45
3.3.10 Parte mecánica de un generador síncrono	48
3.3.11 Modelado en 20-sim	51
CAPÍTULO 4 MODELADO Y SIMULACION DE UN GENERADOR CON EXCITATRIZ .	56
4.1 Modelos de la máquina DC	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63



RESUMEN

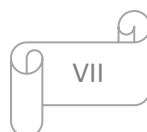
En el presente trabajo de tesis, se describe el modelo matemático de una máquina síncrona con una excitatriz propia a través de un generador de CD que está conectado a la misma flecha que generador síncrono. La parte inicial de este trabajo se explica de la forma de cómo han ido evolucionando las máquinas eléctricas y la importancia que han tenido en la vida cotidiana, industrial y sobre todo en las empresas. También se describe el cómo puede ser posible la generación de energía eléctrica y algunas formas de hacerlo. La parte central de este trabajo es en el modelado matemático de un generador síncrono a través de la transformada de Park, ayuda a cambiar las variables de tiempo (a-b-c) a un dominio de directa o rotatorio (0dq) donde estaremos trabajando el modelado y sea una forma más sencilla, teniendo el modelado y los resultados en 0dq pasamos aplicar la matriz inversa de Park para poder tener los resultados en forma del tiempo que son (abc) y por último, lo simulamos en la plataforma de 20-sim.

La segunda parte es el modelado de un generador de cd que está conectado a la misma flecha del generador síncrono el cual se encarga de la excitatriz del mismo, por último, tendremos las gráficas de los resultados de las corrientes en 0dq y abc.



PALABRAS CLAVE

Generador síncrono, excitatriz, diagrama de bloques, transformación de Park, inversa de Park, modelado, simulación, estator, rotor, generador de cd, devanados.



ABSTRACT

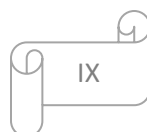
In this thesis, we describe the mathematical model of a synchronous machine with its own exciter through a DC generator that is connected to the same arrow as a synchronous generator. The initial part of this work is explained by the way electric machines have evolved and the importance they have had in everyday, industrial and, above all, in companies. It also describes how electrical power generation may be possible and some ways to do it. The central part of this work is in the mathematical modeling of a synchronous generator through the park transform, it helps to pass the time variables (abc) to a direct or rotating domain (0dq) where we will be working the modeling and be in a simpler way, having the modeling and the results in 0dq we pass the park inverse to be able to have the results in the form of the time they are (abc) and finally we simulate it in the 20 sim platform.

The second part is the modeling of a cd generator that is connected to the same arrow of the synchronous generator which is responsible for the exciter of the same, last we will have the graphs of the results of the currents in 0dq and abc.



KEYWORDS

Synchronous generator, exciter, block diagram, park transformation, park inverse, modeling, simulation, stator, rotor, DC generator, windings.



ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

FIGURA 1. 1 EXCITATRIZ SIN ESCOBILLAS.....	13
FIGURA 1. 2 GENERADOR CA POLIFÁSICO SIN ESCOBILLAS	14

CAPITULO 2

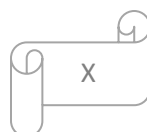
FIGURA 2. 1 PRIMER GENERADOR ELECTROIMÁN	17
FIGURA 2. 2 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA	20
FIGURA 2. 3 ROTOR DE JAULA DE ARDILLA	22
FIGURA 2. 4 ROTOR DEVANADO	22
FIGURA 2. 5 TRANSFORMADOR ELÉCTRICO.....	24
FIGURA 2. 6 GENERADOR SÍNCRONO	25
FIGURA 2. 7 ROTOR DE POLOS SALIENTES	26
FIGURA 2. 8 ROTOR DE POLOS LISOS.....	27
FIGURA 2. 9 ESTATOR TRIFÁSICO	28
FIGURA 2. 10 CENTRAL HIDROELÉCTRICA	31
FIGURA 2. 11 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	32

CAPITULO 3

FIGURA 3. 1 20- SIM.....	33
FIGURA 3. 2 20-SIM Y ALGUNAS HERRAMIENTAS QUE TIENE.....	34
FIGURA 3. 3 SIMULADO DE 20 SIM.....	35
FIGURA 3. 4 REPRESENTACIÓN DE UNA MAQUINA SÍNCRONA CON LA TRANSFORMADA DE PARK PARA EL DESARROLLO MATEMÁTICO.....	38
FIGURA 3. 5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA MAQUINA SÍNCRONA	45
FIGURA 3. 6 MODELADO DE LA MAQUINA SÍNCRONA EN 20 SIM	51
FIGURA 3. 7 PARTES DEL MODELO SÍNCRONO.....	53
FIGURA 3. 8 RESULTADOS DEL MODELADO EN LA TRANSFORMADA DE PARK	54
FIGURA 3. 9 VOLTAJES DE SALIDA DE LAS TRES COMPONENTES	54
FIGURA 3. 10 VOLTAJES DE SALIDA DE LAS TRES COMPONENTES EN A-B-C.....	55

CAPITULOS 4

FIGURA 4. 1 GENERADOR DE CD	57
FIGURA 4. 2 ESQUEMA DE LA MAQUINA CD.....	58
FIGURA 4. 3 SIMULACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO CON UNA EXCITATRIZ DE CD	59
FIGURA 4. 4 RESPUESTA DEL MODELADO DE UN GENERADO SÍNCRONO CON UNA EXCITATRIZ PROPIA DE UN GENERADOR DE CD.....	60
FIGURA 4. 5 CORRIENTE EN EL MODELADO EN ABC	61
FIGURA 4. 6 CORRIENTE DE LA SIMULACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO.....	61



LISTA DE SÍMBOLO Y ABREVIATURA

A	Amperes
AC	Corriente alterna
DC	Corriente continua
V	Volts
E_a	Voltaje inducido
i_a	Corriente de excitación
I	Corriente
L_a	Inductancia de armadura
L_{jk}	Autoinducción cuando
T_j	Constante del rotor
n	Constante
P	Transformada de Park
P^{-1}	Inversa de park
R_a	Resistencia del inducido
r	Resistencia
R_L	Resistencia
T_d	Par dinámico
T_e	Par electromagnético
T_m	Par mecánico de entrada
ω	Velocidad angular
Σ	Suma de todos los términos
λ	Enlace del flujo
w_{Rt}	Relación de frecuencia angular síncrona
δ	Angulo de torque síncrono

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 La importancia de la excitatriz de la máquina síncrona

La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se efectúa a través de sistemas trifásicos de corrientes alterna.

Las ventajas que se obtiene en los sistemas trifásicos con respecto a los monofásicos son: ahorro de materiales en equipos, líneas de transmisión y distribución.

Generación de campos magnéticos rotantes (principios de funcionamiento de los motores)

Potencia instantánea constante (lo cual hace que los motores tengan una marcha más suave y silenciosa)

El generador síncrono es la máquina que se utiliza en las centrales eléctricas es una máquina que está compuesta por dos partes principales que son: Estator y Rotor.

Un estator constituido por un paquete de chapas magnéticas conformando un cilindro con una serie de ranuras sobre las cuales están colocadas conductores, conectados entre sí, de forma tal de crear un conjunto de bobinas.

Un rotor ubicado dentro del estator y que consiste en un electroimán alimentado por corriente continua. El giro del rotor se produce mediante una maquina impulsora (turbina de vapor, de gas, eólica) que mantiene una velocidad angular constante. La alimentación del electroimán se logra a través de un par de anillos rozante que permiten la continuidad eléctrica entre una parte fija y una parte móvil.

La excitatriz es la encargada de suministrar la tensión y corriente continua para alimentar el rotor de un generador síncrono, y convertir a éste en un electroimán con capacidad en general para regular la intensidad del campo magnético.

La excitatriz de un generador eléctrico síncrono de corriente alterna sirve, básicamente, para alimentar de corriente continua el rotor del generador, y convertir éste en un electroimán. Se puede mostrar en la figura 1.1.

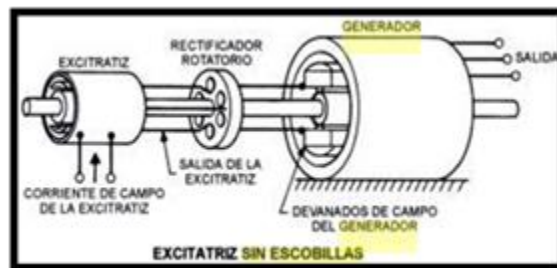


Figura 1. 1 Excitatriz sin escobillas

La resistencia que ofrece el bobinado del rotor es fija, por lo que variando la tensión continua de alimentación se consigue variar la intensidad de la corriente que circula por el rotor, variando así la intensidad del campo magnético de acoplamiento.

El gran problema mecánico que tiene que resolver la excitatriz es el de conectar los cables que alimentan las bobinas del rotor, en movimiento, con elementos externos, que no giran. El problema puede resolverse mecánicamente o eléctricamente, dando lugar a diferentes tipos de excitatriz. Todas ellas deben tener idealmente la capacidad de regular la tensión de alimentación del rotor, para variar el campo magnético de acoplamiento.

El devanado de corriente continua sobre la estructura giratoria del campo se conecta a una fuente externa por medio de anillos deslizantes y escobillas. Algunas estructuras de campo no tienen escobillas, sino que tienen excitación sin escobillas por medio de diodos giratorios.

La presente invención se refiere a un generador CA polifásico sin escobillas que es adecuado para la excitación para avance de ángulo y a un aparato de control de excitación para uso con él.

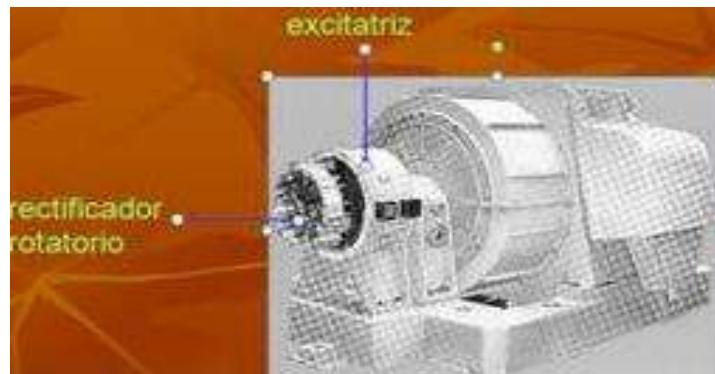


Figura 1. 2 Generador ca polifásico sin escobillas

Un generador CA polifásico sin escobillas sensores de polo magnético, cada uno para detectar la posición rotativa de un rotor e incluyendo una pluralidad de fases a cada una de las cuales se suministra una corriente de fase, teniendo la corriente de fase su temporización de suministro avanzada en ángulo una cantidad predeterminada de ángulo según la señal de detección del sensor de polo magnético, donde cada uno de los sensores de polo magnético está dispuesto de manera que la temporización con que la corriente de fase se suministra para avance de ángulo pueda coincidir con la temporización con que se cambia el campo magnético detectado por el sensor de polo magnético [1].

1.2 Objetivo

El presente trabajo tiene la finalidad de poder demostrar en forma de simulación de un sistema, un generador síncrono eléctrico con una excitación sin escobillas (generador) el cual podremos desarrollar con un programa llamado 20- sim.

- ✓ Conocer la forma de operación de un generador síncrono.
- ✓ Conocer la importancia de la excitatriz de un generador síncrono.
- ✓ Conocer algunas de las características de la forma de excitatriz para su alimentación de corriente de cd que necesitan para poder generar electricidad.

- ✓ Obtener el modelado matemático de una máquina como generador síncrono con una excitatriz.
- ✓ Simular el generador síncrono con una excitatriz sin escobillas con el software 20-sim.
- ✓ Conocer el tipo de excitatrices en los generadores de gran capacidad y por qué se usa ese tipo.
- ✓ Forma de comportamiento de un generador síncrono con una excitatriz.
- ✓ Conocer el modelo síncrono y su simulación en 20 sim

1.3 Justificación

El poder demostrar en forma de simulación de un generador síncrono ayuda a comprobar y demostrar el funcionamiento de tal generador sin la necesidad de llevarlo a la práctica donde podemos corregir muchas cosas sin invertir en la construcción de cierta máquina.

Este tipo de generador son de los principales usados en las plantas de generación ya que son más eficientes y con menores pérdidas.

Un modelado y una simulación nos ayuda a conocer la mayor parte de fallas que pueda tener y la mejor forma para que trabajen mejor sin necesidad de construcción.

1.4 Metodología

La metodología para poder llevar a cabo este proyecto será por partes, las cuales son:

- Investigación de la forma en como iniciaron y como fueron revolucionando hasta este momento el generador síncrono con excitatriz.
- Investigar el tipo de operación en la actualidad.
- Obtener un modelado matemático de la excitatriz para su funcionamiento.
- Simular el generador síncrono con excitatriz para ver su funcionamiento muy similar a la realidad.

- Obtener resultados y llegar a una conclusión coherente con la realidad.

1.5 Contenido de la tesis

- En el primer capítulo se describe brevemente la importancia de la excitatriz de un generador síncrono, el objetivo que se planteó dentro del proyecto, la metodología que se utilizará para poder tener un mejor fruto de trabajo y un mejor análisis y por último encontrará la justificación el cual nos dice muy brevemente por qué se lleva a cabo.
- En el segundo capítulo se da una breve introducción de los tipos de máquinas y como se fueron actualizando con el paso de los tiempos y parte de su funcionamiento en especial el generador síncrono.
- En el tercer capítulo se determinará el modelado matemático de un generador síncrono.
- En el cuarto capítulo se obtiene la simulación de un generador síncrono-excitatriz
- En el quinto capítulo se presentará las conclusiones y recomendaciones sobre el sistema del modelado y simulación.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

2.1 Máquinas eléctricas y su historia

Unos de los primeros descubrimientos los hace el científico H. C. Oersted en 1820 donde demostró con interacción entre el magnetismo y la electricidad, esto mediante la observación del movimiento de una brújula puesta cerca de un hilo recorrido por corriente eléctrica. Esto provocó en el francés Amper, aprobar su teoría electromagnética y sobre Arago, la construcción del primer electroimán.

El primer generador electromecánico, basado en el fenómeno de la inducción electromagnética, lo construyó Faraday en 1831, el cual se muestra en la figura 2.1.

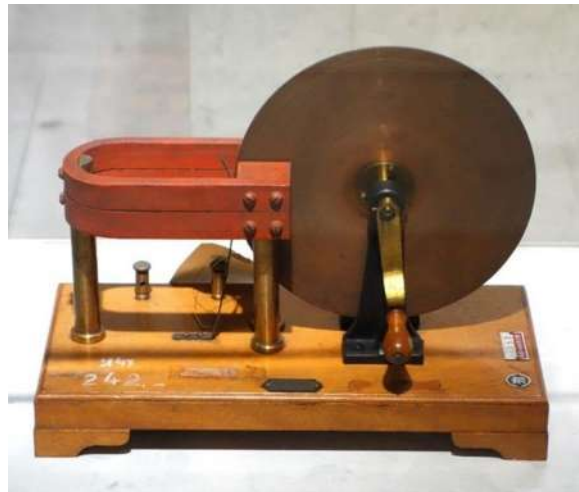


Figura 2. 1 Primer generador electroimán

Consiste simplemente en un disco de cobre que gira sobre su eje, accionado por una manivela, de modo que parte de él está afectado siempre por el campo magnético de un imán permanente. La porción de disco afectada por los polos se mueve

perpendicularmente a las líneas del campo y, en consecuencia, se induce en ella una tensión que puede recogerse entre el eje y el borde del disco, por medio de unos contactos deslizantes.

Mientras muchos fabricaban motores de corriente directa de forma experimental lo cual eran alimentados a través de pilas y batería, estaban basados en la atracción y repulsión entre imanes, pero al ser motores de corriente continua su forma de construcción era difícil ya que se utilizaban para la industria y tendrían que ser grandes y por tanto no eran tan eficaces y así pasaron años ya que a nadie se le había ocurrido que los mismos generadores eléctricos de corriente continua eran reversibles y podrían ser utilizados como motores en 1873.

Al descubrir que podían ser reversibles fue de gran apoyo los generadores de corriente continua y su aplicación. El motor eléctrico con inducción de tambor tipo Siemens se extendió a múltiples aplicaciones industriales y de tracción (máquinas agrícolas, grúas).

Con dichos motores se construyó la primera locomotora eléctrica para las minas, por parte de Siemens y Halske en el año 1879. El desarrollo de la tracción eléctrica en tranvías y ferrocarriles fue en adelante rapidísimo, hasta el punto de que en menos de 20 años se dispuso de locomotoras capaces de alcanzar más de 200 Km/h.

Finalmente, en 1885 se descubrió el principio del campo giratorio con el diseño y construcción de máquinas eléctricas lo cual las primeras propuestas fueron hechas por Galileo Ferrari profesor de la universidad de Turín. Ferrari demostró que dos corrientes alternas actuando sobre dos devanados colocados en el estator de una máquina eléctrica producen en su interior un campo magnético giratorio capaz de mover un rotor con cilindro de cobre, siempre y cuando cumpla la condición de que las dos corrientes estén desfasadas en el tiempo y los dos devanados desplazados en el espacio, sin embargo, no le dio la importancia a su descubrimiento ya que no lo veía tan importante e incluso llegó a afirmar que no servía para construir nuevos modelos de motores eléctricos suficientemente eficaces. Al mismo tiempo Nikola Tesla y Von Dolivo-Dobrowolsky quienes presentaron motores de inducción con un

rotor de varillas de cobre en cortocircuito, cuya construcción es esencial, no se diferencia mucho de la que tienen los motores de corriente alterna actuales.

Gracias a este importante descubrimiento se impulsó el uso de la corriente alterna en la transmisión de la energía a grandes distancias con lo que los generadores de corrientes continuas fueron poco a poco sustituidos en las centrales por grandes alternadores trifásicos.

La generación y utilización de las corrientes eléctricas han permitido a la humanidad, cambiar de forma radical su forma de vida [2].

2.1.1 Significado de las Máquinas eléctricas

Una máquina eléctrica es un dispositivo el cual tiene la capacidad de convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica.

Cuando se utiliza para convertir energía mecánica a energía eléctrica se le llama generador y cuando se convierte energía eléctrica en energía mecánica se le llama motor, eso puede ser gracias al campo magnético que se genera.

El transformador es otra máquina muy relacionada con los motores y generadores solo que su función es el convertir a diferentes niveles el voltaje y corrientes según sea el caso que se requiera. Puesto que los transformadores operan con base en los mismos principios que los generadores y los motores.

Estos diferentes tipos de máquinas los podemos utilizar en nuestra vida diaria y los podemos encontrar en el hogar (los motores hacen funcionar los refrigeradores, congeladores, batidoras, ventiladores etc.). Los generadores los utilizamos para suministrar la energía que utilizan todos estos motores

2.2 Tipos de máquinas eléctricas

2.2.1 Máquinas de corriente continua

Este tipo de máquina nace con el descubrimiento de la ley de inducción al igual que los transformadores, donde tuvo que pasar por cuatro partes o etapas de desarrollo.

Sus cuatro periodos de desarrollo fueron los siguientes:

- De tipo de magnetoeléctrico con imanes permanentes (1831 - 1851).
- De tipo electromagnético con excitación independiente (1851 - 1871).
- De tipo de polos múltiples con inducción perfeccionado (1871 - 1886).
- Con autoexcitación y tipo elemental del inducido.

Este tipo de máquina tiene una mayor facilidad de mantener constante su velocidad de rotación, así como la fabricación de micro-motores utilizados en la electrónica. En la figura 2.2 se ilustra la máquina de corriente continua

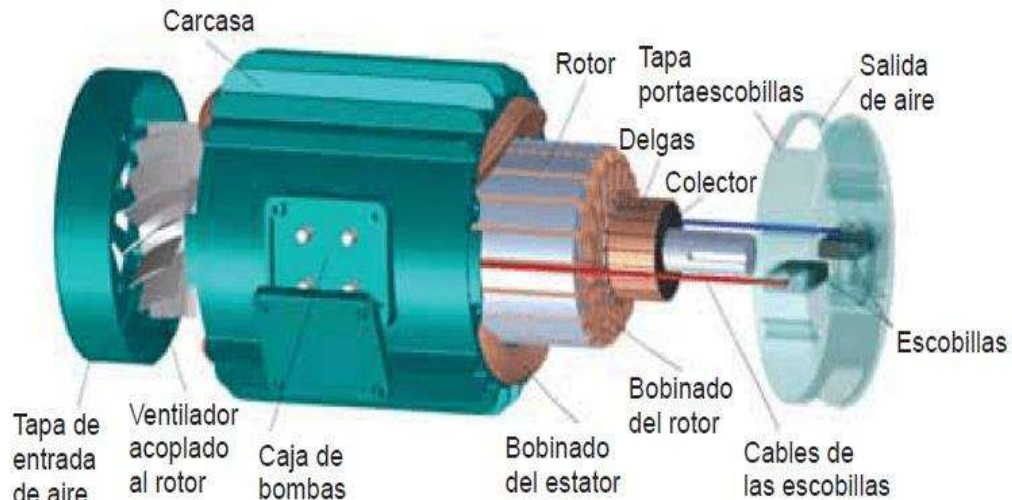


Figura 2. 2 Máquina de corriente continua

Las máquinas eléctricas son generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica y motores porque convierten energía eléctrica en energía mecánica.

La mayor parte de las máquinas de corriente continua son semejantes a las de corriente alterna porque en su interior tiene corriente y voltaje de corriente alterna. La máquina de corriente continua tiene un mecanismo que convierte los voltajes internos de corriente alterna en voltajes y corrientes continuas en las terminales. Este mecanismo se llama colector, y por ello las máquinas de corriente continua se conocen también como máquinas con colectores.

2.2.2 Motores de inducción

Los motores de inducción, también llamados asíncronos son un tipo de motor de corriente alterna en el que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir torsión es inducida por inducción electromagnética del campo magnético de la bobina del estator. Por tanto, un motor de inducción no requiere una conmutación mecánica a parte de su misma excitación o parte de la energía transferida del estator al roto como en los de DC y motores grandes síncronos.

Hay dos diferentes tipos de rotores de los motores de inducción que pueden ser utilizados dentro del estator.

- A) Rotor de jaula de ardilla, son los que constan de una serie de barras conductoras pue dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en algunos de sus extremos mediante grandes anillos de cortocircuito, donde se ilustra en la figura 2.3.

- B) Rotor devanado, Tiene un conjunto complejo de devanados trifásicos que son imanes especulares de los devanados del estator, los devanados por lo regular están conectados en forma de Y, sus extremos están unidos a los anillos rozantes en el eje del rotor, lo cual se ilustra en la figura 2.4.



Figura 2. 3 Rotor de jaula de ardilla

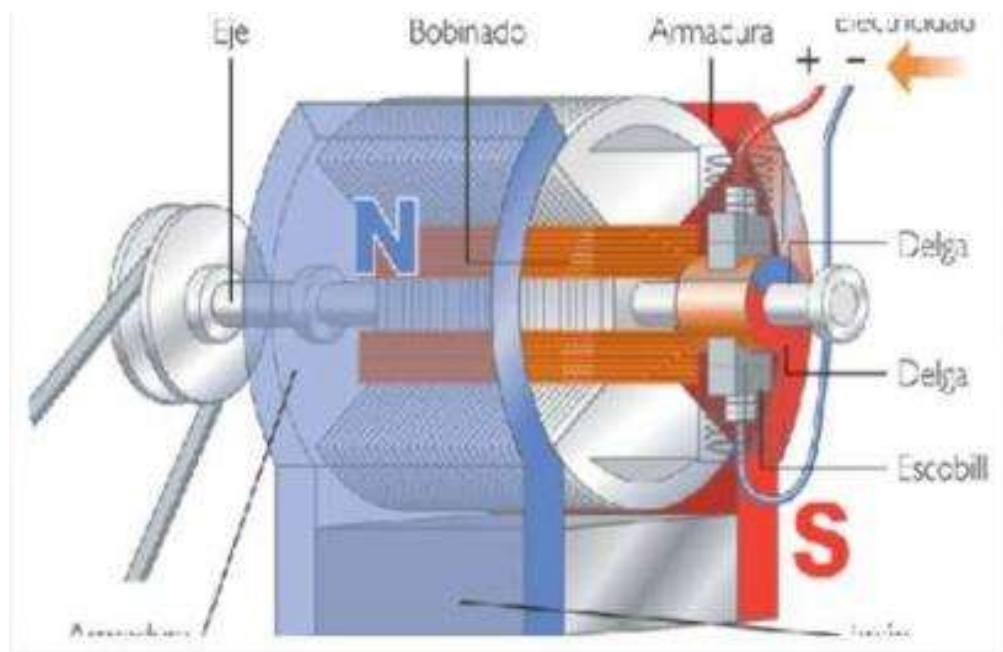


Figura 2. 4 Rotor devanado

El motor asíncrono está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos, y un estator en el que se encuentra las bobinas de inducción. Estas bobinas son trifásicas y entre ellas están desfasadas entre si 120 grados. Según el Teorema de Ferrari,

cuando por estas bobinas circula una corriente trifásica equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es de 120 grados, se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor y lo hace girar. Este campo magnético va a inducir una tensión en el rotor según la ley de Faraday.

La diferencia entre el motor de inducción y el motor universal es que en el motor de inducción el devanado del rotor no está conectado al circuito de excitación del motor, sino que esta eléctricamente aislado.

Tiene barras de conducción incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Las barras están conectadas con anillos en cortocircuito a cada extremidad del rotor. Están soldadas a las extremidades de las barras. (Este ensamble se parece a las pequeñas jaulas rotativas para ejercitar a mascotas como hámster y por eso a veces se llaman “jaula de ardillas”) y los motores de inducción se llaman motores de jaula de ardilla.

El campo magnético giratorio, a velocidad de sincronismo, creado por el bobinado del estator, corta los conductores del rotor, por lo que se genera una fuerza electromotriz de inducción.

La acción mutua del campo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor, originan una fuerza electrodinámica sobre dichos conductores del rotor, las cuales hacen girar el rotor del motor.

La diferencia entre las velocidades del rotor y el campo magnético se denomina deslizamiento.

2.2.3 Transformadores

Es un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético, el cual se muestra en la figura 2.5.

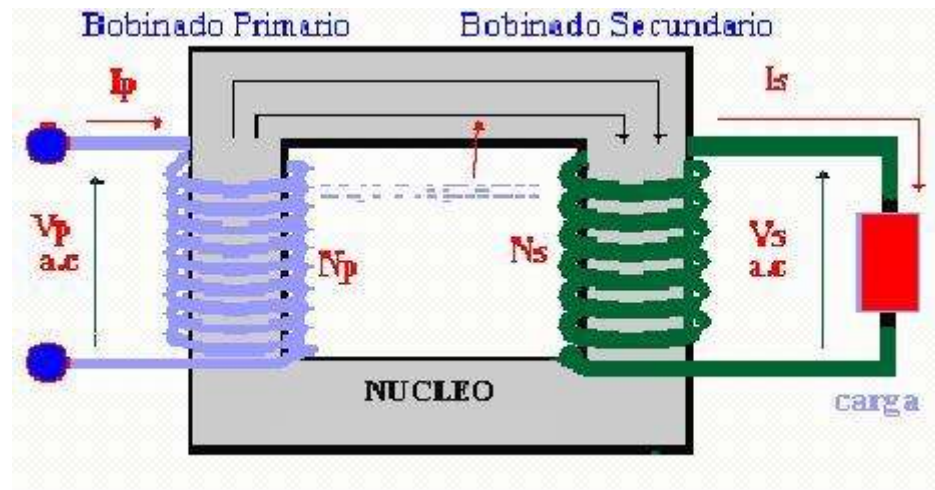


Figura 2. 5 Transformador eléctrico

Consta de diferentes elementos.

Los básicos son: Núcleo, devanados

- a) Núcleo: está compuesto por columnas, que es la parte donde se monta los devanados y las culatas, que es la parte donde se realiza la unión entre las columnas, se utiliza para conducir el flujo magnético ya que es un gran conductor magnético.
- b) Devanados: El devanado es un hilo de cobre enrollado a través del núcleo en uno de sus extremos y recubierto por una capa aislante, que suele ser barniz. Está compuesto por dos bobinas, la primaria y secundaria y su relación de vueltas del hilo nos indica la relación de transformación.

Para poder transmitir grandes potencias se necesita poder elevar los niveles de voltaje y disminuir la corriente y esto es posible al transformador.

La potencia eléctrica alterna que se genera en un sitio determinado se eleva el voltaje para poderla transmitir a largas distancias con menos pérdidas y al final donde se utilizará se reduce para dejarla nuevamente a niveles de utilización. Puesto que las pérdidas de transmisión en líneas de una red de potencia son proporcionales al cuadrado de la corriente, al elevar con transformadores 10 veces

el voltaje de transmisión se reduce la corriente en el mismo número de veces y las pérdidas de transmisión se reducen 100 veces.

Sin el transformador simplemente no sería posible utilizar la potencia eléctrica en muchas de las formas en que se utiliza hoy en día. [3]

2.2.4 Generador síncrono

A lo largo de los años las máquinas eléctricas han tenido diferentes aplicaciones y cada vez son mejores para facilitar las necesidades de la humanidad

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de ca y son parte fundamental en las plantas de generación de energía eléctrica.

En la figura 2.6. se muestra una máquina síncrona.

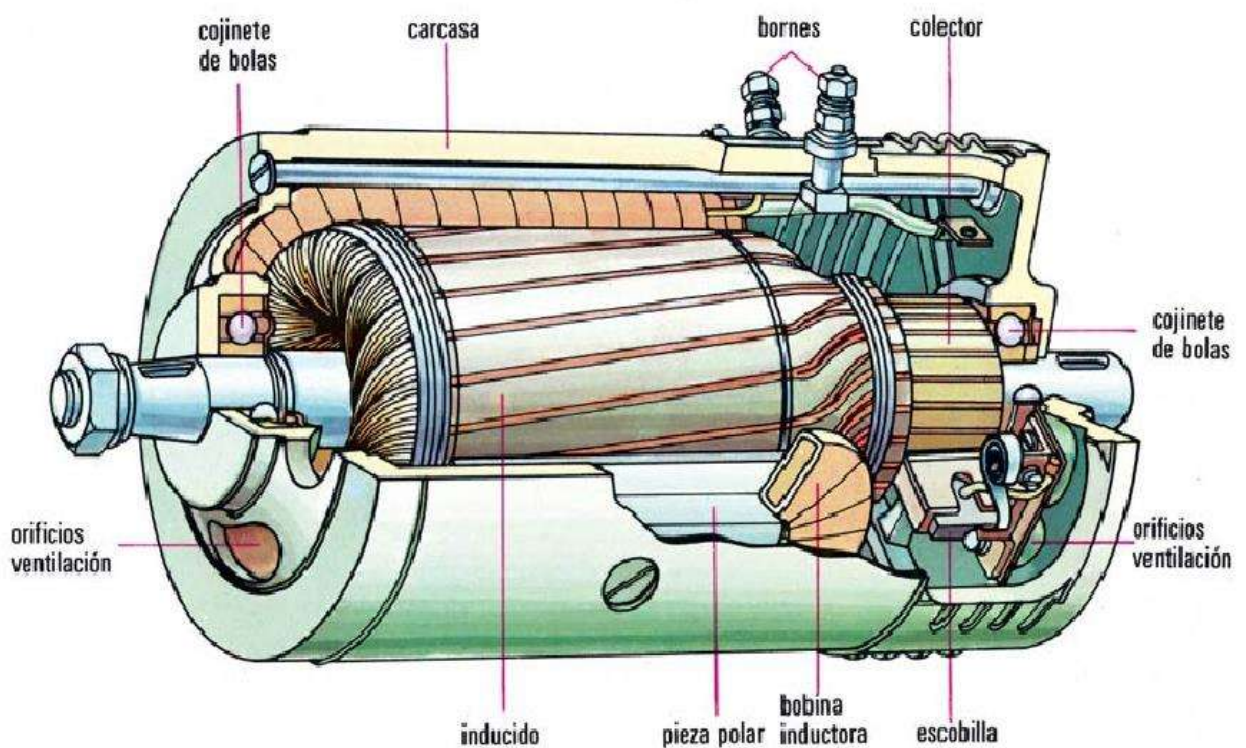


Figura 2. 6 Generador síncrono

El generador eléctrico tiene elementos básicos que lo conforman que son los siguientes:

a) ROTOR:

Construido de una parte móvil (rotor o inductor) y una parte fija (estator o inductor) las cuales están separadas por un entre hierro. El sistema inductor contiene los polos magnéticos cuales son excitados con corriente continua y están destinados para crear el flujo inductor. El sistema comúnmente utilizado cuenta con un circuito de excitación el cual alimenta los polos del rotor mediante anillos colectores.

Existe dos tipos de generadores y esto depende del estator ya que utilizan de dos tipos, dependiente de las características de donde se va utilizar. Rotor de polos saliente y rotor de polos lisos.

Para velocidades bajas lo recomendable es de polos salientes y velocidades mayores como 3600 rpm se utilizan rotores de polos lisos. Se puede mostrar en la figura 2.7. y 2.8.

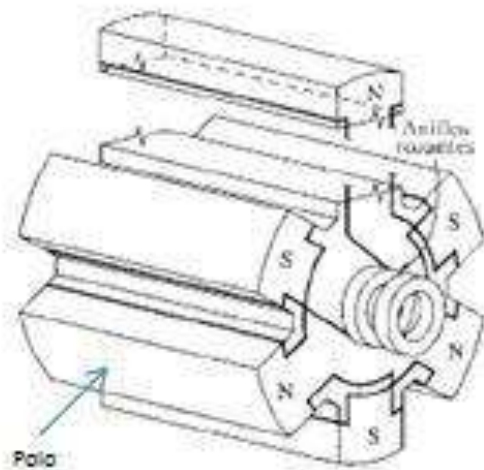


Figura 2. 7 Rotor de polos salientes

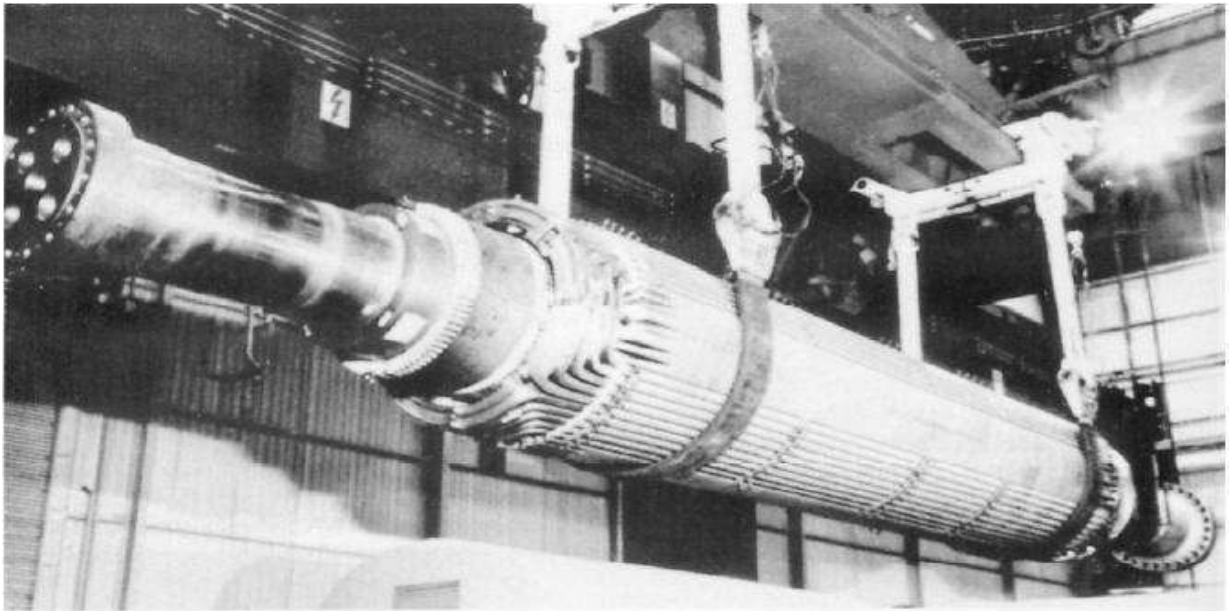


Figura 2. 8 Rotor de polos lisos

b) ESTATOR

Es la parte fija el cual está construido principalmente de la siguiente forma:

- Carcasa
- Núcleo magnético
- Devanados
- Accesorios mecánicos
- Tiene la función de sostener y centrar el núcleo magnético del estator, como se ilustra en la figura 2.9.

Para centrales hidroeléctricas el montaje se hace en forma vertical mientras que para centrales termoeléctricas el montaje es horizontal.



Figura 2. 9 Estator trifásico

Los devanados siempre son conectados en estrellas y el neutro es conectado a tierra. La conexión es en estrella y esto se debe que los generadores están bajo carga, el voltaje inducido en cada fase tiende a distorsionarse y la forma de onda no es del todo senoidal. Con la conexión en estrella la distorsión por armónicos de línea a neutro no aparece entre las líneas porque ellas se cancelan. Regularmente los voltajes de línea permanecen senoidales bajo cualquier condición de carga.

c) SISTEMA DE EXCITACIÓN

Los generadores síncronos tienen su salida de voltaje en media tensión es necesario hacer uso de un sistema de excitación en el campo para alcanzar el voltaje de salida.

La excitación es parte sustancial del generador debido a que además de mantener el voltaje de salida estable, debe tener una respuesta rápida ante cambios repentinos de carga de tal manera que no altere la estabilidad del sistema.

En términos generales los sistemas de excitación se clasifican de acuerdo a la fuente de poder que se utiliza en la excitación de los cuales se derivan los siguiente.

- Corriente continua (DC)
- Corriente Alterna (AC)

Con la aplicación de una corriente de cd al devanado del rotor la cual produce un campo magnético en rotor. En seguida el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador.

Los devanados de una máquina son devanados de campo y devanados del inducido, devanados de campo se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina y el devanado del inducido se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. Los devanados de campo los podemos encontrar en el rotor y los devanados de inducido en el estator.

Se debe suministrar una corriente de cd al circuito de campo del rotor, puesto que el rotor está girando, se requiere de un arreglo especial para que la potencia cd llegue a los devanados de campo. Existe dos formas comunes de suministrar esta potencia cd.

- 1) Suministrar al rotor la potencia de cd desde una fuente externa cd por medio de anillos rozantes y escobillas.
- 2) Suministrar la potencia cd desde una fuente de potencia cd especial montada directamente en el eje del generador síncrono

Los anillos rozantes son anillos de metal que circulan por completo el eje de una máquina, pero se encuentra aislado del él.

Una escobilla es un bloque de un compuesto de carbón que conduce electricidad libremente, pero tiene una fricción muy baja, por lo que no desgasta al anillo rozantes.

Si el extremo positivo de una fuente de voltaje cd se conecta a una escobilla y el extremo negativo se conecta a la otra, entonces se aplica el mismo voltaje cd al devanado de campo en todo momento, sin importar la posición angular o velocidad del rotor.

En los generadores y motores más grandes se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar a la máquina corriente de campo de cd. Un excitador sin

escobillas es un generador de ca pequeño con un circuito de campo magnético montado en el estator y un circuito de armadura en el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador se rectifica a corriente directa por medio de un circuito rectificador trifásico (se encuentra en el eje del generador) y luego se alimenta al circuito de campo cd principal. Por medio del control de la pequeña corriente de campo cd del generador excitador (estator) es posible ajustar la corriente de campo en las máquinas principales sin anillos rozantes ni escobillas.

Debido a que no se presenta ningún contacto mecánico entre el rotor y el estator, los excitadores sin escobillas requieren mucho menos mantenimiento que los anillos rozantes y las escobillas [3].

2.3 Centrales eléctricas

¿Qué es una Central Eléctrica?

Es cualquier instalación que tenga como función transformar energía mecánica en energía eléctrica.

Las centrales eléctricas son las diferentes plantas encargadas de la producción de energía eléctrica donde se encuentran generalmente en las cercanías de fuentes de energía básicas (ríos, yacimientos de carbón, etc.). También pueden ubicarse próximas a las grandes ciudades y zonas industriales, donde el consumo de energía es elevado.

Para realizar la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean unas máquinas denominadas generadores, que constan de dos piezas fundamentales: el estator y el rotor. La primera de ellas es una armadura metálica cubierta en su interior por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos. La segunda, el rotor, situada en el interior del estator, está formada en su parte interior por un eje, y en su parte más externa por unos circuitos, que se transforman en electroimanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente.

Cuando el rotor gira a gran velocidad, debido a la energía mecánica aplicada, se producen unas corrientes en los hilos de cobre del interior del estator. Estas

corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de proporcionar energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él.

Esta energía eléctrica generada se envía a través de una red de líneas eléctricas hasta los lugares de consumo. A la salida de la central eléctrica, la tensión es de 110 kV, 220 kV ó 380 kV; es decir, mediante un transformador se obtiene una alta tensión, para que las pérdidas en el transporte sean mínimas la cual se puede mostrar en la figura 2.10

Después, en los lugares de consumo, se vuelve a transformar, mediante otros transformadores, a las bajas tensiones conocidas de 380 V, 220 V ó 125 V, que son las que usualmente empleamos en nuestros equipos y aparatos. [4]

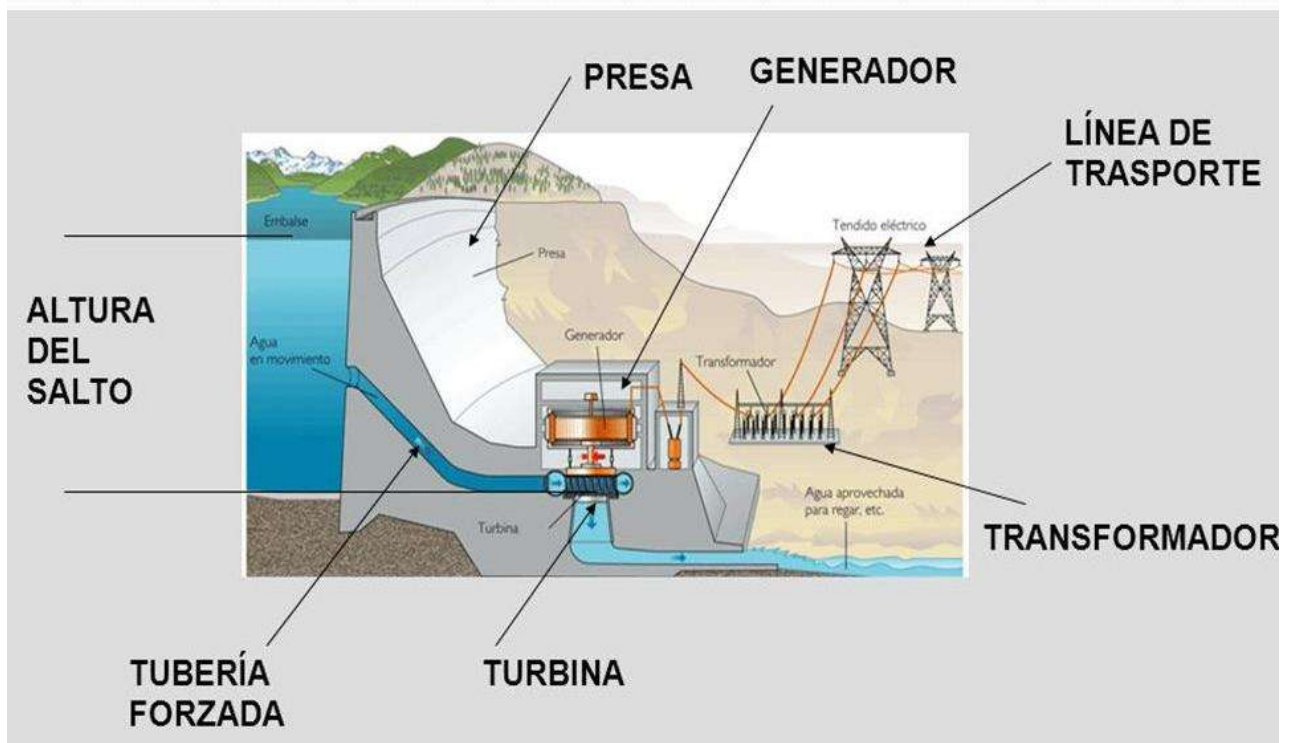


Figura 2. 10 Central hidroeléctrica

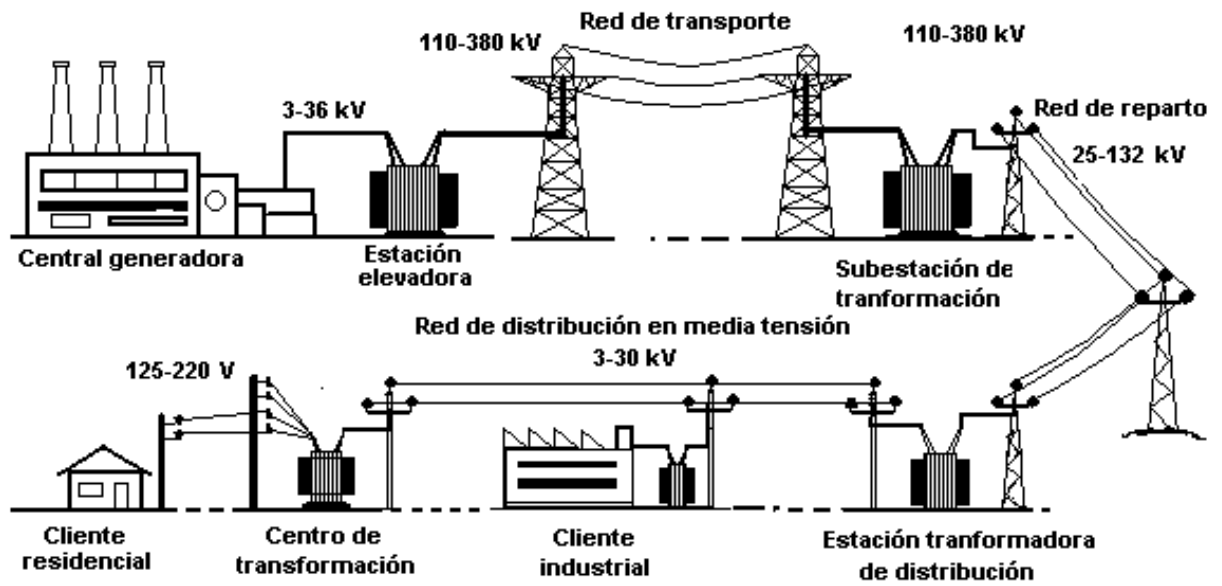


Figura 2. 11 Sistema de distribución

CAPÍTULO 3 MODELADO DE UN GENERADOR SINCRONO

3.1 ¿Que es 20-sim?



Figura 3. 1 20- sim

El 20-sim es un programa de simulación y modelado comercial para sistemas dinámicos multidominio desarrollado por Controllab (Figura 3.1). Con los modelos 20-sim se pueden ingresar como ecuaciones, diagramas de bloques, gráficos de enlaces, gráficos de enlace y componentes físicos. Varias cajas de herramientas lo ayudan a construir sus modelos, simularlos y analizar su desempeño. 20-sim es ampliamente utilizado para el modelado de sistemas complejos de múltiples dominios y el desarrollo de sistemas de control.

Los modelos 20-sim se pueden simular utilizando los métodos de integración numérica más modernos. Después de verificar y procesar, los modelos se convierten directamente en códigos de máquina, lo que resulta en simulaciones de alta velocidad. En la figura 3.2 se presenta la forma de trabajo del 20-sim donde podemos ver que es muy sencilla pero muy completa lo cual lo hace más interesante

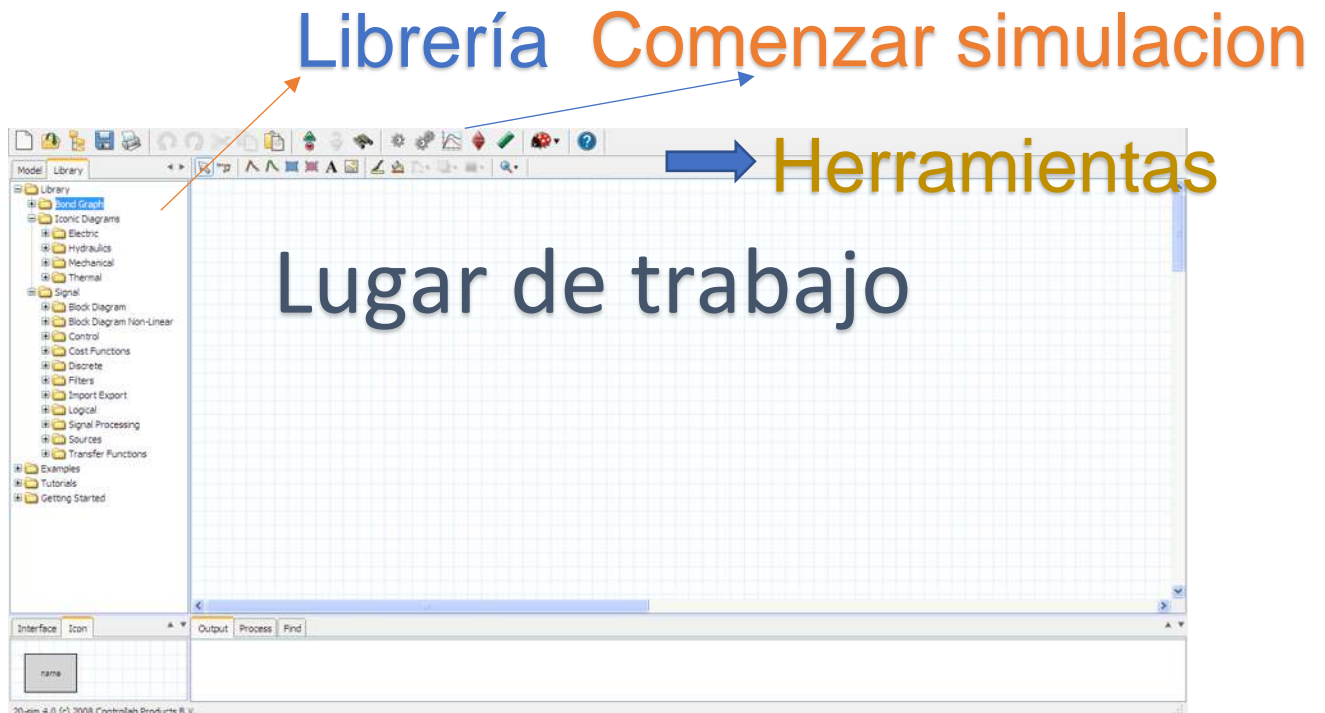


Figura 3. 2 20-Sim y algunas herramientas que tiene

A diferencia de Simulink, los resultados de la simulación se muestran en 20-sim en una ventana separada llamada Simulator, como se muestra en la Figura 3.3

20-sim es autocontenido, es decir, no se requiere ningún software adicional y todas las cajas de herramientas están incluidas. Las cajas de herramientas están disponibles para la construcción de modelos, análisis de dominio de tiempo, análisis de dominio de frecuencia y diseño de controlador.

Para modelar sistemas físicos, el paquete proporciona bibliotecas para sistemas eléctricos, sistemas mecánicos, sistemas hidráulicos y sistemas térmicos. Para diagramas de bloques, se proporcionan bibliotecas comparables a las de Simulink. Una característica del software es la opción de crear modelos con ecuaciones diferenciales y empaquetarlos como elementos de diagrama de bloques o componentes físicos.

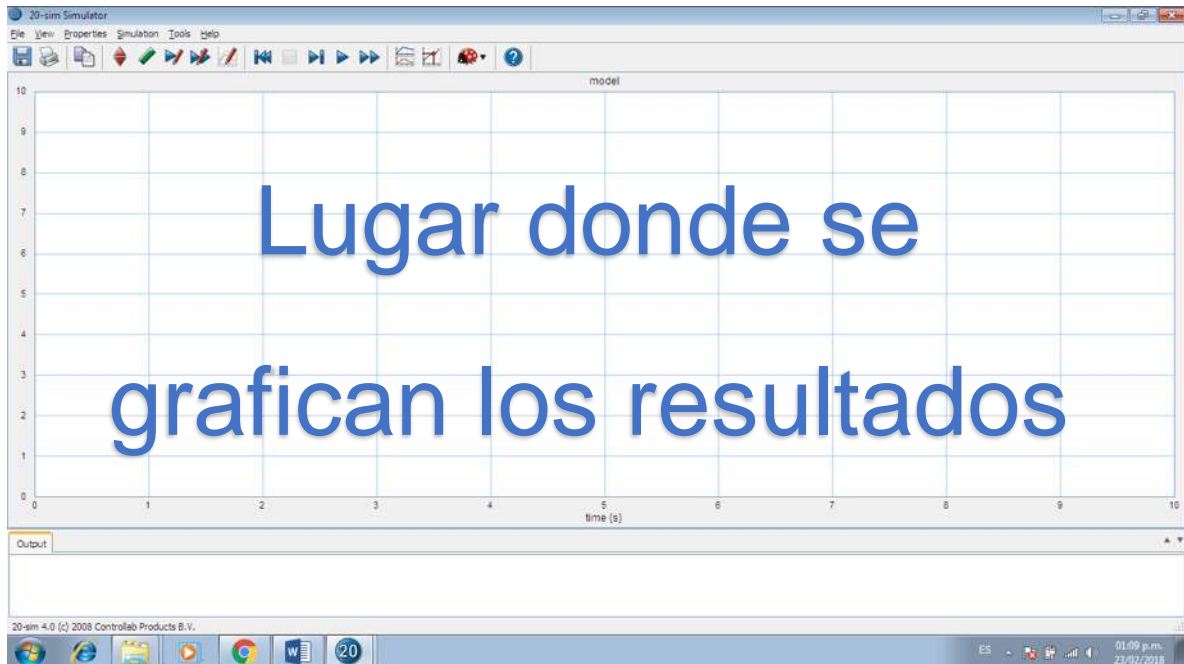


Figura 3. 3 Simulado de 20 sim

Los modelos 20-sim se pueden simular utilizando los métodos de integración numérica más modernos. Después de verificar y procesar, los modelos se convierten directamente en códigos de máquina, lo que resulta en simulaciones de alta velocidad. A diferencia de Simulink, los resultados de la simulación se muestran en 20-sim en una ventana separada llamada Simulator. El simulador es versátil: los diagramas pueden mostrarse horizontal y verticalmente como diagramas basados en tiempo y frecuencia y animaciones 3D. [5]

3.2 Transformación de Park o D-Q

La transformación de Park o D-Q convierte las componentes a-b-c del sistema trifásico en el tiempo a otro sistema de referencia denominado d-q-0. El objetivo de la transformación consiste en convertir los valores trifásicos en el tiempo senoidalmente a-b-c que pueden ser (voltajes, corrientes o enlaces de flujo), a valores constantes d-q-0, se obtienen a partir de la proyección de las variables reales en tres ejes; el primero a lo largo del eje neutral del devanado de campo del rotor

llamado directo el segundo en el eje neutral del devanado de campo llamado de cuadratura y el tercero en un eje estacionario.

El efecto de la transformación del Park es simplemente transformar todas las cantidades del estator de las fases a, b y c en nuevas variables cuyo marco de referencia se mueva con el rotor. Sin embargo, debemos recordar que, si tenemos tres variables i_a , i_b y i_c , necesitamos tres nuevas variables. La transformación de Park usa dos de las nuevas variables como los componentes del eje d y q. La tercera variable es una corriente estacionaria, que es proporcional a la corriente de secuencia cero. Se usa un multiplicador para simplificar los cálculos numéricos.

$$idq0 = P iabc \quad Vdq0 = P Vabc \quad \lambda dq0 = P \lambda abc \quad (3.1)$$

Donde la transformación P de Park se define de la siguiente manera

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Si la transformación es única también existe una transformación inversa en la que podemos volver a conocer su valor original.

$$iabc = P^{-1} idq0 \quad Vabc = P^{-1} Vdq0 \quad \lambda abc = P^{-1} \lambda dq0 \quad (3.3)$$

Donde la transformación P^{-1} de Park se define de la siguiente manera

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & \sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

La transformación resulta un cambio de coordenadas, ya sea de un sistema de coordenadas estáticas a giratorias o viceversa donde se ve que se puede transformar desde el sistema de coordenado estacionario a un sistema coordenado estacionario para luego pasar de este al sistema giratorio. Mediante simulaciones se ha demostrado la efectividad de esta transformación.

3.3 Simulación de un generador síncrono

Para el desarrollo del modelo matemático para una máquina síncrona para su uso en cálculos de estabilidad implica la introducción de datos, ecuaciones formulas los cuales no son tan sencillas de realizar, por lo tanto, se apoyó con el programa de 20 sim y la transformada de Park.

Una máquina tiene tres devanados del estator, un devanado de campo y dos devanados de amortiguamiento, estos seis devanados están acoplados magnéticamente a función de la posición del rotor por lo tanto la conexión de cada bobina está en función de la posición del rotor.

La tensión instantánea de cualquier devanado tiene la siguiente forma:

$$v = \pm \sum r_i \pm \sum \dot{\lambda} \quad (3.5)$$

λ es el enlace del flujo

r es la resistencia del devanado

i es la corriente

$\pm \sum$ es la suma de todos los términos

Las direcciones de las corrientes del estator son positivas porque salen del generador

Para una simplificación en la descripción matemática de la máquina síncrona se realiza una transformación de Park a las variables en el tiempo para tener un nuevo conjunto de variable en el estator tales como corrientes, voltajes o enlaces de flujo en términos de las variables reales en tres ejes (0-d-q.)

3.3.1 Transformación de Park aplicada.

Definimos el eje d del rotor en algún instante de tiempo para que esté en el ángulo θ rad con respecto a una posición de referencia fija, como se muestra en la figura 3.4 se tiene. Deje que las corrientes de fase del estator i_a , i_b y i_c . Si proyectamos estas corrientes a lo largo del eje d y los ejes del rotor, obtenemos los siguientes ejes.

$$i_{q \text{ eje}} = (2/3) [i_a \sin \theta + i_b \sin (\theta - 2\pi/3) + i_c \sin (\theta + 2\pi/3)]$$

$$i_{d \text{ eje}} = (2/3) [i_a \cos \theta + i_b \cos (\theta - 2\pi/3) + i_c \cos (\theta + 2\pi/3)] \quad (3.6)$$

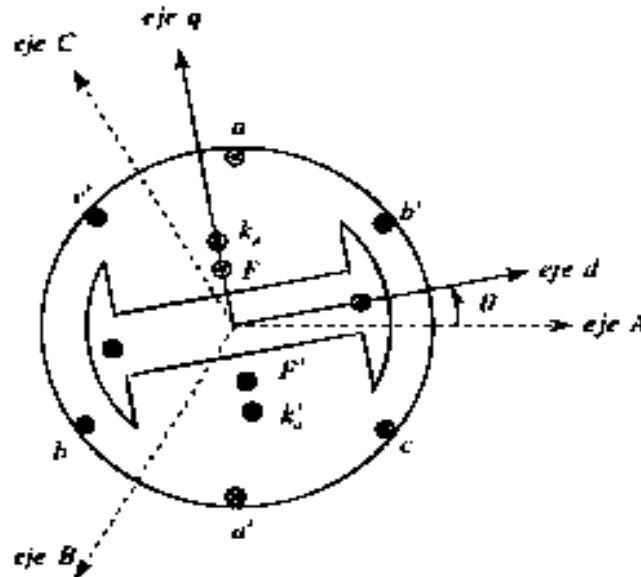


Figura 3. 4 Representación de una maquina síncrona con la transformada de Park para el desarrollo matemático

Por conveniencia, el eje de la fase a se eligió para ser la posición de referencia, de lo contrario, algún ángulo de desplazamiento entre la fase a y la referencia arbitraria aparecerá en todos los términos anteriores.

El efecto de la transformación de Park es simplemente transformar todas las cantidades del estator de las fases a, b y c en nuevas variables cuyo marco de referencia se mueva con el rotor. Sin embargo, debemos recordar que, si tenemos

tres variables $i_a, i_b, e i_c$ necesitamos tres nuevas variables. La transformación de Park usa dos de las nuevas variables como las componentes del eje d y q. La tercera variable es una corriente estacionaria, que es proporcional a la corriente de secuencia cero.

Podemos definir con la transformada de par los siguiente

$$i_{odq} = P i_{abc} \quad (3.7)$$

$$i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad i_{odq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Donde podemos ver anteriormente en la fórmula (3.2) la transformada de Park

El flujo principal de bobinado de campo está en la dirección del eje d del rotor. Produce un EMF que retrasa este flujo en 90° . Por lo tanto, la máquina EMF se encuentra principalmente a lo largo del eje q del rotor. Considere una máquina que tenga un voltaje de terminal constante V . Para la acción del generador, el fasor \bar{E} debe estar liderando el fasor \bar{V} . El ángulo entre \bar{E} y \bar{V} es el ángulo de torsión de la máquina δ si el fasor está en la dirección de la fase de referencia (fase α)

Para un instante de tiempo $t = 0$

El fasor \bar{V} está ubicado en el eje de la fase a, El eje q está ubicado en un ángulo δ , y el eje d está ubicado en $\theta = \delta + \pi/2$.

En $t > 0$,

El eje de referencia se ubica en un ángulo $\omega_R t$ con respecto al eje de la fase a. El eje d del rotor se encuentra por lo tanto en

$$\theta = \omega_R t + \delta + \pi/2 \text{ rad} \quad (3.9)$$

Donde:

$\omega_R t$ = Relación de frecuencia angular síncrona

δ = Angulo de torque síncrono

Podemos hacer la transformación no solo para la corriente si no también para el voltaje y los flujos magnéticos.

$$v_{odq} = Pv_{abc} \quad \lambda_{odq} = P\lambda_{abc} \quad (3.10)$$

Con la transformada de Park también podemos regresar al estado original aplicando la transformada inversa de Park que se encuentra en la formula 3.4 donde puede quedar de la siguiente forma.

$$i_{abc} = p^{-1}i_{odq} \quad (3.11)$$

y notamos que $P^{-1} = P^{-t}$, lo que significa que la transformación **P** es ortogonal.

Tener **P** ortogonal también significa que la transformación **P** es invariante de potencia, y deberíamos esperar usar la misma expresión de potencia en el marco de referencia a-b-c o d-q-0. Así.

$$\begin{aligned} P &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v^t_{abc} i_{abc} = (p^{-1}i_{odq})(p^{-1}v_{odq})^t \\ &= v^t_{odq} (p^{-1})^t p^{-1} i_{odq} = v^t_{odq} p p^{-1} i_{odq} \\ &= v^t_{odq} i_{odq} = v_0 i_0 + v_d i_d + v_q i_q \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.3.2 Ecuaciones de enlace de flujo

Tomando en cuenta la situación de la fórmula (3.5) es la de una red que consta de seis bobinas acopladas mutuamente. Estos son los devanados trifásicos sa-fa, sb-fb y sc-fc; el cableado de campo F-F'; y los dos devanados del amortiguador DD' y QQ'. (Los devanados del amortiguador a menudo están designados por los símbolos kd y kq. Preferimos usar la notación más corta a utilizar aquí. Cuando nos referimos en los devanados de fase con s y f es porque nos refieren a "inicio" y "final" de estas bobinas)

Escribimos las ecuaciones de los enlaces de flujo para estos seis circuitos

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Donde

L_{jk} = autoinducción cuando $j = k$

y donde $L_{jk} = L_{kj}$ en todos los casos.

Se debe tener en cuenta que los subíndices en minúscula para referirse al estator y los de mayúscula para el rotor. Las inductancias están en función del Angulo de posición.

3.3.3 Auto inductancias estator

La auto inductancia del devanado de fase se da de la siguiente forma

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2 \theta H \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2(\theta - 2\pi/3)H \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2(\theta + 2\pi/3)H \end{aligned} \quad (3.14)$$

Donde $L_s > L_m$ y tanto L_s como L_m son constantes. (Todas las cantidades de inductancia tales como L_s o L_m con subíndices individuales son constantes en nuestra notación).

3.3.4 Auto inductancia del rotor

Como se ignoran la saturación y el efecto de ranura, todas las auto inductancias de rotor son constantes y, de acuerdo con nuestra convención de subíndices, podemos usar una sola notación de subíndice.

$$L_{FF} = L_F \quad L_{DD} = L_D \quad L_{QQ} = L_Q \quad (3.15)$$

3.3.5 Inductancias mutuas del estator

Las inductancias mutuas de fase a fase son funciones de θ pero son simétricas,

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)H \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)H \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right)H \end{aligned} \quad (3.16)$$

donde $|M_s| > L_m$. Tengamos en cuenta que los signos de las inductancias mutuas dependen de la dirección de corriente supuestas y las orientaciones de la bobina.

3.3.6 Inductancias mutuas del rotor

La inductancia mutua entre los devanados F y D es constante y no varía con θ . El coeficiente de acoplamiento entre los ejes d y q es cero, y todos los pares de devanados con desplazamiento de 90° tienen cero inductancias mutuas.

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R \quad H \quad L_{FQ} = L_{QF} = 0 \quad H \quad L_{DQ} = L_{QD} = 0 \quad H \quad (3.17)$$

3.3.7 Inductancias mutuas de estator a rotor

Considerando las inductancias mutuas entre el estator y el devanado del rotor, las cuales son funciones del ángulo del rotor θ . Desde los devanados de fase hasta el devanado de campo.

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_F \cos \theta \quad H \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_F \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad H \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_F \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad H \end{aligned} \quad (3.18)$$

Del mismo modo, desde los devanados de fase hasta los amortiguadores (D)

tenemos lo siguiente

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \sin \theta \quad H$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) H$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) H \quad (3.19)$$

Y por último desde los devanados de fase hasta el devanado Q tenemos lo siguiente:

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \sin \theta \quad H$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) H$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) H \quad (3.20)$$

Las direcciones en los términos mutuos dependen de la corriente asumida y la orientación de la bobina.

3.3.8 Transformación de inductancias

Conociendo la matriz (3.13) de todas las inductancias podemos observar que la mayor parte de los términos varían con el tiempo, ya que su θ es una función del tiempo. Como podemos ver en (3.17) que cuatro de los términos desaparece. Por lo tanto, en ecuaciones de voltaje como (4.5), el término $\dot{\lambda}$ no es un simple $L\dot{i}$, sino que debe calcularse como

$$\dot{\lambda} = L\dot{i} + \dot{L}i.$$

Ahora podemos observamos que (3.13) con sus inductancias variables en el tiempo puede simplificarse al referir todas las cantidades a un marco de referencia de rotor a través de una transformación de Park (3.2.) a a-b-c.

$$L_{aa} = \text{inductancias estator-estator}$$

$$L_{Ra}, L_{Ra} = \text{inductancias del rotor-estator}$$

$$L_{RR} = \text{inductancias del rotor-rotor}$$

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

La 3.21 la obtuvimos multiplicando $\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix}$ por (3.13)

$U_3 =$ Matriz de unidad 3x3

$P =$ Transformación de Park (3.2)

Donde la operación de (3.20) nos queda de la siguiente forma donde definiremos nuevas constantes

$$\begin{aligned} L_d &= L_s + M_s + \left(\frac{3}{2}\right) L_m \quad H & L_q &= L_s + M_s - \left(\frac{3}{2}\right) L_m \quad H \\ L_0 &= L_s - 2M_s \quad H & K &= \sqrt{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & KM_F & KM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & KM_Q \\ 0 & KM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & KM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

λ_d es el enlace de flujo en un circuito que se mueve con el rotor y centrado en el eje d.

λ_q es el enlace de flujo en un circuito que se mueve con el rotor y centra en el eje q.

λ_0 es el enlace de flujo que está completamente desacoplado de los otros circuitos, ya que la primera fila y la columna tienen solo un término diagonal.

Es importante observar que la matriz de inductancia de (3.22) es una matriz de constantes. Esto es evidente ya que todas las cantidades tienen solo un subíndice, por lo tanto, se conforman con nuestra notación de inductancias constantes.

El poder de la transformación de Park es que elimina los coeficientes variables en el tiempo de esta ecuación. Observamos que la matriz transformada (3.22) es simétrica y, por lo tanto, es físicamente realizable por un circuito equivalente.

3.3.9 Ecuaciones de voltaje

La fórmula de voltaje del generador está en la forma de (3.5). Esquemáticamente la forma de los circuitos se muestra en la figura 3.5, donde las bobinas se identifican exactamente igual que en la figura 3.1 y también se muestran las terminaciones de la bobina. Tengamos en cuenta que se supone que las corrientes del estator tienen una dirección positiva que sale de los terminales de la máquina, ya que la máquina es un generador. Para las condiciones indicadas, podemos escribir la ecuación matricial

$$v = -ri - \dot{\lambda} \quad (3.24)$$

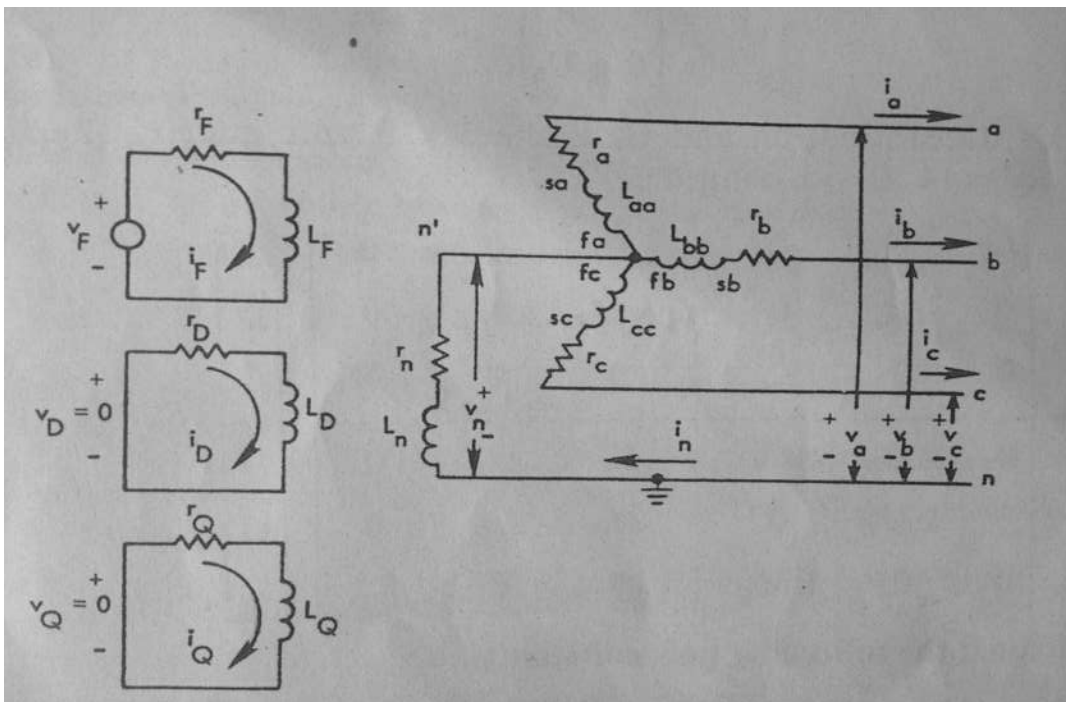


Figura 3. 5 Diagrama esquemático de una maquina síncrona

Podemos reinscribir la ecuación (3.24)

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_a \\ \dot{\lambda}_b \\ \dot{\lambda}_c \\ \dot{\lambda}_F \\ \dot{\lambda}_D \\ \dot{\lambda}_Q \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Si $r_a = r_b = r_c = r$, podemos decir que $R_{abc} = rU_3$ Ω

Donde U_3 es la matriz de unidad 3x3, y puede reescribirse con lo anterior en forma particionaría de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Donde

$$v_{FDQ} = \begin{bmatrix} v_{abc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad i_{FDQ} = \begin{bmatrix} i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad \lambda_{FDQ} = \begin{bmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Así, (3.26) se complica por la presencia de coeficientes variables en el tiempo

Término λ , pero estos términos pueden eliminarse aplicando la transformación de Park a la partición del estator. Esto requiere que ambos lados de (3.25) sean multiplicados por U_3 donde queda de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_{odq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} PR_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{P}\lambda_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_{odq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} PR_{abc}P^{-1} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{P}\lambda_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_{odq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{P}\lambda_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.28) \end{aligned}$$

Evaluamos $P\dot{\lambda}_{abc}$, recordando la definición (3.10), $\lambda_{0dq} = P\lambda_{abc}$, a partir de la cual compite $\dot{\lambda}_{0dq} = P\dot{\lambda}_{abc} + \dot{P}\lambda_{abc}$

Entonces se tiene lo siguiente

$$P\dot{\lambda}_{abc} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}\lambda_{0dq} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \quad v \quad (3.29)$$

Podemos mostrar que

$$\dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} = w \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -w\lambda_q \\ w\lambda_d \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Finamente reinscribimos (3.28)

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad v \quad (3.31)$$

Para las condiciones de equilibrio, el voltaje de secuencia cero es cero. Para simplificar la notación

$$R = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \quad R_R = \begin{bmatrix} r_F & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} -w\lambda_q \\ w\lambda_d \end{bmatrix}$$

Entonces, para condiciones equilibradas (3.31) puede escribirse sin la ecuación de secuencia cero como

$$\begin{bmatrix} v_{dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{dq} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad v \quad (3.32)$$

Formulación de corriente

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{0dq} & L_m \\ L_m & L_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{0dq} & L_m \\ L_m & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ i_F \end{bmatrix}$$

Además, tenemos lo siguiente

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q \\ 0 & r_f & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & r_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 \\ kM_F & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 \\ kM_d & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Hasta este momento podemos decir que tenemos los parámetros eléctricos del generador por lo tanto nos hacen falta las partes mecánicas de la máquina que la describen.

3.3.10 Parte mecánica de un generador síncrono

Empezamos con la ecuación de torque para un generador síncrono

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_a \quad (3.35)$$

T_J Constante del rotor

T_m Par mecánico de entrada

T_e Par electromagnético

T_d Par dinámico

Podemos decir que el par eléctrico T_e esta definido de la siguiente forma

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.36)$$

El par de amortiguamiento lo podemos definir de la siguiente forma

$$T_d = D\omega \quad (3.37)$$

$D\omega$ = par de amortiguamiento

D = constante de amortiguamiento

Si sustituimos la (3.36) y (3.37) en la (3.35) lo cual nos queda de la siguiente forma

$$T_J \frac{dw_r}{dt} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - D\omega = T_a \quad (3.38)$$

Donde

$$\lambda_d = L_d i_d + k M_F i_F \quad \lambda_q = L_q i_q \quad (3.39)$$

$$T_J \frac{dw_r}{dt} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (L_d i_d i_q + k M_F i_F i_q - L_q i_q i_d) - D\omega = T_a$$

$$\text{Amortiguamiento} = \frac{-3P}{4T_J} L_d i_q - \frac{3P}{4T_J} k M_F i_q$$

Esta parte no se toma en cuenta porque es la parte de amortiguamiento

Es la representación del par electromagnético

$$\dot{\omega} = \frac{T_m}{T_J} + \left[\frac{-3P}{4T_J} L_d i_q - \frac{3P}{4T_J} k M_F i_q; \quad \frac{3P}{4T_J} i_d; \quad -\frac{D}{T_J} \right] \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}$$

Donde tenemos lo siguiente

$$\begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ k_1 & 0 & -k_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_q \\ T_L \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \frac{3P}{4}$$

Despejamos la corriente

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ \lambda_q & 0 & -\lambda_q & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_q \\ T_L \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d L_1 & -r_f L_2 & 0 & -\lambda_q L_1 \\ -r_d L_3 & -r_f L_4 & 0 & -\lambda_q L_3 \\ 0 & 0 & \frac{-r_q}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{-\lambda_q}{T_J} & \frac{-D}{T_J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 v_d + L_2 v_F \\ L_3 v_F + L_4 v_F \\ \frac{1}{L_q} v_q \\ \frac{1}{T_J} T_L \end{bmatrix}$$

Por últimos la transformada de Park queda de la siguiente forma haciendo algunos cambios

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_3 \\ \dot{F}_5 \\ \dot{F}_{11} \\ \dot{F}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \\ e_{12} \\ e_{116} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_q \\ T \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \\ F_{11} \\ F_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} e_1 + b_{12} e_6 \\ b_{21} e_1 + b_{22} e_6 \\ b_{31} e_{12} \\ b_{41} e_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 v_d + L_2 v_F \\ L_3 v_F + L_4 v_F \\ \frac{1}{L_q} v_q \\ \frac{1}{T_J} T_L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d L_1 & -r_f L_2 & 0 & -\lambda_q L_1 \\ -r_d L_3 & -r_f L_4 & 0 & -\lambda_q L_3 \\ 0 & 0 & \frac{-r_q}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{-\lambda_q}{T_J} & \frac{-D}{T_J} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} e_1 + b_{12} e_6 \\ b_{21} e_1 + b_{22} e_6 \\ b_{31} e_{12} \\ b_{41} e_{16} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_3 \\ \dot{F}_5 \\ \dot{F}_{11} \\ \dot{F}_{18} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \\ F_{11} \\ F_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} e_1 + b_{12} e_6 \\ b_{21} e_1 + b_{22} e_6 \\ b_{31} e_{12} \\ b_{41} e_{16} \end{bmatrix}$$

3.3.11 Modelado en 20-sim

En seguida presentaremos en la figura 3.6 la forma del modelado en 20-sim completo.

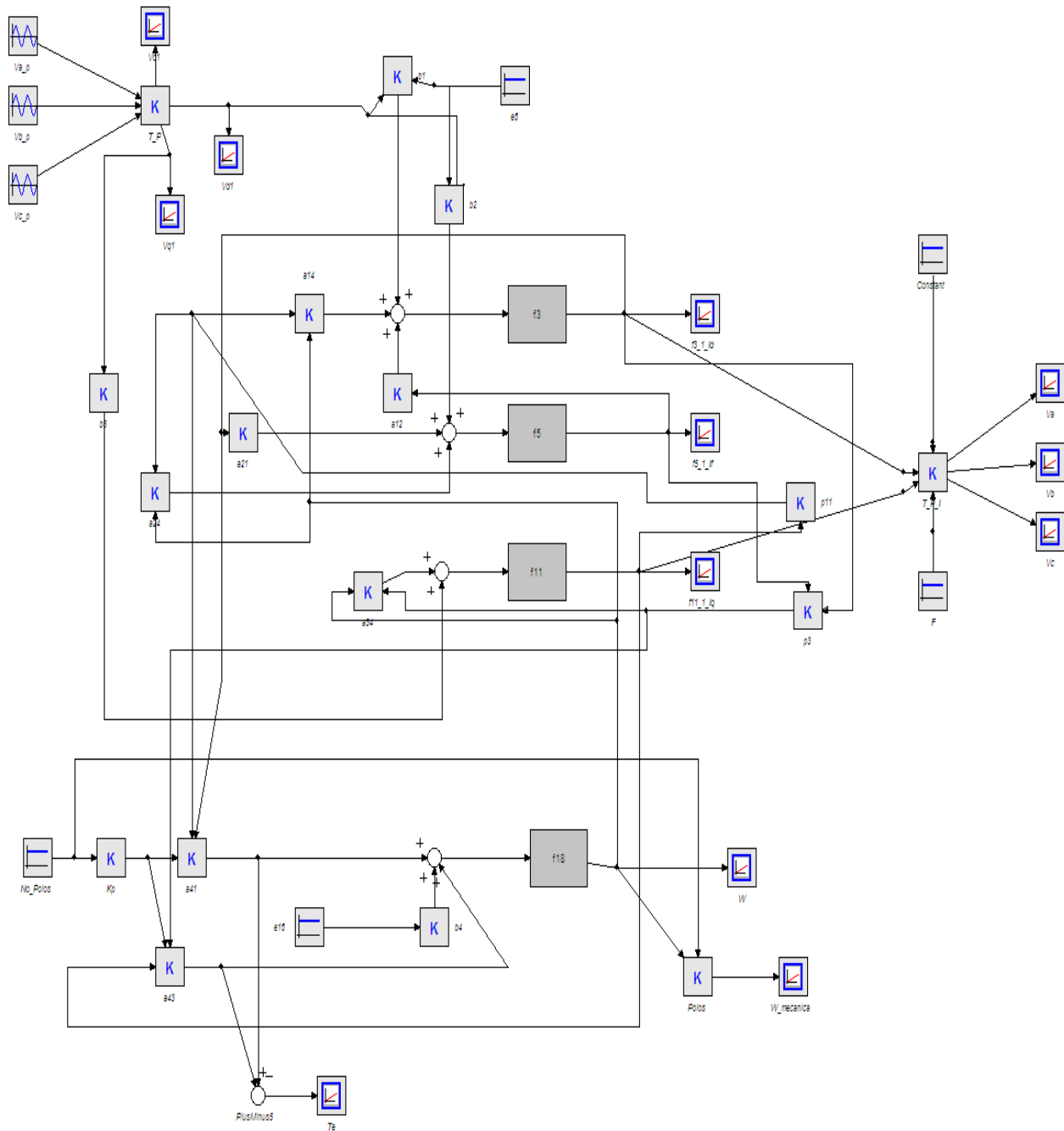


Figura 3. 6 Modelado de la maquina síncrona en 20 sim

Presentaremos en forma global las partes del modelo síncrono en la Figura 3.7

Parte 1

Es la parte donde se presenta la transformada de Park donde podemos hacer la conversión de las componentes de abc que están en el tiempo a la conversión dq0 que es la referencia rotativa que vamos a utilizar para poder hacer el modelo del generador síncrono (abc – a – 0dq)

Parte 2

Podemos encontrar los voltajes de dqF y el torque del generador que tenemos al hacer la simulación.

Parte 3

Aquí podemos mostrar la inversa de Park la cual nos ayuda a mostrar los resultados en la forma común que uno está acostumbrado a utilizar (0dq - a – abc).

Parte 4

Podemos mostrar la parte mecánica que contiene el generador síncrono y así tener lo más cercano a la realidad.

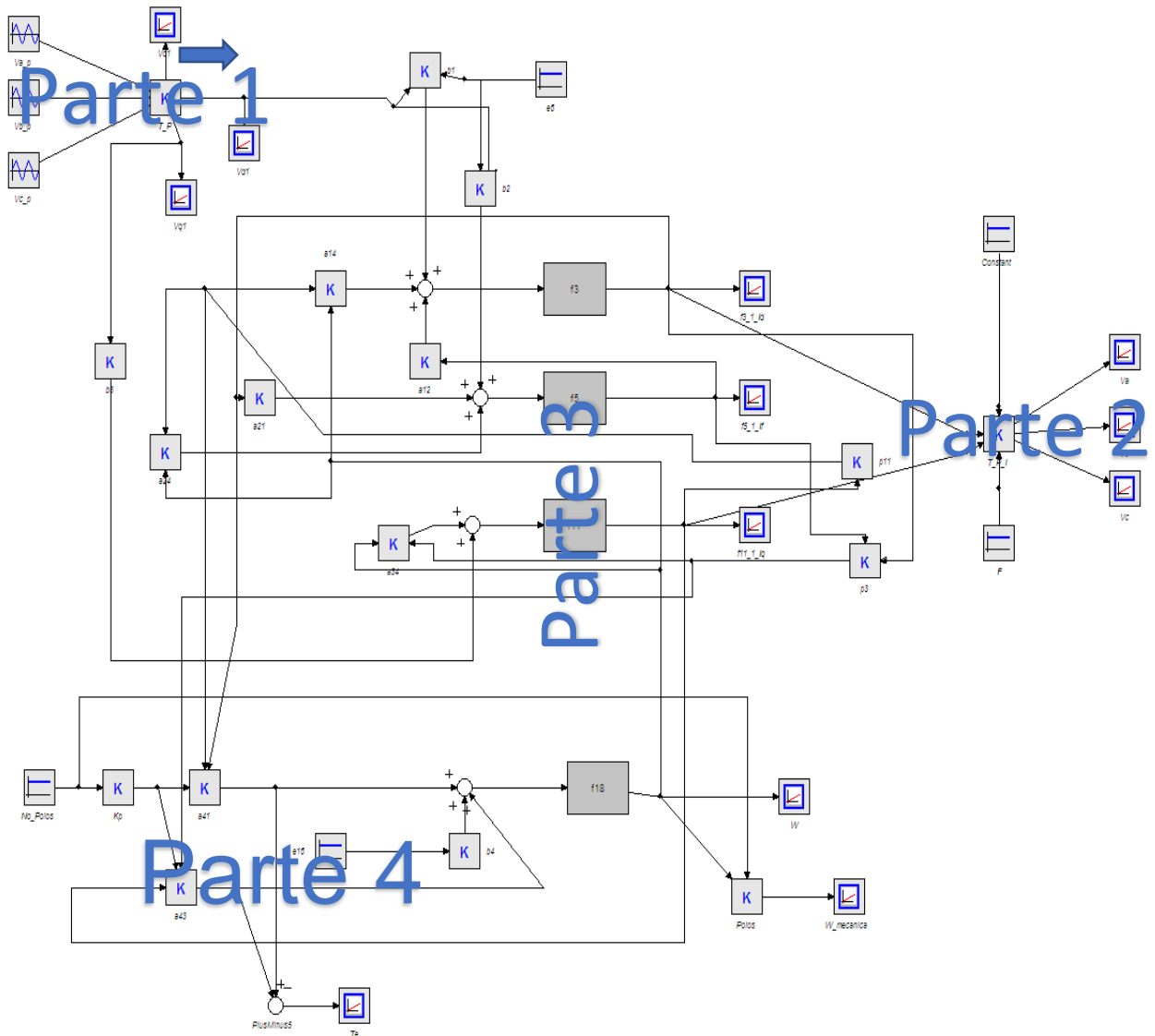


Figura 3. 7 Partes del modelo síncrono

Enseguida mostraremos en la figura 3.8 el resultado del modelado en 20 sim en la

forma de la transformada de Park $0dq$ $\begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}$ donde podremos ver que las

corrientes de un cierto tiempo se vuelven constantes.

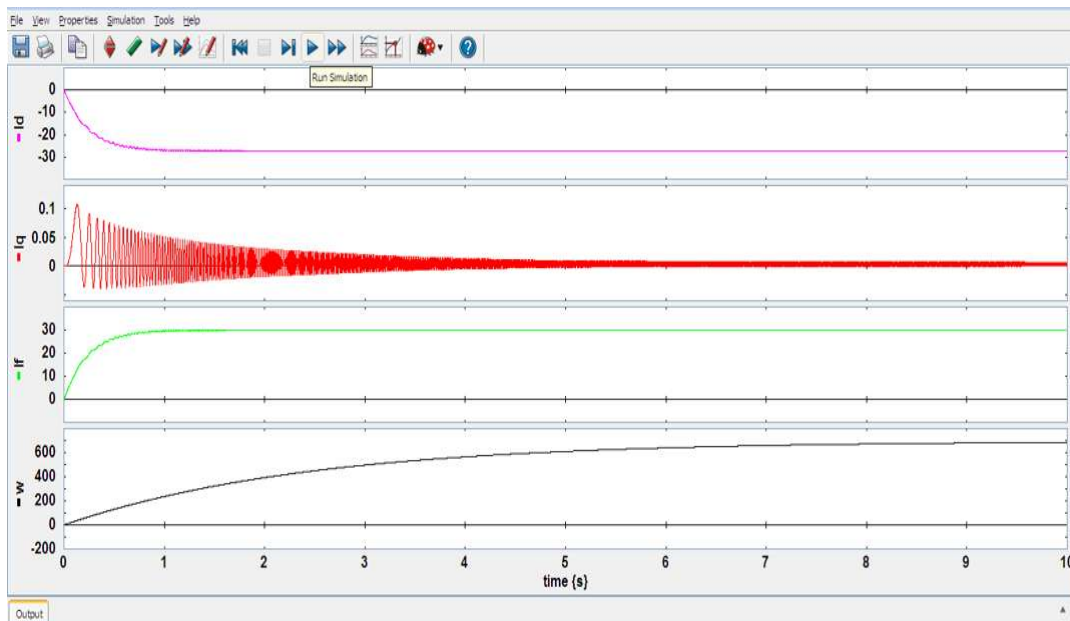


Figura 3. 8 Resultados del modelado en la transformada de Park

Aplicando a I_d e I_q la inversa de la transformada de Park tenemos los siguientes resultados que se muestran en las figuras 3.5 y 3.6. Donde podemos ver las corrientes en el dominio de a-b-c que es donde uno está acostumbrado a ver los resultados

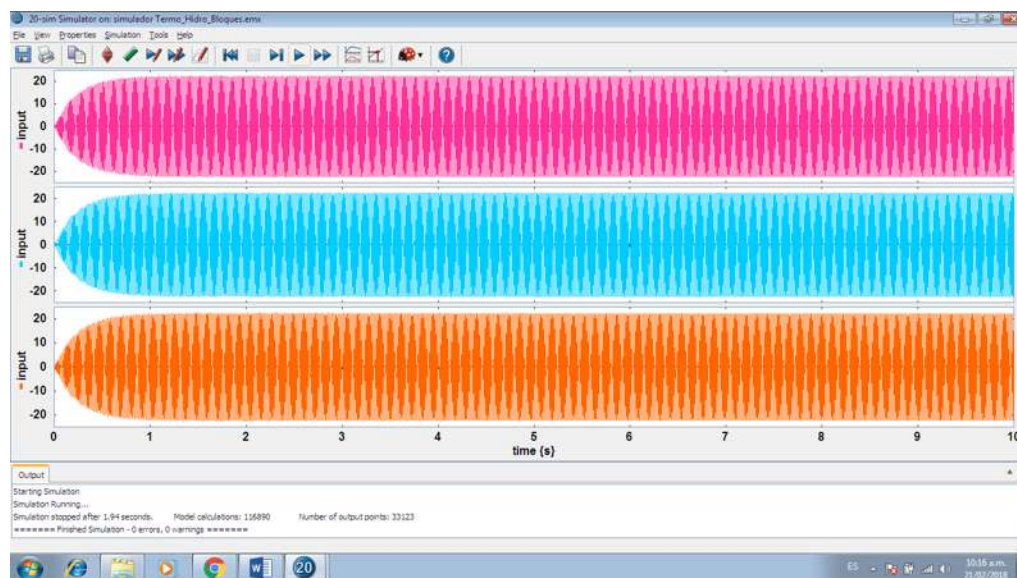


Figura 3. 9 Voltajes de salida de las tres componentes

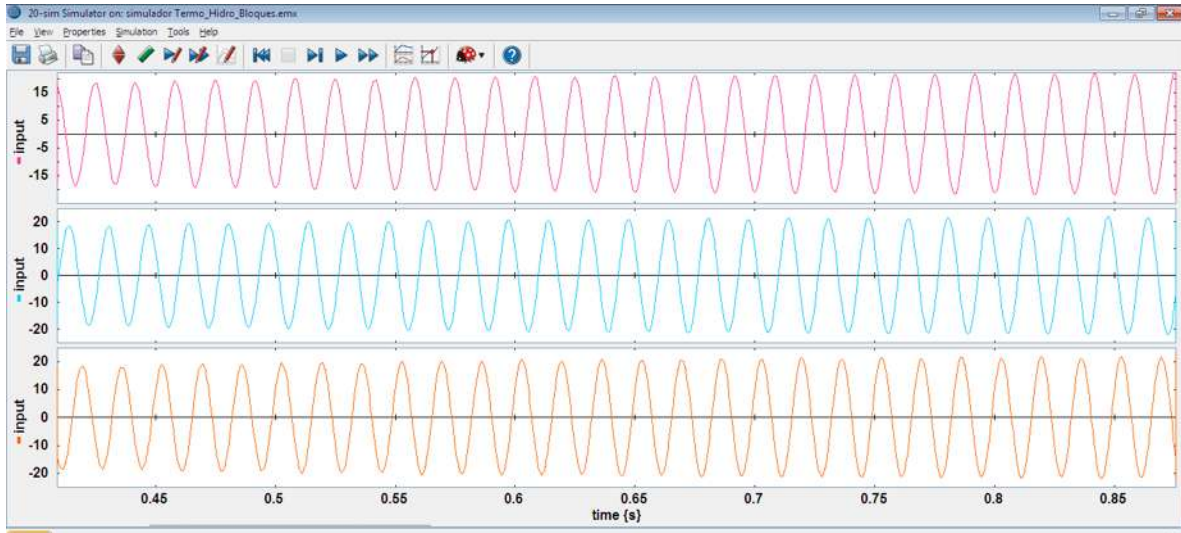


Figura 3. 10 Voltajes de salida de las tres componentes en a-b-c

Llegando casi al final de este trabajo podemos decir que aún nos hace falta la excitación de la máquina, hasta este momento se realizó con una fuente del simulador donde en la siguiente parte quitaremos esa fuente y pondremos el modelado de un generador de CD conectado en la misma flecha que el generador síncrono para generar la excitación que será conectado al generador síncrono. [6]

CAPÍTULO 4 MODELADO Y SIMULACION DE UN GENERADOR CON EXCITATRIZ

Para un generador síncrono es necesario autoexcitación lo cual lo podemos tener con una máquina de corriente continua con imanes permanentes donde se puede mostrar en la figura 4.1, lo normal es que el campo magnético esté creado por bobinas inductoras dispuestas en el estator alrededor de los polos principales. Según la fuente de alimentación de estas bobinas, se distinguen dos tipos de excitación:

a) Excitación independiente

b) Autoexcitación.

La excitación independiente significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo.

La autoexcitación propia es aquella que va un generador de corriente continua montado sobre el propio eje de la máquina.

La autoexcitación significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz. Para obtener la autoexcitación, es preciso que exista un pequeño flujo en el circuito magnético, flujo que es posible producir y mantener gracias al fenómeno de histéresis magnética. Gracias a este flujo remanente, al hacer girar el inducido se inducirá en él una pequeña f.e.m. que aplicada al circuito inductor, con la polaridad conveniente, genera una débil corriente que refuerza el magnetismo remanente y la f.e.m. inicial debida al flujo remanente se incrementará. A mayor f.e.m., corresponderá mayor corriente, con el refuerzo consiguiente del flujo, luego se produce un nuevo aumento de la f.e.m. y así sucesivamente hasta alcanzar un equilibrio o estabilidad de la tensión en bornes que se traducirá en una constancia de la corriente de excitación y por tanto del flujo.

Dependiendo de la conexión entre el devanado inductor y el inducido se distinguen tres tipos de máquinas auto excitadas:

la máquina serie, la máquina derivación y la máquina compuesta.

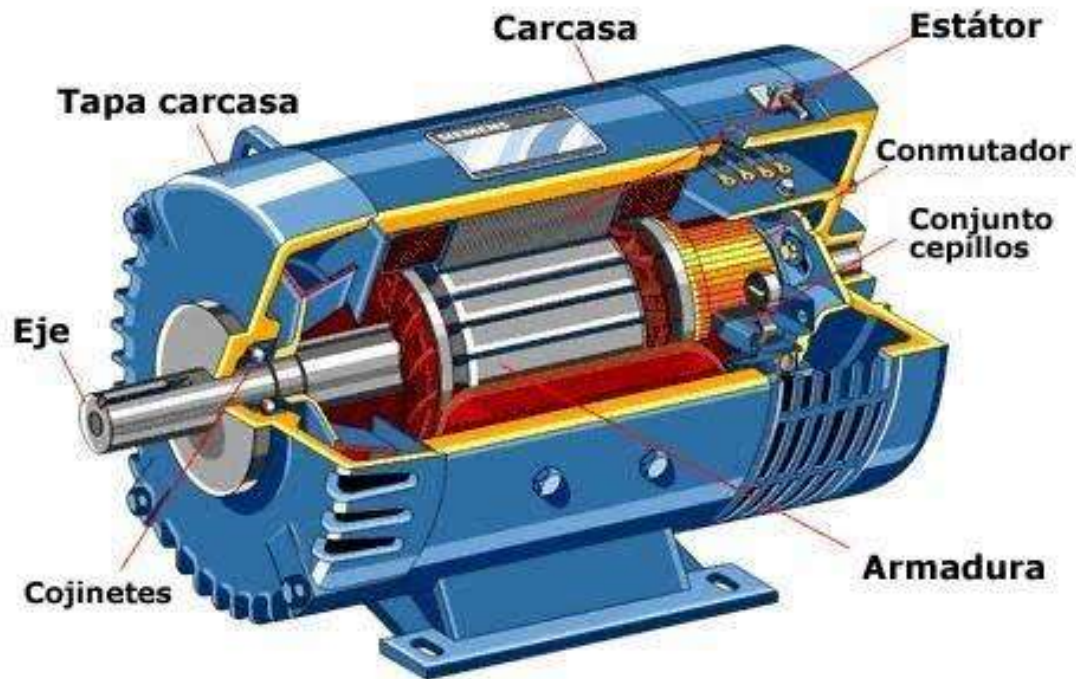


Figura 4. 1 Generador de cd

4.1 Modelos de la máquina DC

El modelo de la maquina DC, se muestra a continuación en la figura 4.2. para después poder sacar la ecuación matemática para después poderlos pasar a la plataforma de 20 sim y podérselos añadir al modelo del generador síncrono.

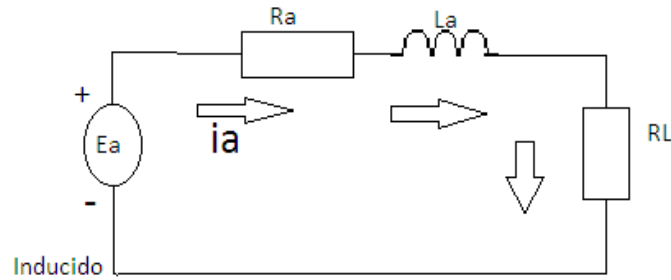


Figura 4. 2 Esquema de la maquina cd

Donde tendremos los siguiente

E_a = voltaje inducido

i_a = corriente de excitación

R_L = Resistencia \dot{i}

R_a = resistencia del inducido

L_a = inductancia de armadura

n constante

ω = velocidad angular

$E_a = n\omega$

Donde tenemos lo siguiente

$$E_a - (R_a + R_L)i_a - L_a \dot{i}_a = 0$$

$$L_a \dot{i}_a = E_a - (R_a + R_L)i_a$$

$$\dot{i}_a = \frac{n}{L_a} \omega - \frac{(R_a + R_L)}{L_a} i_a$$

Donde teniendo su modelo podemos pasarlo a la plataforma de 20 sim junto con el del generador síncrono donde la podemos mostrar en la figura 4.3 la implementación del generador CD (excitatriz propia)

En la figura 4.3 podemos ver los resultados en la forma gráfica lo cual no cambian muchos a los anteriores donde aún no conectábamos la máquina de cd y solo teníamos una fuente.

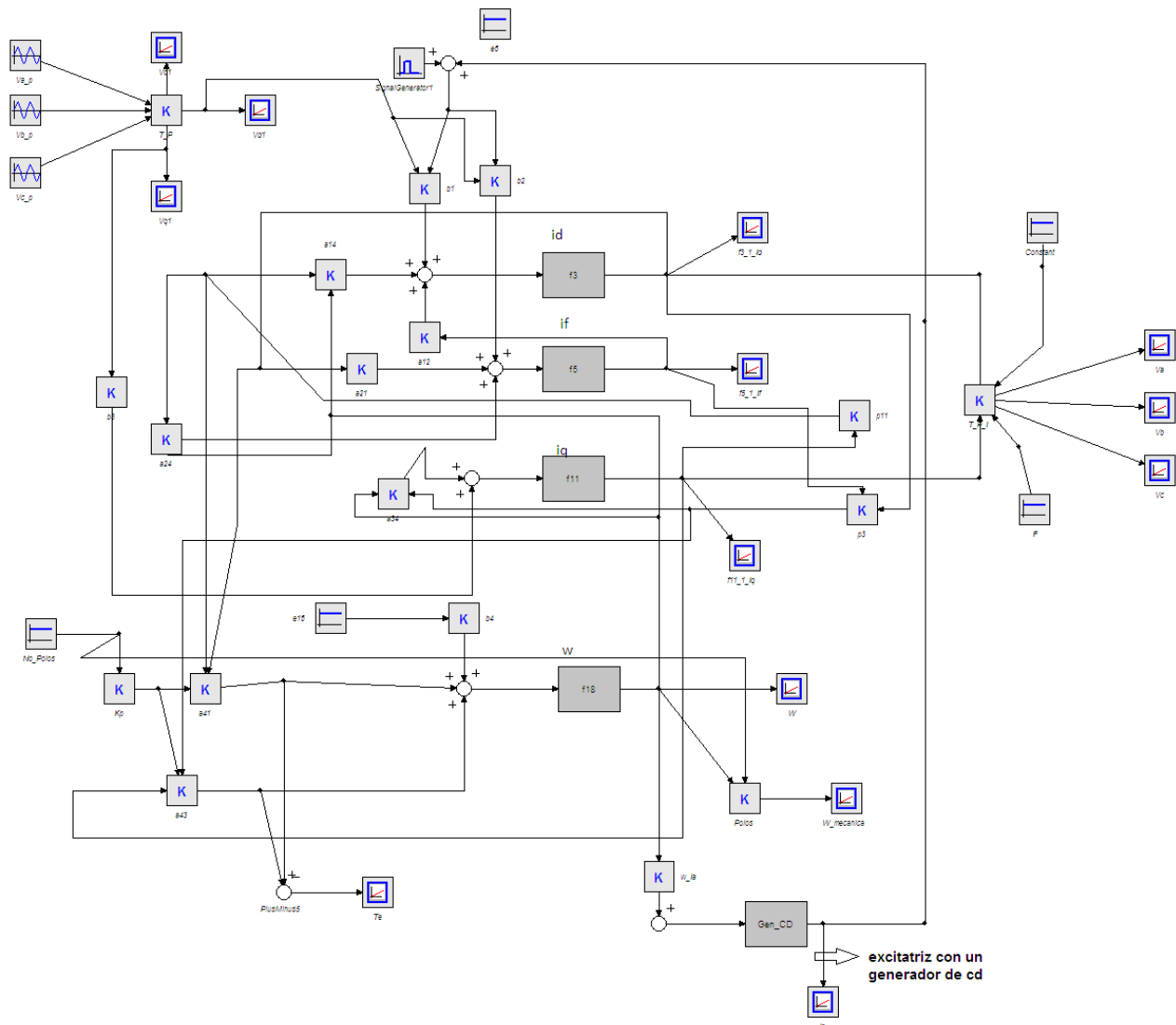


Figura 4. 3 Simulación de un generador síncrono con una excitatriz de cd

Donde podemos ver que se quitó la fuente y se agregó el generador de cd el cual está conectado a la misma flecha.

En seguida presentaremos la respuesta de las corrientes en dq0, a-b-c, el campo y la velocidad angular. Figura 4.4

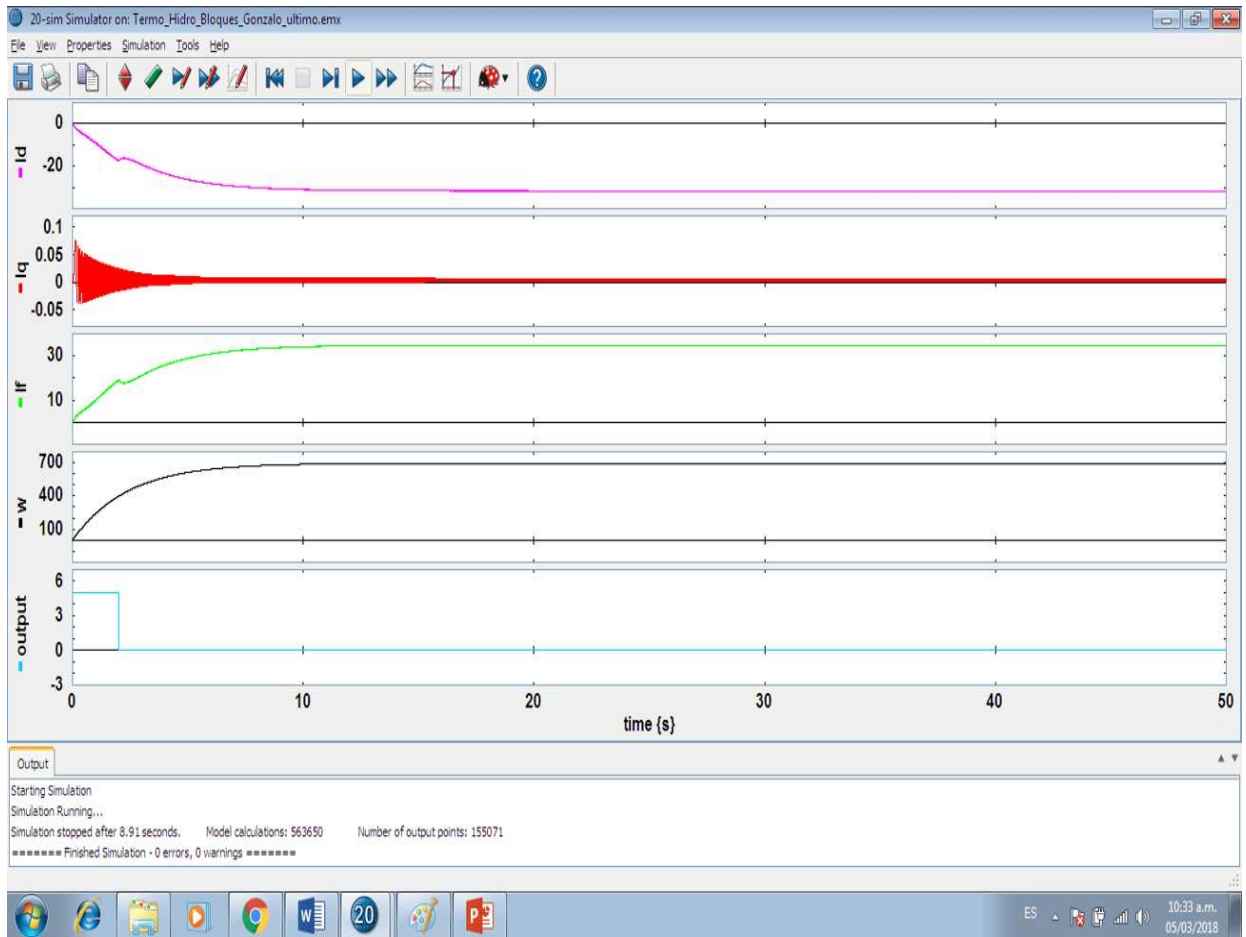


Figura 4. 4 Respuesta del modelado de un generador síncrono con una excitatriz propia de un generador de cd

En la figura 4.4 podemos ver que la corriente de campo tiene un pequeño campo el cual se debe a que la excitatriz necesita un pequeño impulso para poder empezar a generar corriente el cual en la última parte de la figura podemos ver el impulso que tiene por un instante de tiempo.

A continuación, se muestra las corrientes en el marco de referencia abc en la figura 4.5. y en la 4.6 haciendo un acercamiento para que se pueda apreciar mejor.

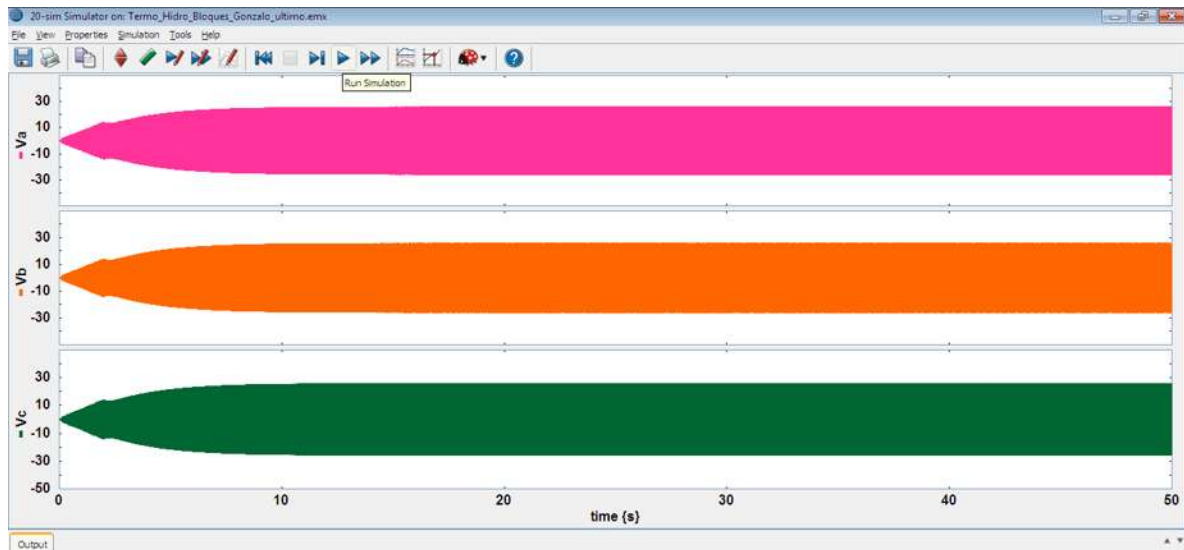


Figura 4. 5 Corriente en el modelado en abc

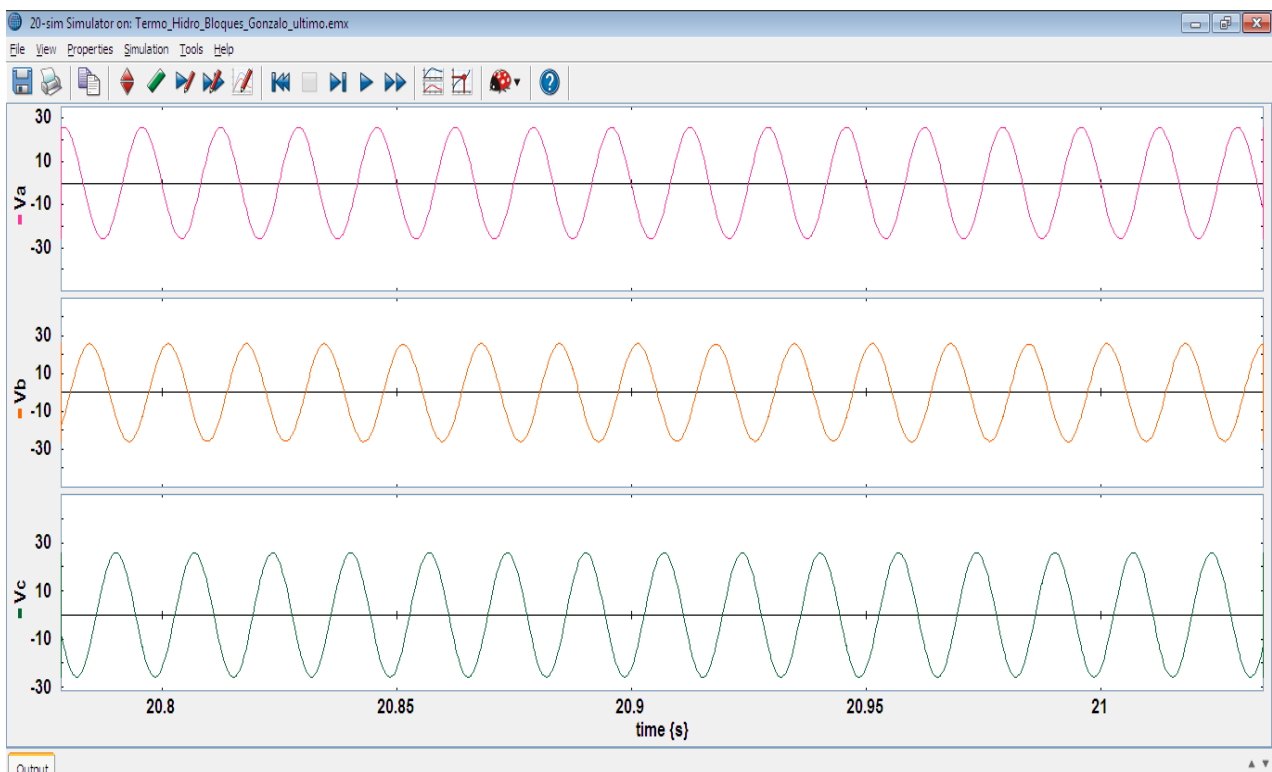


Figura 4. 6 Corriente de la simulación de un generador síncrono

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En la presentación de esta tesis trabajamos el modelado de una máquina síncrona con una referencia $0dq$ la cual es de gran utilidad.

Para el modelo matemático del generador se realizó una transformación al marco de referencia de $0dq$ o mejor conocido marco rotatorio el cual hace que no se trabaje en el sistema de tiempo ya que es mucho más complejos el modelado, al utilizar este marco de referencia se facilitó su modelado el cual simplifica las ecuaciones.

Al tener los resultados en referencia de $0dq$ podemos usar la inversa para regresar al dominio de tiempo y los resultados es acorde al tiempo.

Las partes principales que transformamos son los voltajes, las corrientes y los flujos que fue los que se analiza.

Se conoce los voltajes, corrientes y flujos a través de gráficas que posteriormente se cambian al dominio de tiempo los cuales después de un tiempo son constantes.

Se conoce el funcionamiento del generador síncrono con una excitatriz con un generador de cd conectado en la misma flecha.

5.2 Recomendaciones

Se puede utilizar este tipo de trabajamos para conocer un modelado de un generador síncrono el cual será muy útil en la vida de un trabajador que este laborando en plantas de generación.

Nos puede apoyar para el conocimiento de máquinas en especial en los generadores desde su función y la utilidad para las cuales fueron hechas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] j. c. ochoa, Generador de una central Hidroelectrica, Lima peru : Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2014 .
- [2] J. Manzano, «Espaciot Tesla,» 15 enero 2017 . [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/espaciot Tesla/maquinas-electricas>. [Último acceso: 20 Noviembre 2017].
- [3] T. Wildi, Maquinás Eléctricas y Sistemas De potencia, Mexico : Pearson Educacion, SEXTA EDICION, 2007.
- [4] T. Científicos, «Textos Científicos,» 18 Junio 2006. [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/energia/centrales-electricas>. [Último acceso: 22 Noviembre 2017].
- [5] Wikipedia, «Wikipedia the free Encyclopedia,» 18 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/20-sim>. [Último acceso: 22 Enero 2018].
- [6] Anderson, Power System control and stability, loma state university press, 1977.