

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***“ESTUDIO DEL EFECTO DE DEPRESIONES DE
VOLTAJE EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN Y EN SU
CONTROL DE VELOCIDAD DE FRECUENCIA
VARIABLE”***

TESIS

**Que para obtener el Título de:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Presenta:
JULIO CÉSAR SUÁREZ DUARTE**

**Asesora de Tesis:
DRA. ELISA ESPINOSA JUÁREZ**

Morelia, Michoacán, Julio 2009

Agradecimientos

Reconozco el apoyo, la confianza y el esfuerzo de todas las personas que inspiraron, enriquecieron o, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este trabajo de Tesis. Es por esto que expreso mi sincera gratitud principalmente:

A mis Padres.

A mis Familiares.

A todos mis Profesores, especialmente a la Dra. Elisa Espinosa Juárez, asesora de esta Tesis.

A mis más queridos Amigos y

A mis Compañeros de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Dedicatoria

*A mi Madre,
a ti debo este logro y contigo lo comparto.*

Resumen

En el presente trabajo se caracterizan las diferentes tipologías de depresiones de voltaje para su simulación y el estudio de sus efectos en el comportamiento dinámico de la máquina de inducción trifásica y en su control de velocidad de frecuencia variable, implementando el sistema eléctrico en el ambiente ATPDraw.

En primera instancia, se presenta la simulación de todas las tipologías de depresiones de voltaje y posteriormente se presentan casos de estudio de las tipologías A, C y D mostrando sus efectos en la velocidad, el par y las corrientes del estator de la máquina de inducción y en su control de velocidad basado en electrónica de potencia.

Se muestra a la simulación como una herramienta importante para estudiar los efectos producidos por las depresiones de voltaje y, de esta forma, tener un elemento de análisis que permita, posteriormente, obtener un criterio para minimizar las consecuencias de una mala operación de cargas sensibles debidas a este tipo de fenómenos presentes en la red eléctrica.

Contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	xi
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificación	2
1.4. Metodología.....	2
1.5. Contenido de la Tesis.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
Modelo y esquema de control de velocidad de la máquina de inducción.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Modelo de la máquina de inducción trifásica, de jaula sencilla o de rotor bobinado..	4
2.3. Sistema rectificador-inversor para el control de velocidad de motores de inducción mediante la relación Voltaje/Frecuencia constante	14
2.3.1. Relación Voltaje/Frecuencia constante.....	15
2.3.2. Inversores modulados por ancho de pulso.....	17
CAPÍTULO 3.....	23
Depresiones de voltaje y la herramienta de simulación EMTP/ATP	23
3.1. Introducción	23

3.2. Depresiones de voltaje	23
3.2.1. Clasificación y caracterización de las depresiones de voltaje	25
3.2.2. Efectos producidos por las depresiones de voltaje	29
3.2.3. Influencia de las conexiones de los transformadores en la transferencia de las depresiones de voltaje a otros niveles de tensión	30
3.3. La herramienta de simulación EMTP/ATP	32
CAPÍTULO 4.....	36
Simulación de depresiones de voltaje y sus efectos en la máquina de inducción y su control de velocidad	36
4.1. Introducción	36
4.2. Simulación de depresiones de voltaje	36
4.3. Características del sistema eléctrico estudiado	39
4.4. Casos de estudio.....	42
4.4.1. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción típica.....	43
4.4.2. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción real.....	50
4.4.3. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción real con un sistema rectificador-inversor para su control de velocidad	58
CAPÍTULO 5.....	70
Conclusiones.....	70
Referencias.....	72

Lista de Figuras

Figura 2.1. Máquina de inducción trifásica de jaula sencilla o de rotor bobinado en cortocircuito.	5
Figura 2.2. Circuito del motor de inducción en el eje q	13
Figura 2.3. Circuito del motor de inducción en el eje d	14
Figura 2.4. Curvas par-velocidad para velocidades por debajo de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea disminuye linealmente con la frecuencia [Chapman 2005].	16
Figura 2.5. Familia de curvas características par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base y voltaje constante [Chapman 2005].	17
Figura 2.6. Sistema rectificador-inversor para el control de velocidad de motores de inducción.....	18
Figura 2.7. Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltajes del comparador.	20
Figura 2.8. Onda de voltaje en un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de la fase a	20
Figura 2.9. Onda de voltaje en un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de la fase b	21
Figura 2.10. Onda de voltaje de salida de un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de línea ab	21
Figura 2.11. Análisis de Fourier del voltaje de línea-línea ab en valores rms.....	21
Figura 3.1. Evolución de las tensiones de fase, y h (en la parte inferior), durante una depresión de voltaje simétrica [Guasch 2006].	25
Figura 3.2. Modelo de una depresión de voltaje a partir de un divisor de tensión cuando la carga, o el punto de medida, se encuentra en el secundario de un transformador [Guasch 2006].	30
Figura 4.1. Diagrama del sistema eléctrico implementado en ATPDraw para simular fallas que dan origen a depresiones de voltaje.	36

Figura 4.2. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo A obtenida en simulación.....	37
Figura 4.3. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo B obtenida en simulación.....	37
Figura 4.4. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo C obtenida en simulación.....	38
Figura 4.5. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo D obtenida en simulación.....	38
Figura 4.6. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo E obtenida en simulación.....	38
Figura 4.7. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo F obtenida en simulación.....	39
Figura 4.8. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo G obtenida en simulación.....	39
Figura 4.9. Diagrama del sistema eléctrico estudiado implementado en ATPDraw.	40
Figura 4.10. Equivalencias entre componentes mecánicos y eléctricos.	42
Figura 4.11. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.2$ y $\Delta t = 6$ ciclos . Máquina de inducción típica.	44
Figura 4.12. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 6$ ciclos . Máquina de inducción típica.	45
Figura 4.13. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 12$ ciclos . Máquina de inducción típica.....	46
Figura 4.14. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción típica.....	47
Figura 4.15. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción típica.	47
Figura 4.16. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción típica.....	48
Figura 4.17. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción típica.....	49

Figura 4.18. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción típica.	49
Figura 4.19. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción típica.	50
Figura 4.20. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.2$ y $\Delta t = 6$ ciclos . Máquina de inducción real.	52
Figura 4.21. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 6$ ciclos . Máquina de inducción real.	52
Figura 4.22. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 12$ ciclos . Máquina de inducción real.	53
Figura 4.23. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción real.	54
Figura 4.24. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción real.	55
Figura 4.25. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción real.	55
Figura 4.26. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción real.	56
Figura 4.27. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción real.	57
Figura 4.28. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción real.	57
Figura 4.29. Diagrama del sistema eléctrico en estudio implementado en ATPDraw incluyendo el control de velocidad de frecuencia variable.	58
Figura 4.30. Voltaje de alimentación de la fase a en el lado de CA del rectificador.	60
Figura 4.31. Voltaje rms en el enlace de CD.	60
Figura 4.32. Voltaje línea-línea aplicado al motor de inducción.	61
Figura 4.33. Velocidad del motor de inducción.	61
Figura 4.34. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos.	62

Figura 4.35. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos	63
Figura 4.36. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo D, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos	63
Figura 4.37. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo D, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos	64
Figura 4.38. Velocidad del motor de inducción sometido a diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.75$ y $\Delta t = 6$ ciclos	65
Figura 4.39. Voltaje rms en el enlace de CD bajo diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.75$ y $\Delta t = 6$ ciclos	65
Figura 4.40. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo D, $\Delta t = 12$ ciclos y diferente profundidad.	66
Figura 4.41. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo D, $\Delta t = 12$ ciclos y diferente profundidad.	66
Figura 4.42. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y diferente duración.	67
Figura 4.43. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y diferente duración.	68
Figura 4.44. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.5$ y $\Delta t = 24$ ciclos	68

Lista de Tablas

Tabla 3.1. Voltaje durante la depresión, en componentes simétricas, en función de su tipología [Guasch 2006].....	26
Tabla 3.2. Tensión durante la depresión en variables de fase y ecuaciones temporales en función de su tipología [Guasch 2006].....	27
Tabla 3.3. Diagrama fasorial y representación temporal de las depresiones de voltaje [Guasch 2006].....	28
Tabla 3.4. Clasificación de los transformadores en función de su influencia en la transmisión de las depresiones de voltaje [Guasch 2006].	31
Tabla 3.5. Transferencia de depresiones a otros niveles de tensión [Guasch 2006].....	32
Tabla 4.1. Equivalencia entre cantidades mecánicas y eléctricas.....	41
Tabla 4.2. Parámetros de la máquina de inducción típica.	43
Tabla 4.3. Parámetros del sistema mecánico. Máquina de inducción típica.	43
Tabla 4.4. Parámetros eléctricos equivalentes al sistema mecánico. Máquina de inducción típica.....	43
Tabla 4.5. Parámetros de la máquina de inducción real.	50
Tabla 4.6. Parámetros del sistema mecánico. Máquina de inducción real.	51
Tabla 4.7. Parámetros eléctricos equivalentes al sistema mecánico. Máquina de inducción real.	51

Lista de Símbolos y Abreviaturas

ASD	<i>Adjustable Speed Drives</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
ATPDraw	interfaz gráfica del <i>Alternative Transients Program</i>
BPA	<i>Boneville Power Administration</i>
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
EMTP	<i>ElectroMagnetic Transient Program</i>
GIS	<i>Gas Insulated Substations</i>
h	profundidad
HVDC	<i>High-Voltage, Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
m_a	índice de modulación de amplitud
m_f	índice de modulación de frecuencia
η_s	velocidad síncrona
p	operador de derivación $\frac{d}{dt}$
P	número de Polos
pcc	punto de conexión común
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
q	tipología de depresión de voltaje
TACS	<i>Transient Analysis of Control System</i>
TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>
UNE-EN	Una Norma Española, conjunto de normas tecnológicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización, similar a las normas Europeas
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
Δt	intervalo de tiempo

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La sensibilidad de los dispositivos electrónicos a los disturbios en el suministro eléctrico, se ha convertido en los últimos años en uno de los problemas más importantes concernientes con la calidad de la energía eléctrica. Los controladores de velocidad variable, llamados ASD (*Adjustable Speed Drives*), aplicados al control de motores de inducción son algunos de los equipos más comunes a nivel industrial. Los dispositivos de electrónica de potencia que constituyen los ASD, han hecho estos equipos altamente sensibles a uno de los problemas más importantes en el suministro eléctrico, como son las depresiones de voltaje (*sags*) [Rocha *et al.* 2005].

Los *sags* de voltaje se definen como la depresión de la magnitud de voltaje medido en rms entre 0.1 y 0.9 por-unidad (*p.u.*) con duración de 1/2 ciclo a 1 minuto [IEEE 1995]. El origen de los *sags* está asociado con fallas en el sistema eléctrico y con la conexión de cargas grandes, tales como los motores de inducción o con la energización de transformadores. Las características que presentan los voltajes ante estos eventos son la depresión en magnitud y el desplazamiento de sus ángulos de fase. Estas condiciones afectan la operación normal del equipo alimentado, originando como consecuencias a nivel industrial, la interrupción del proceso de fabricación varias veces al año, y que a su vez se traducen en pérdidas tiempo, producción o daño al equipo causando significativas pérdidas económicas [Cardona *et al.* 2006].

Se han reportado algunas configuraciones para prevenir la interrupción del proceso de fabricación. Uno de estos enfoques consiste en una transferencia de potencia entre dos fuentes independientes [Key 1995]. Esto implica una velocidad de conmutación muy rápida (menos de dos ciclos) con un esquema de control sincronizado. Otra alternativa es el uso de sistemas ininterrumpibles de energía (UPS por sus siglas en inglés) para la alimentación del ASD, sin embargo el costo de tales sistemas utilizados en un proceso continuo sería inadmisibile [Newmann *et al.* 2001].

Se han publicado algunas técnicas de compensación de voltaje; algunas se basan en ASD con dispositivos de almacenamiento de energía [Montero *et al.* 2000]. Otras referencias utilizan compensadores de *sags* basados en convertidores CA-CA junto con autotransformadores [Aleoiza *et al.* 2003].

Para analizar el efecto de los *sags* en equipo sensible se han empleado diferentes herramientas. En [Martínez *et al.* 2003] se muestra la amplia aplicación y la capacidad del software ATP (*Alternative Transients Program*) en estudios de calidad de la energía.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo de Tesis es simular, modelando el sistema eléctrico en el ambiente ATPDraw, el comportamiento dinámico de la máquina de inducción y su control de velocidad basado en electrónica de potencia, ante distintas tipologías de depresiones de voltaje producidas por fallas en la red eléctrica, con la finalidad de estudiar sus efectos.

1.3. Justificación

En los últimos 10 años, se le ha prestado mucha atención al impacto que producen los *sags* de voltaje en el comportamiento de los equipos instalados en el sistema eléctrico. A nivel industrial, se han reportado interrupciones en procesos continuos por la mala operación de los ASD a consecuencia de *sags* [Sarmiento *et al.* 1996]. En ese sentido, las pérdidas económicas producidas por la interrupción en diferentes tipos de procesos industriales, han sido cuantiosas [Öhrström *et al.* 2003]. Es por esto que en este trabajo se pretende tener un elemento de análisis para posteriormente obtener un criterio para minimizar las consecuencias de una mala operación de cargas sensibles, como las máquinas de inducción, debidas a depresiones de voltaje.

1.4. Metodología

Para alcanzar el objetivo planteado en esta Tesis se realizará una amplia revisión documental, para la implementación en el ambiente ATPDraw, de los modelos de máquinas de inducción, de su control de velocidad basado en un convertidor de frecuencia y de las diversas tipologías de depresiones de voltaje. Una vez modelado completamente el sistema eléctrico, se efectuarán pruebas para estudiar el comportamiento dinámico de la máquina de

inducción ante distintas condiciones de depresiones de voltaje, y por último, se realizará la revisión y el análisis de los resultados obtenidos.

1.5. Contenido de la Tesis

En el Capítulo uno se expone una breve introducción a este trabajo, se describen los antecedentes, se muestra un panorama de referencia sobre el efecto de los disturbios del suministro eléctrico mencionando los estudios realizados por diversos autores. Por último, se enuncia el objetivo de este trabajo y la metodología a seguir para lograrlo.

En el Capítulo dos se revisan y caracterizan los modelos de las máquinas de inducción y su control de velocidad para su implementación en el ambiente ATPDraw.

En el Capítulo tres se revisan y caracterizan los modelos de las depresiones de voltaje para su simulación en el ambiente ATPDraw así como una descripción de esta herramienta computacional.

En el Capítulo cuatro se presenta la simulación, en el ambiente ATPDraw, de diversos casos de estudio de la máquina de inducción y su control de velocidad de frecuencia variable ante distintas condiciones de depresiones de voltaje.

En el Capítulo cinco se presentan las conclusiones generales de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

Modelo y esquema de control de velocidad de la máquina de inducción

2.1. Introducción

En este Capítulo se presenta el modelo de la máquina de inducción trifásica rotativa, que permite determinar su comportamiento dinámico cuando se producen depresiones de voltaje. Además, también se muestra el esquema de control de velocidad, mediante la relación Voltaje/Frecuencia constante, utilizando la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) senoidal.

2.2. Modelo de la máquina de inducción trifásica, de jaula sencilla o de rotor bobinado

La máquina de inducción trifásica, de jaula sencilla o de rotor bobinado, posee tres devanados en el estator y tres en el rotor, estos últimos pueden ser reales (rotor bobinado) o ficticios (jaula sencilla). Las simplificaciones que se suelen realizar para obtener las ecuaciones de la misma son las siguientes [Córcoles 1998]:

- Estator y rotor lisos (entrehierro constante).
- Máquina simétrica (bobinas del estator iguales entre sí y bobinas del rotor iguales entre sí).
- Comportamiento magnético del hierro lineal.
- Permeabilidad magnética del hierro elevada (reluctancia magnética despreciable frente a la del entrehierro).
- Distribución senoidal del campo en el entrehierro.

El modelo matemático que es utilizado para transformar las variables de referencia de fase del motor abc , a un sistema de referencia estacionario $dq0$, permite cambiar las ecuaciones diferenciales con coeficientes no constantes (periódicos) a un sistema de

ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes, suponiendo constante la velocidad mecánica y que el circuito magnético es lineal. Por medio de esta transformación se reduce significativamente la complejidad y el tiempo de cálculo, y permite analizar la máquina en condiciones transitorias.

En forma matricial las ecuaciones de voltaje que rigen el comportamiento de la máquina de inducción trifásica de la Figura 2.1, considerando una máquina de dos polos que se puede generalizar para cualquier número de pares de polos, son las siguientes:

Para el voltaje en el estator en abc :

$$[V_{abcs}] = [r_s][i_{abcs}] + p\lambda_{abcs} \quad (2.1)$$

Mientras que para el voltaje en el rotor en abc :

$$[V_{abcr}] = [r_r][i_{abcr}] + p\lambda_{abcr} \quad (2.2)$$

El subíndice r indica las variables del rotor, mientras que el subíndice s indica las variables del estator; las matrices de resistencias $[r]$ son diagonales [Krause *et al.* 2002].

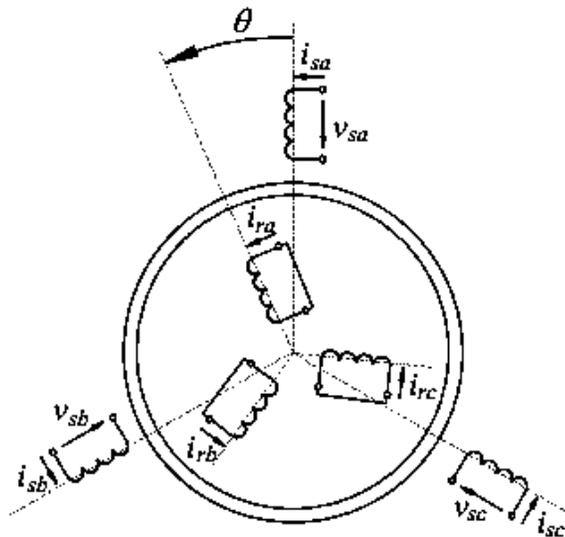


Figura 2.1. Máquina de inducción trifásica de jaula sencilla o de rotor bobinado en cortocircuito.

Para las ecuaciones anteriores se tienen las siguientes funciones en abc para el rotor y para el estator, las cuales obedecen al desplazamiento de 120° cada una de las fases en dirección positiva de los ejes magnéticos de los devanados.

Funciones en abc para el estator:

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (2.3)$$

Funciones en abc para el rotor:

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \quad (2.4)$$

Mientras que la ecuación de flujos se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

En la matriz anterior λ_{abcs} y λ_{abcr} son los enlaces del flujo en el rotor y en el estator respectivamente y $[L]$ de acuerdo a su subíndice representa las inductancias del rotor, estator y mutuas, multiplicadas por las corrientes en abc del estator y rotor.

Para obtener los enlaces de flujo es necesario conocer las matrices de inductancia que son:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

En donde L_{ms} es la inductancia de magnetización y L_{ls} es la inductancia de dispersión del estator (2.6) o rotor (2.7). Mientras que $-\frac{1}{2}L_{ms}$ es la inductancia mutua entre fases de rotor (2.7) o de estator (2.6).

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

La inductancia L_{sr} es la amplitud de las inductancias mutuas entre los devanados del rotor y del estator [Krause *et al.* 2002].

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Para un análisis más práctico se pueden referir las variables del rotor al estator con ayuda de la relación de vueltas esto es [Krause *et al.* 2002]:

$$i'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} i_{abcr} \quad (2.9)$$

$$V'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} V_{abcr} \quad (2.10)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (2.11)$$

De acuerdo a la relación de transformación también se obtiene la inductancia de magnetización:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (2.12)$$

Y la inductancia mutua también se puede referir al estator al utilizar la diferencia del número de vueltas:

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (2.13)$$

Así se define la matriz de amplitud de las inductancias mutuas referidas al estator:

$$L'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Y para obtener la matriz propia del rotor:

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_r \quad (2.15)$$

Para la matriz de inductancia del rotor referida al estator se tiene que:

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L'_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L'_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Así la matriz de voltajes referida al estator es:

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^T & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Para obtener el par que desarrolla la máquina es necesario recordar que la energía almacenada es un sistema lineal magnético [Krause *et al.* 2002]. Entonces se define como:

$$\omega_f = \frac{1}{2}(i_{abcsa})^T (L_s - L_{ls} I) i_{abcs} + (i_{abcs})^T L'_{sr} i'_{abcr} + \frac{1}{2}(i'_{abcr})^T (L'_r - L'_{lr} I) i'_{abcr} \quad (2.18)$$

Aquí se tiene que I es la matriz identidad y por ser un sistema lineal magnético se considera que ω_f es igual a ω_e [Krause *et al.* 2002].

El cambio de energía mecánica en un sistema rotacional con una entrada mecánica puede escribirse como [Krause *et al.* 2002]:

$$d\omega_m = -T_e d\theta_{rm} \quad (2.19)$$

de aquí T_e es el par electromagnético positivo y θ_{rm} es el desplazamiento angular del rotor.

Para llegar a la ecuación directa del par se cuenta con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_{rm} \quad (2.20)$$

$$d\omega_m = -T_e \left(\frac{2}{P} \right) d\theta_r \quad (2.21)$$

en donde P es el número de polos.

Finalmente se tiene la ecuación del par y la velocidad del rotor como:

$$T_e = \left(\frac{P}{2} \right) (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] i'_{abcr} \quad (2.22)$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) p \omega_r + T_L \quad (2.23)$$

Para el análisis de un motor de inducción se transforman las variables de un circuito trifásico del devanado del rotor a un marco de referencia arbitrario por medio de la ecuación [Krause *et al.* 2002]:

$$f'_{qd0r} = K_r f'_{abcr} \quad (2.24)$$

Donde se ocupan las funciones en abc anteriormente mencionadas:

$$(f'_{abcr})^T = [f'_{ar} \quad f'_{br} \quad f'_{cr}] \quad (2.25)$$

Y las funciones en los nuevos ejes magnéticos quedarían:

$$(f'_{qd0r})^T = [f'_{qr} \quad f'_{dr} \quad f'_{0r}] \quad (2.26)$$

Mientras que la matriz de transformación conocida como matriz de referencia arbitraria k para los ejes $dq0$ es:

$$k_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen} \beta & \text{sen}\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

donde:

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (2.28)$$

Y la inversa de la matriz de transformación k es:

$$(k_r)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \text{sen} \beta & 1 \\ \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Con las ecuaciones anteriores se pueden obtener los voltajes en $dq0$ con las siguientes igualdades:

$$V_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + w \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (2.30)$$

$$V_{qd0r} = r'_r i_{qd0r} + (w - w_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda_{qd0r} \quad (2.31)$$

Donde los enlaces de flujo son:

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \quad (2.32)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{qr} \quad 0] \quad (2.33)$$

Si se sustituyen las ecuaciones de transformación en los enlaces de flujo que estaban expresados anteriormente en abc para un sistema magnético lineal:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s L_s(k_s)^{-1} & k_s L'_{sr}(k_r)^{-1} \\ k_r (L'_{sr})^T(k_s)^{-1} & k_r L'_r(k_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq0s} \\ i'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

La matriz de enlaces de flujo está conformada por submatrices relacionadas con las inductancias; éstas se muestran a continuación [Kosow 1993]:

$$k_s L_s(k_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$k_r L'_r(k_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$k_s L'_s(k_s)^{-1} = k_r (L'_{sr})^T(k_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Se tendrán las ecuaciones de voltaje en forma expandida para el estator:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (2.38)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (2.39)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (2.40)$$

Y los voltajes en $dq0$ para el rotor referenciados al estator:

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (2.41)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (2.42)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \quad (2.43)$$

Sustituyendo se obtienen las expresiones para los enlaces de flujo para el estator:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.44)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.45)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (2.46)$$

Mientras que los enlaces de flujo para el rotor referidos al estator son:

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.47)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.48)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (2.49)$$

A continuación se presenta el circuito equivalente de la máquina de inducción trifásica simétrica. En la Figura 2.2 se muestra en el eje q y en la Figura 2.3 se muestra en el eje d . Como ya se mencionó, con la transformación a este cuadrante se facilitan los cálculos para el análisis del comportamiento del motor de inducción; en el caso de los parámetros se puede observar que están en el Sistema Internacional.

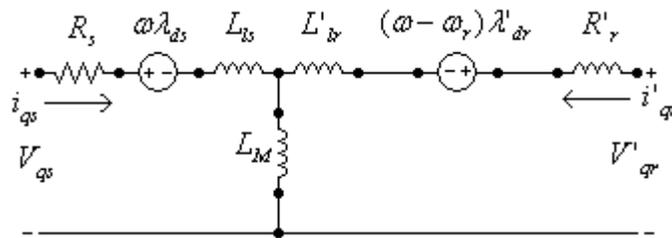


Figura 2.2. Circuito del motor de inducción en el eje q .

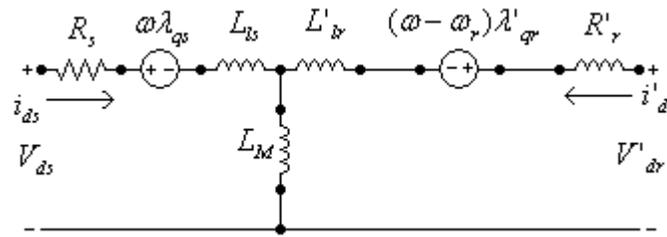


Figura 2.3. Circuito del motor de inducción en el eje d .

El circuito equivalente de un motor de inducción con el rotor bobinado está definido por seis parámetros; tres resistencias que modelan las pérdidas en el cobre de los conductores y en el material magnético, y tres reactancias que presentan los flujos de dispersión y magnetización de la máquina. En el circuito equivalente se consideran fuentes de voltaje que dependen de los enlaces de flujo, así como de la velocidad; en el caso del rotor, del deslizamiento, ya que este influye directamente en el valor del voltaje inducido.

2.3. Sistema rectificador-inversor para el control de velocidad de motores de inducción mediante la relación Voltaje/Frecuencia constante

Hasta la llegada de los modernos controladores de estado sólido, los motores de inducción no eran las máquinas adecuadas para aplicaciones que requerían control de velocidad. El rango normal de operación de un motor de inducción típico está confinado a menos de 5% de deslizamiento y la variación de la velocidad en ese rango es casi directamente proporcional a la carga sobre el eje del motor. Aún si el deslizamiento fuera mayor, la eficiencia del motor sería muy pobre puesto que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del motor [Chapman 2005].

Existen sólo dos técnicas para controlar la velocidad de un motor de inducción, una de las cuales consiste en variar la velocidad de los campos magnéticos del rotor y del estator (velocidad síncrona η_s); la velocidad del rotor siempre permanece cerca de η_s .

La velocidad síncrona de un motor de inducción está dada por:

$$\eta_s = \frac{120f}{P} \quad (2.50)$$

en donde f es la frecuencia de línea y P el número de polos.

Por tanto, las únicas formas en que se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina son: 1) cambiando la frecuencia eléctrica y 2) cambiando el número de polos de la máquina.

La otra técnica para el control de velocidad de la máquina consiste en variar el deslizamiento del motor para una carga dada. El control del deslizamiento puede ser llevado a cabo, bien sea, variando la resistencia del rotor o variando el voltaje en las terminales del motor [Chapman 2005].

2.3.1. Relación Voltaje/Frecuencia constante

Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor (velocidad síncrona del motor en condiciones nominales) es necesario reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para obtener una operación adecuada. El voltaje aplicado a las terminales del estator deberá disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia en él. Este proceso se llama degradación (*derating*). Si esto no se hace, se saturará el acero del núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina [Chapman 2005].

Para entender esto, recuérdese que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la Ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.51)$$

Si se aplica un voltaje $v(t) = V_M \sin \omega t$ al núcleo, el flujo ϕ resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int v(t) dt = \frac{1}{N} \int V_M \sin \omega t dt \quad (2.52)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N} \cos \omega t \quad (2.53)$$

Nótese que la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión. Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementará cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización [Chapman 2005].

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante. Sin embargo, la regla volts/hertz constantes conduce a una caída del par o momento de torsión a bajas velocidades debido a la presencia de la resistencia del estator. Si no estuviera presente, la regla funcionaría a la perfección [Chapman 2005].

La Figura 2.4 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción para velocidades menores que la velocidad base suponiendo que la magnitud del voltaje del estator varía linealmente con la frecuencia [Chapman 2005]. Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal. Cuanto mayor sea la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base, mayor será el denominador de la Ecuación 2.53. Puesto que el término del numerador se mantiene constante cuando se opera sobre la frecuencia nominal, disminuyen el flujo resultante en la máquina y el par máximo.

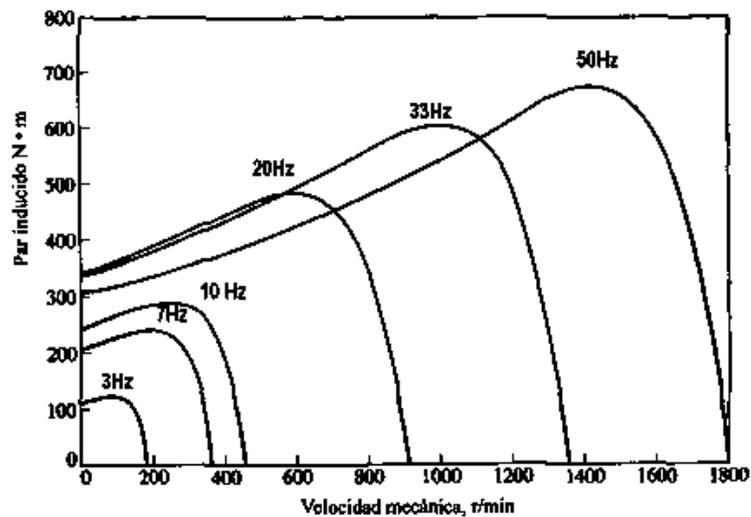


Figura 2.4. Curvas par-velocidad para velocidades por debajo de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea disminuye linealmente con la frecuencia [Chapman 2005].

La Figura 2.5 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción a velocidades por encima de la nominal, si el voltaje del estator se mantiene constante.

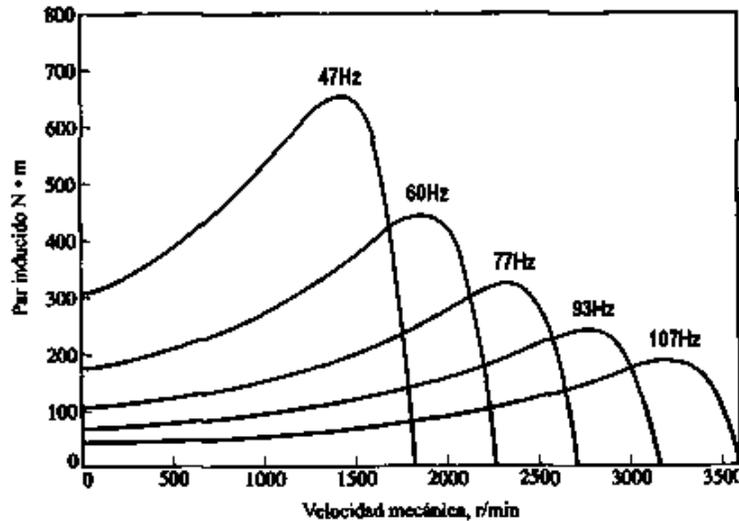


Figura 2.5. Familia de curvas características par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base y voltaje constante [Chapman 2005].

2.3.2. Inversores modulados por ancho de pulso

Los convertidores de CD a CA se llaman inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de CD (V_{CD}) a un voltaje simétrico de salida de CA, con la magnitud y frecuencia deseadas. El voltaje de salida podría ser fijo o variable, a una frecuencia fija o variable. Un voltaje variable de salida se puede obtener haciendo variar el voltaje de entrada de CD, manteniendo constante la ganancia del inversor. La frecuencia de salida de un inversor estático está determinada por la velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores que lo conforman, por lo que se tiene una salida de frecuencia ajustable intrínseca a esta característica.

El inversor debe recibir la entrada de CD desde una batería pero en la mayoría de las aplicaciones industriales se encuentra alimentado por un rectificador, ya sea de diodos o de tiristores.

Los inversores pueden clasificarse según estén alimentados por una fuente de voltaje (VSI) o de corriente (CSI). Los primeros están alimentados por una fuente de CD de baja

impedancia como puede ser una batería o un rectificador, en el que a la salida tendrá un filtro LC. El filtro capacitivo en paralelo con las terminales del inversor mantiene un voltaje de CD constante. Por lo tanto, este inversor es una fuente de voltaje de frecuencia ajustable en donde la salida de voltaje es esencialmente independiente de la corriente de carga [Murphy *et al.* 1988].

Por otro lado, el inversor de corriente está alimentado por una corriente controlada desde una fuente de CD de alta impedancia. Típicamente un rectificador de tiristores controlados por fase alimenta este inversor con una corriente regulada a través de un inductor en serie; por lo tanto, la corriente de carga es controlada y el voltaje de salida del inversor es dependiente de la impedancia de la carga.

La Figura 2.6 muestra esquemáticamente la configuración típica del sistema rectificador-inversor trifásico para el control de velocidad de motores de inducción.

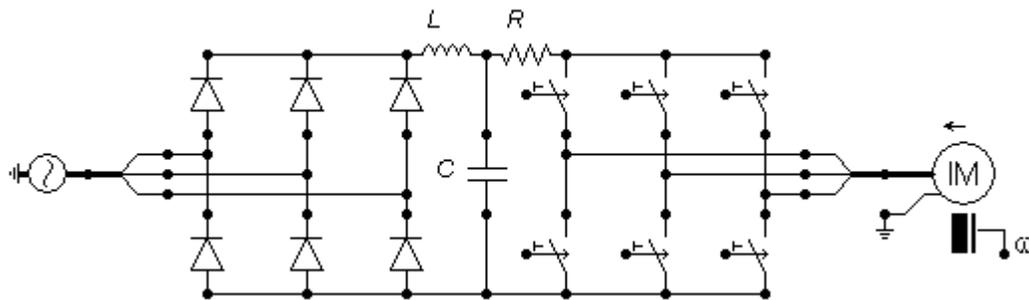


Figura 2.6. Sistema rectificador-inversor para el control de velocidad de motores de inducción.

La operación mediante frecuencia ajustable de una onda modulada senoidalmente a la salida del inversor para el control de velocidad de un motor de CA, requiere la generación de tres ondas senoidales trifásicas con amplitud y frecuencia variables. Si el motor opera a velocidades muy bajas, el oscilador de referencia debe tener capacidad de baja frecuencia hasta cero Hertz.

La mayoría de los motores de CA están diseñados para operar con una fuente senoidal, por lo que la salida del inversor debe ser lo más senoidal posible. Para tal efecto, la onda de referencia también debe ser de tipo senoidal, para lograr una salida PWM en la que el ancho de pulso sea modulado senoidalmente en cada medio ciclo. Esta técnica se denomina PWM senoidal, o PWM subarmónico [Murphy *et al.* 1988].

Cada fase del inversor está alimentada por un comparador para las dos ondas, la senoidal de referencia de frecuencia f_r , y la portadora triangular de frecuencia f_c , que es común a todas las fases. La portadora triangular tiene una amplitud fija, y la relación de amplitudes entre la onda senoidal de referencia y la portadora triangular se denomina índice de modulación de amplitud (m_a) [Murphy *et al.* 1988].

El índice de modulación de frecuencia (m_f) es la relación de frecuencias entre la onda senoidal de referencia y la portadora triangular; m_f debe ser múltiplo impar de tres. Así todos los voltajes de fase son idénticos pero desfasados 120° y sin armónicas pares. Por consiguiente, para múltiplos impares de tres veces m_f , las armónicas en el voltaje de salida de CA aparecen a frecuencias normalizadas f_h centradas en m_f y sus múltiplos; en forma específica en:

$$n = jm_f \pm k \quad (2.54)$$

en donde $j = 1, 3, 5, \dots$ para $k = 2, 4, 6, \dots$; y $j = 2, 4, \dots$ para $k = 1, 5, 7, \dots$, de tal modo que n no es múltiplo de tres. Por consiguiente, las armónicas están en $m_f \pm 2, m_f \pm 4, \dots, 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5, \dots, 3m_f \pm 2, 3m_f \pm 4, \dots, 4m_f \pm 1, 4m_f \pm 5, \dots$

La amplitud máxima del voltaje fundamental de fase en la región lineal ($m_a \leq 1$) es $V_{CD}/2$; el voltaje de salida rms, línea a línea, a la frecuencia fundamental se puede expresar como:

$$V_{LL_1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{CD} \quad (2.55)$$

En la Figura 2.7 se muestran los voltajes senoidales de referencia y la señal portadora triangular común en el comparador para $m_a = 0.95$ y $m_f = 16.67$.

Los correspondientes voltajes de las fases a y b , y el resultante voltaje línea a línea ab , se muestran en las Figuras 2.8, 2.9 y 2.10 respectivamente.

En la Figura 2.11 se muestra el resultado del análisis de Fourier del voltaje de línea a línea ab en $p.u.$ obtenido en ATPDraw.

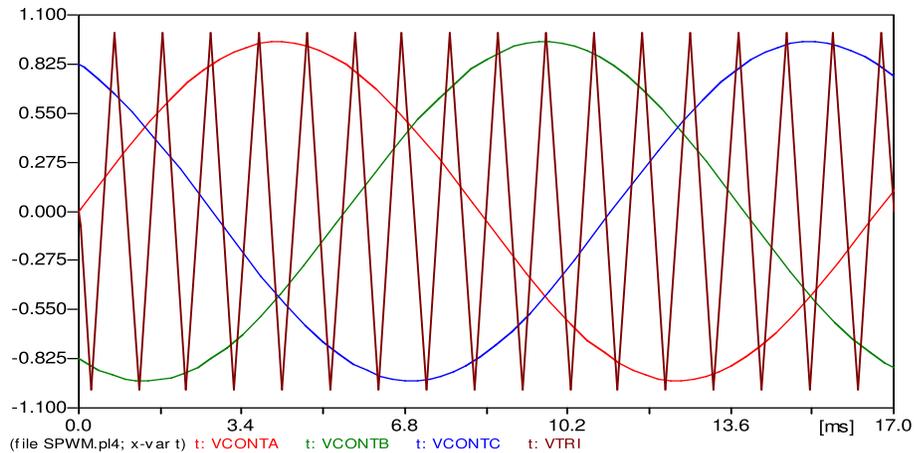


Figura 2.7. Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltajes del comparador.

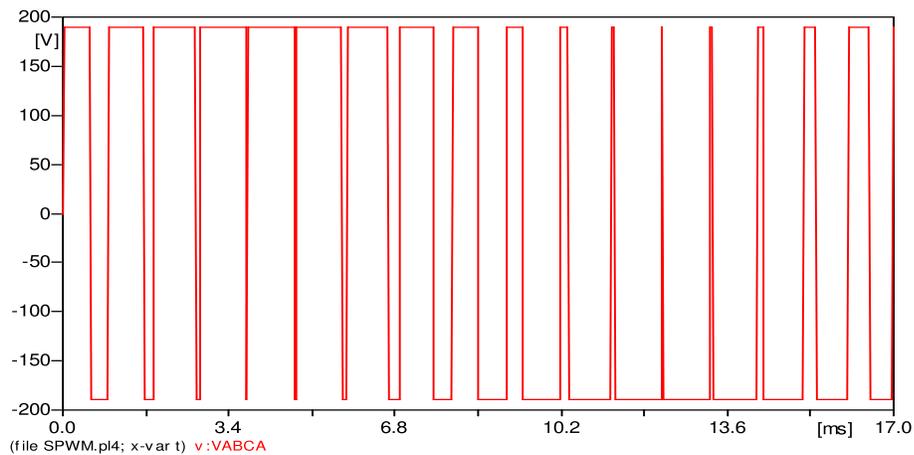


Figura 2.8. Onda de voltaje en un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de la fase a .

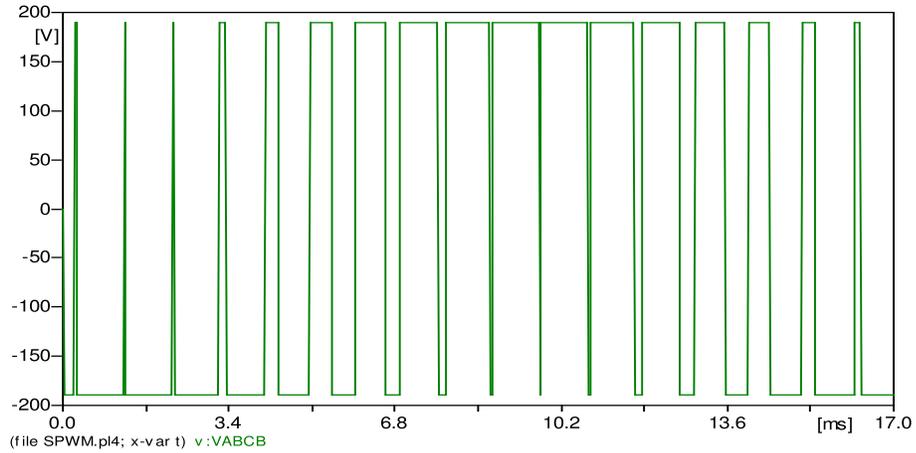


Figura 2.9. Onda de voltaje en un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de la fase *b*.

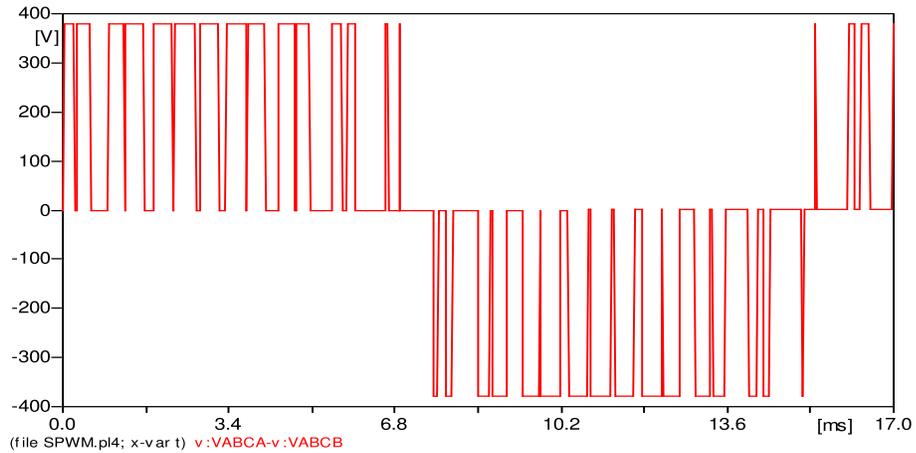


Figura 2.10. Onda de voltaje de salida de un inversor trifásico controlado por PWM senoidal. Voltaje de línea *ab*.

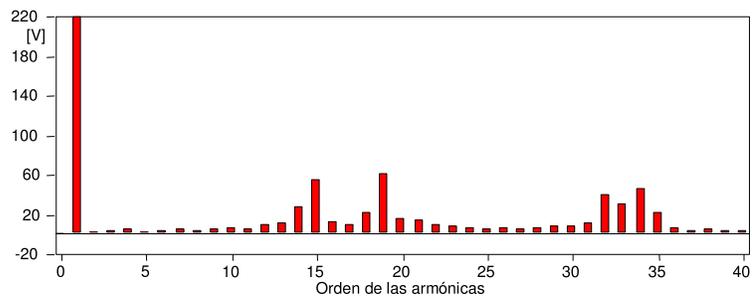


Figura 2.11. Análisis de Fourier del voltaje de línea-línea *ab* en valores rms.

En este trabajo de Tesis el ajuste de la frecuencia de salida del inversor se hará manteniendo fijo el índice de modulación de amplitud y disminuyendo linealmente la frecuencia de las tres ondas senoidales de referencia en el comparador a medida de la reducción de voltaje en el enlace de CD producido por las depresiones de voltaje.

CAPÍTULO 3

Depresiones de voltaje y la herramienta de simulación EMTP/ATP

3.1. Introducción

En este Capítulo se describen y analizan las depresiones de voltaje para poder estudiar, en los Capítulos posteriores, sus efectos sobre la máquina de inducción trifásica y su control de velocidad. Además, también se hace una descripción de la herramienta computacional utilizada en esta Tesis, mencionando y detallando sus principales características.

3.2. Depresiones de voltaje

En las publicaciones relacionadas con la Calidad del Suministro Eléctrico no existe una definición unívoca de depresión de voltaje. A modo de ejemplo se indican las siguientes:

- La norma UNE-EN 50160 [UNE 2001] define a la depresión de voltaje como: “disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada U_C , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, una depresión de voltaje dura de 10 ms a 1 min. La profundidad de la depresión de voltaje es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante la depresión de voltaje y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada U_C no son consideradas como depresiones de voltaje”.
- La norma IEEE Std. 1159-1995 [IEEE 1995], define depresión como una disminución del voltaje o la intensidad, en valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 *p.u.* a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre 0.5 ciclos y 1 minuto.

Coincidiendo con ambas normas una depresión de voltaje queda caracterizada, en una primera aproximación, por una tensión residual referida a la tensión inicial, que en adelante se denominará profundidad, h , ($0 \leq h \leq 1$) y una duración, Δt , de tal modo que la tensión puede estar representada por:

$$v(h, \Delta t) \quad (3.1)$$

También se puede utilizar esta notación para los efectos que producen las depresiones en las cargas, por ejemplo los picos de intensidad en un motor de inducción, o en un transformador cuando se produce una depresión de voltaje de profundidad h y duración Δt es:

$$i_{pico}(h, \Delta t) \quad (3.2)$$

En cuanto a las causas y frecuencia de las depresiones de voltaje, la norma UNE-EN 50160 [UNE 2001] indica que “las depresiones de voltaje son generalmente debidas a defectos que sobrevienen en las instalaciones de los clientes o en la red general. Estos sucesos fundamentalmente aleatorios son imprevisibles. Su frecuencia anual depende principalmente del tipo de red de distribución y del punto de observación. Además, su distribución en un año puede ser muy irregular”.

En concreto, las depresiones pueden estar originadas por fallas producidas en la red (originadas por descargas atmosféricas, animales, accidentes u otros, así como por errores en la operación), o por sobrecargas (arranque de motores de potencia elevada, conexión de grandes cargas, conexión de transformadores o sobrecarga en general de la red) que provocan una caída de tensión excesiva. Las depresiones más severas son las producidas por las fallas. La profundidad de la depresión depende de la potencia de la red y de la proximidad de la falla (o del punto donde se origina la sobrecarga) al punto donde se está observando la depresión de voltaje [Guasch 2006].

En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de la evolución de las tensiones cuando se produce una depresión de voltaje simétrica con una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una

duración $\Delta t = 5$ ciclos, así como la evolución temporal de h ($h = 0.5$ durante la depresión y $h = 1$ antes y después de la misma) [Guasch 2006].

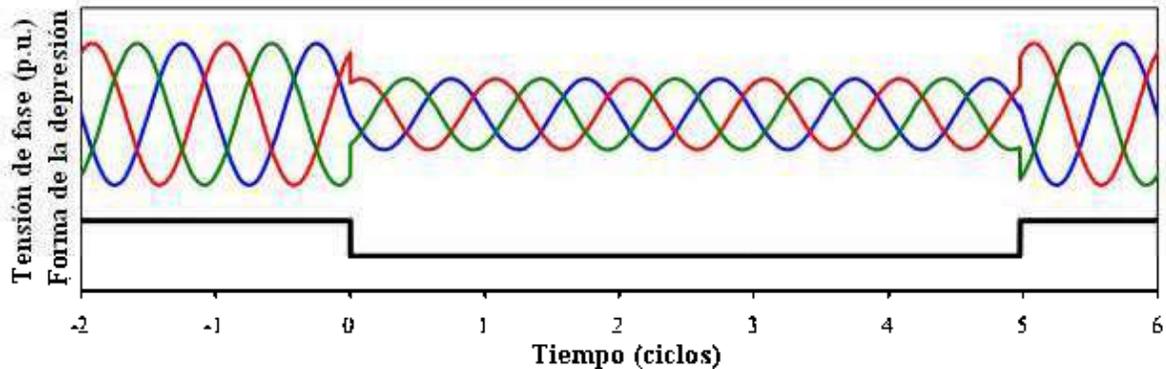


Figura 3.1. Evolución de las tensiones de fase, y h (en la parte inferior), durante una depresión de voltaje simétrica [Guasch 2006].

Cuando se producen este tipo de fenómenos en la red, las cargas conectadas a la misma se ven afectadas de diferente modo, en función de su sensibilidad. Un efecto típico de las depresiones de voltaje es la aparición de picos de intensidad tras la recuperación de la tensión [Guasch 2006].

Las depresiones de voltaje pueden ser simétricas o asimétricas, en función del tipo de falla o del tipo de sobrecarga que las ha originado. Cuando el valor eficaz de la tensión de todas las fases disminuye en la misma proporción, y el desfase entre ellas se mantiene en 120° , se dice que la depresión es simétrica (como en el caso mostrado en la Figura 3.1). Un cortocircuito trifásico, el arranque de un motor de potencia o la sobrecarga producida por cargas trifásicas, originan este tipo de depresión. Una depresión de voltaje es asimétrica cuando la disminución del valor eficaz de la tensión no es igual para las tres fases y/o el desfase entre las mismas no es de 120° . En este caso fallas fase-tierra, fase-fase y fase-fase-tierra, así como la conexión de transformadores de potencia, o la sobrecarga por cargas monofásicas o no simétricas, originan este tipo de depresiones [Guasch 2006].

3.2.1. Clasificación y caracterización de las depresiones de voltaje

El análisis de la tensión que se tiene en el punto de conexión común (pcc) donde están conectados los usuarios a la red, bien directamente, o bien a través de transformadores,

cuando se originan las diferentes fallas, la conexión de la carga y la transmisión de las depresiones de voltaje a otros niveles de tensión permite clasificar a las depresiones de voltaje en 7 tipologías: A, B, C, D, E, F y G [Bollen 2000].

La Tabla 3.1 muestra la tensión de todos los tipos de depresiones en componentes simétricas [Guasch 2006]. Sólo las depresiones tipos B y E presentan componente homopolar. Por otro lado, la depresión tipo A es la única que sólo presenta componente directa, puesto que es simétrica.

Tabla 3.1. Voltaje durante la depresión, en componentes simétricas, en función de su tipología [Guasch 2006].

Tipo de depresión	Homopolar	Directa	Inversa
A	$\underline{V}_{0,A} = 0$	$\underline{V}_{1,A} = h \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,A} = 0$
B	$\underline{V}_{0,B} = -\frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{1,B} = \frac{2+h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,B} = -\frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$
C	$\underline{V}_{0,C} = 0$	$\underline{V}_{1,C} = \frac{1+h}{2} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,C} = \frac{1-h}{2} \cdot \underline{V}$
D	$\underline{V}_{0,D} = 0$	$\underline{V}_{1,D} = \frac{1+h}{2} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,D} = -\frac{1-h}{2} \cdot \underline{V}$
E	$\underline{V}_{0,E} = \frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{1,E} = \frac{1+2 \cdot h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,E} = \frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$
F	$\underline{V}_{0,F} = 0$	$\underline{V}_{1,F} = \frac{1+2 \cdot h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,F} = -\frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$
G	$\underline{V}_{0,G} = 0$	$\underline{V}_{1,G} = \frac{1+2 \cdot h}{3} \cdot \underline{V}$	$\underline{V}_{2,G} = \frac{1-h}{3} \cdot \underline{V}$

La Tabla 3.2 presenta las ecuaciones de todas las depresiones de voltaje en variables de fase y en función del tiempo.

La Tabla 3.3 proporciona una idea más gráfica de la tensión residual de cada tipo de depresión, ya que se representa la tensión en función del tiempo. En estas Figuras se ha tomado una profundidad $h = 0.5$ y una duración $\Delta t = 5$ ciclos.

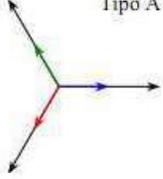
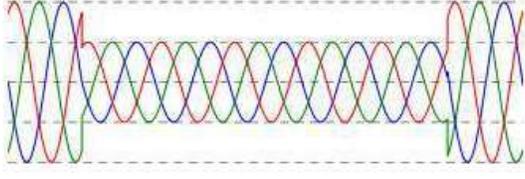
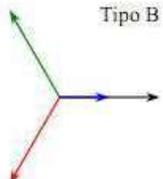
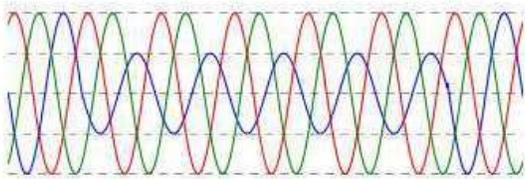
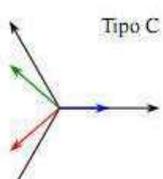
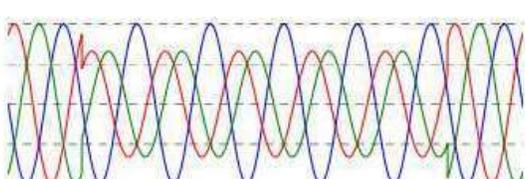
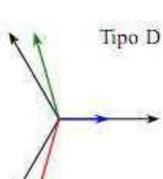
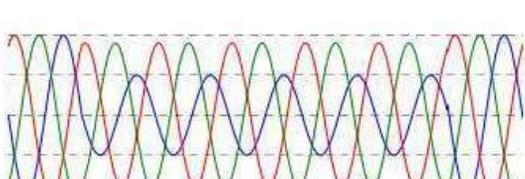
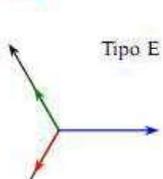
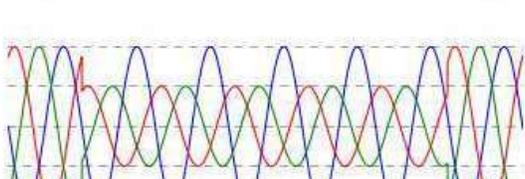
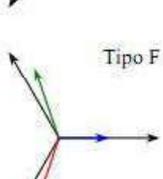
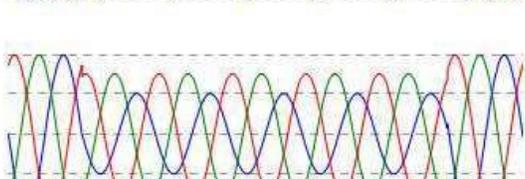
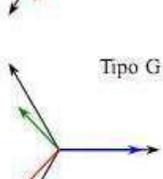
Por lo visto hasta ahora, una depresión de voltaje se puede caracterizar mediante su profundidad, duración y tipología q :

$$v(h, \Delta t, q) \text{ donde } q \in [A, B, C, D, E, F, G] \quad (3.3)$$

Tabla 3.2. Tensión durante la depresión en variables de fase y ecuaciones temporales en función de su tipología [Guasch 2006].

Tipo de Depresión	Tensión	
	Variables de fase	Ecuaciones temporales
A	$\underline{V}_a = h \cdot \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
B	$\underline{V}_a = h \cdot \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
C	$\underline{V}_a = \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{1+3 \cdot h^2}}{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi + \beta)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{1+3 \cdot h^2}}{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}(\sqrt{3} \cdot h)$
D	$\underline{V}_a = h \cdot \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi + \beta)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}(\sqrt{3}/h)$
E	$\underline{V}_a = \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$
F	$\underline{V}_a = h \cdot \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot h \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \alpha)$
	$\underline{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi + \beta)$
	$\underline{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{(2+h)}{\sqrt{3} \cdot h}\right)$
G	$\underline{V}_a = \frac{2+h}{3} \cdot \underline{V}$	$v_a = \sqrt{2} \cdot \frac{2+h}{3} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$
	$\underline{V}_b = -\frac{2+h}{6} \cdot \underline{V} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_b = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{7 \cdot h^2 + h + 1}}{3} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi + \beta)$
	$\underline{V}_c = -\frac{2+h}{6} \cdot \underline{V} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \cdot \underline{V}$	$v_c = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{7 \cdot h^2 + h + 1}}{3} \cdot V \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{(3 \cdot \sqrt{3} \cdot h)}{(2+h)}\right)$

Tabla 3.3. Diagrama fasorial y representación temporal de las depresiones de voltaje [Guasch 2006].

Diagrama fasorial	Representación temporal
<p>Tipo A</p> 	
<p>Tipo B</p> 	
<p>Tipo C</p> 	
<p>Tipo D</p> 	
<p>Tipo E</p> 	
<p>Tipo F</p> 	
<p>Tipo G</p> 	

3.2.2. Efectos producidos por las depresiones de voltaje

Las depresiones de voltaje producen efectos en los equipos que se ven sometidos a ellos en función de las características propias de la depresión, de la naturaleza del equipo afectado y del tipo de conexión a la red [Guasch 2006].

Entre los tipos de cargas que se ven afectados por las depresiones de voltaje se encuentran: motores de inducción, transformadores, motores síncronos, convertidores electrónicos, sistemas de control, equipo de cómputo, etc. Esta Tesis se centra en el estudio de los efectos de las depresiones de voltaje en las máquinas de inducción trifásicas y sus controles electrónicos.

De forma breve, los efectos producidos por las depresiones de voltaje en las diferentes cargas son [Guasch 2006]:

- Máquinas de inducción: picos de intensidad, picos de par, pérdida de velocidad y posible detención del mismo.
- Transformadores: picos de intensidad.
- Motores síncronos: picos de intensidad, picos de par y posible pérdida de sincronismo.
- Convertidores electrónicos: en muchos accionamientos de velocidad variable para máquinas de corriente alterna, la fuente de tensión que alimenta al inversor consiste básicamente en un capacitor que se alimenta a través de un rectificador trifásico en puente de diodos conectado a la red eléctrica. Las depresiones de voltaje de la red eléctrica causan caídas de tensión en el lado de continua que producen variaciones en la velocidad y en el par de la máquina y picos de corriente en el lado de alterna del rectificador que pueden provocar el disparo de las protecciones.
- Sistemas de control: su funcionamiento en tiempo real puede provocar que las informaciones captadas o enviadas a los sensores y actuadores, o bien el procesado del propio sistema de control se vean afectados en su funcionamiento cuando se produzca una depresión de voltaje.
- Equipo de cómputo: pueden conllevar desde una parada no deseada a la pérdida de información o avería de alguno de sus componentes.

Cuando se analizan las depresiones de voltaje desde el punto de vista industrial siempre se debe tener en cuenta cual es el costo económico de los efectos producidos. Por ejemplo,

las pérdidas económicas pueden ser importantes en el caso de una empresa en la que una depresión de voltaje ocasione la interrupción del funcionamiento de un motor de gran potencia y, en consecuencia, se pierda la materia del proceso de producción.

Por lo tanto, puede ser de gran importancia conocer la sensibilidad de los equipos a las depresiones de voltaje en determinado tipo de industrias para poder hacer frente a ellas minimizando sus consecuencias.

3.2.3. Influencia de las conexiones de los transformadores en la transferencia de las depresiones de voltaje a otros niveles de tensión

Como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2, si existen transformadores entre el punto de conexión común, pcc_1 , y el punto de medida (o de conexión de la carga), pcc_2 , las fallas pueden determinar diferentes tipos de depresiones en el primario y en el secundario del transformador.

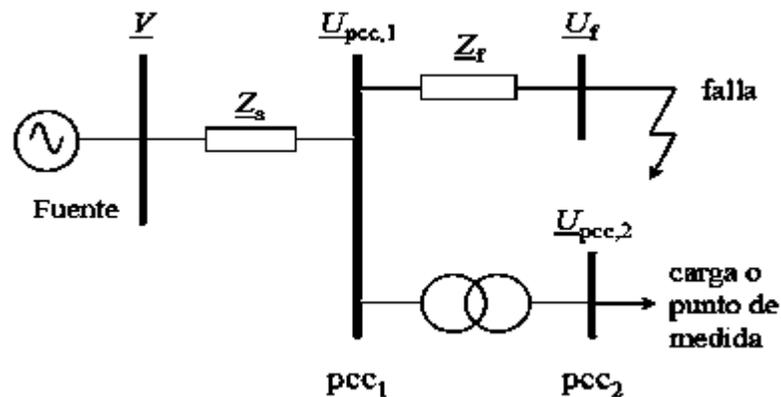


Figura 3.2. Modelo de una depresión de voltaje a partir de un divisor de tensión cuando la carga, o el punto de medida, se encuentra en el secundario de un transformador [Guasch 2006].

a) Conexiones y tipos de transformadores en función de su influencia en la transmisión de las depresiones de voltaje

La designación de la forma de conexión de un transformador se realiza por medio de dos letras (por ejemplo: Yy, Dd, Yz, ...). La primera letra es mayúscula e indica la forma de conexión del lado de alta tensión y la segunda letra es minúscula e indica la forma de conexión en el lado de baja tensión. Las letras que representan la forma de conexión son:

- Y, y: Estrella.

- D, d: Delta.
- Z, z: Zig-Zag.

Si una estrella o un zig-zag tienen su neutro unido a la red se coloca la letra N ó n después de las letras Y, y, Z ó z, respectivamente.

Así un transformador YNd es un transformador estrella-delta en el que la estrella del lado de alta tensión tiene su neutro unido a la red eléctrica.

La Tabla 3.4 muestra la clasificación en tres grupos de los transformadores, sus conexiones y sus características en función de su influencia en la transmisión de depresiones de voltaje.

Tabla 3.4. Clasificación de los transformadores en función de su influencia en la transmisión de las depresiones de voltaje [Guasch 2006].

Grupo	Conexiones	Características
I	YNyn	No se producen cambios entre primario y secundario (comp. homopolar primario = comp. homopolar secundario).
II	YNy Yyn Yy Dd Dz Dzn	Eliminación componente homopolar presente en el primario.
III	Dyn Dy YNd Yd YNz Yzn Yz	Permutación de tensiones de línea y de fase.

b) Transferencia de depresiones de voltaje a través de dos transformadores

Se ha comprobado que al transferir depresiones de voltaje tipos A, B, C y E a través de un transformador, en el secundario del mismo se pueden observar depresiones tipos D, F y G. Por tanto, es necesario analizar qué ocurre cuando estas nuevas tipologías de depresiones de voltaje son transferidas a otros niveles de tensión mediante otros transformadores [Guasch 2006].

La Tabla 3.5 muestra, por ejemplo, el tipo de depresión a que se ve sometida una carga en estrella a tierra, conectada en el secundario de un transformador, cuando en el primario del transformador se producen depresiones tipos D, F ó G.

Tabla 3.5. Transferencia de depresiones a otros niveles de tensión [Guasch 2006].

Transformador		Depresión en el primario del transformador						
Grupo	Conexiones	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
I	YNyn	A	B	C	D	E	F	G
II	Yy Dd Dz	A	D	C	D	G	F	G
III	Dy Yd Yz	A	C	D	C	F	G	F

3.3. La herramienta de simulación EMTP/ATP

El programa de transitorios electromagnéticos EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*), o ATP (*Alternative Transient Program*), es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Inicialmente fue desarrollado junto con otros programas, como alternativa digital del Analizador de Transitorios en Redes (TNA - *Transient Network Analyzer*). Posteriormente, durante un período de quince años, se le ha ampliado considerablemente, resultando actualmente un programa de amplia difusión y utilización en todo el mundo.

El EMTP fue desarrollado a fines de la década del 60 por el Dr. Hermann Dommel, quien cedió el programa a la *Boneville Power Administration* (BPA). Desde entonces, el EMTP ha sido expandido y distribuido bajo la dirección de la BPA. Algunos modelos han sido desarrollados dentro de la misma y otros han sido desarrollados por otras empresas y universidades.

Los estudios que involucran el uso del EMTP/ATP, tienen objetivos encuadrados dentro de dos categorías. Una es el diseño, la cual incluye la coordinación del aislamiento, dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. La otra es la solución de problemas de operación, tales como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema. Una lista parcial de los casos típicos de estudio se indica a continuación [IITREE 2009]:

- Transitorios de maniobra: Estudios determinísticos y probabilísticos. Maniobra de reactores y transformadores. Maniobra de capacitores. Maniobra de interruptores.

- Impulsos atmosféricos: Contorneos inversos. Impulsos inducidos. Ingreso de impulsos atmosféricos a subestaciones.
- Coordinación de aislamiento: Líneas aéreas. Subestaciones. Subestaciones blindadas en SF₆ (GIS). Selección y ubicación de descargadores.
- Solicitaciones torsionales de ejes (por analogía electromecánica): Resonancia subsíncrona. Rechazo de carga.
- Sistemas de alta tensión en corriente continua (HVDC): Sistema de control. Transitorios eléctricos. Armónicos.
- Compensadores estáticos: Sistema de control. Sobretensiones. Armónicos.
- Ferro-resonancia.
- Análisis armónico.
- Arranque de motores.
- Sistemas de control en general.
- Análisis de sistemas desbalanceados.

Esta es solo una lista parcial. Una de las mayores ventajas del EMTP/ATP es su flexibilidad para modelar sistemas, por lo tanto un usuario experimentado puede aplicar el programa a una gran variedad de estudios.

El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los diversos componentes que constituyen el modelo del sistema. Los tipos de componentes que pueden ser utilizados son [IITREE 2009]:

- Resistencias, capacitancias e inductancias concentradas. Estas pueden ser elementos monofásicos, o secciones polifásicas consistentes en matrices R, C y L simétricas.
- Modelos para representar líneas aéreas o cables, ya sea con parámetros distribuidos o con secciones pi. Se disponen de distintos tipos de modelos que permiten considerar las transposiciones, la variación de los parámetros con la frecuencia, etc.
- Inductancias y resistencias no lineales, como por ejemplo inductores no lineales para representar dispositivos con saturación magnética y descargadores de protección.
- Llaves de diversos tipos que permiten representar interruptores, diodos, tiristores, etc.

- Fuentes ideales de corriente y tensión, las cuales pueden ser sinusoidales de cualquier frecuencia, exponenciales, o cualquier otra especial definida por el usuario.
- Máquinas síncronas, siendo posible modelar la parte eléctrica, mecánica y también sus dispositivos de control.
- Modelo de máquina universal que permite representar máquinas síncronas, de inducción y de continua.
- Sistemas de control. Las señales eléctricas medidas pueden ser transferidas a un programa auxiliar denominado TACS (*Transient Analysis of Control System*), donde se emula una computadora analógica y se calculan las variables de control que son retornadas a la red eléctrica principal. También se dispone de otro programa auxiliar denominado MODELS que cumple similares funciones.

El dimensionamiento del programa es variable de tal manera que, de ser necesario, es posible ajustarlo a las necesidades de cada tipo de problema.

Las entradas del programa consisten en el intervalo de tiempo para el cálculo, el tiempo máximo de simulación, las variables de salida deseadas y los datos del modelo. El modelo puede armarse con un programa adicional denominado ATPDraw, el cual actúa como un preprocesador de los datos, permitiendo ensamblar los distintos componentes del modelo en forma gráfica.

Los datos de entrada requeridos por el EMTP/ATP son diferentes y superiores en cantidad que los necesarios para otros programas tales como flujo de carga, cortocircuito y estabilidad. Esto se debe a que el EMTP/ATP utiliza modelos más detallados que dichos programas, para poder simular en forma precisa los transitorios de alta frecuencia que ocurren durante cortos períodos de tiempo. Para facilitar la entrada de datos, existen programas auxiliares que ayudan al usuario en la entrada de los datos de líneas, cables, transformadores, etc.

Como resultado de la simulación, el EMTP/ATP provee las tensiones de barra, corrientes de ramas, energía, variables de máquina, variables de control, etc. Estos valores pueden ser graficados y/o impresos como función del tiempo y almacenados en archivos para su posterior tratamiento. También se dispone de la impresión de los valores máximos y mínimos de las variables y del tiempo al cual ocurren.

Una solución de estado estacionario es realizada antes de la simulación transitoria para definir las condiciones iniciales, y esto puede ser también una útil herramienta de estudio en sí misma. Todas las tensiones, corrientes y potencias de estado estacionario son determinadas para todos los nodos de la red. También se dispone de una opción de barrido en frecuencia de las fuentes que permite realizar estudios de armónicos en el sistema eléctrico.

Dada la magnitud del programa, hasta hace poco tiempo solo era posible correrlo sobre grandes computadoras, debido a los requerimientos de CPU y memoria necesarios. Esta es la razón por la cual inicialmente solo eran usuarios del mismo las grandes empresas y universidades que tuvieran acceso a centros de cómputo.

En la actualidad existe una versión del EMTP/ATP para computadoras personales. Este cambio en el soporte computacional, lo ha hecho accesible a un mayor número de usuarios convirtiéndolo en uno de los programas de análisis de transitorios electromagnéticos más ampliamente usado en el mundo.

El EMTP/ATP no es un programa comercial, su distribución es gratuita. Las sucesivas versiones del programa y toda la información relacionada con el mismo (manuales y diversas publicaciones) es recibida y distribuida por grupos formales de usuarios alrededor del mundo [IITREE 2009].

CAPÍTULO 4

Simulación de depresiones de voltaje y sus efectos en la máquina de inducción y su control de velocidad

4.1. Introducción

En este Capítulo se procede a la simulación de las diferentes tipologías de depresiones de voltaje y al estudio de sus efectos en la velocidad, el par electromecánico y las corrientes del estator del motor de inducción trifásico, así como en su control de velocidad basado en un convertidor de frecuencia variable.

4.2. Simulación de depresiones de voltaje

En este apartado se simulan los diferentes tipos de depresiones de voltaje. Para esto, se consideraron dos distintas opciones, la primera fue simular una falla en un punto del sistema eléctrico que diera lugar a una depresión de voltaje en la carga. La Figura 4.1 muestra la propuesta del sistema eléctrico simulado compuesto por una fuente de voltaje (V), transformadores ($TRO 1$, $TRO 2$), una máquina de inducción (IM) e interruptores con conexión a tierra para simular las fallas.

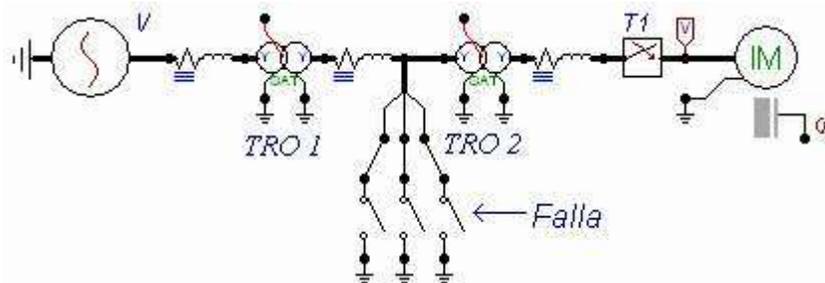


Figura 4.1. Diagrama del sistema eléctrico implementado en ATPDraw para simular fallas que dan origen a depresiones de voltaje.

La segunda opción, que fue finalmente la elegida por simplicidad y porque permite caracterizar en mayor grado las distintas tipologías de depresiones de voltaje, fue crear una “fuente de sags” de acuerdo con sus ecuaciones temporales mostradas en la Tabla 3.2.

En las Figuras 4.2 - 4.8 se muestran los resultados de simular todos los tipos de depresiones de voltaje. Los parámetros propuestos fueron $V = 127\text{Volts}$, $f = 60\text{Hz}$, una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una duración $\Delta t = 6$ ciclos.

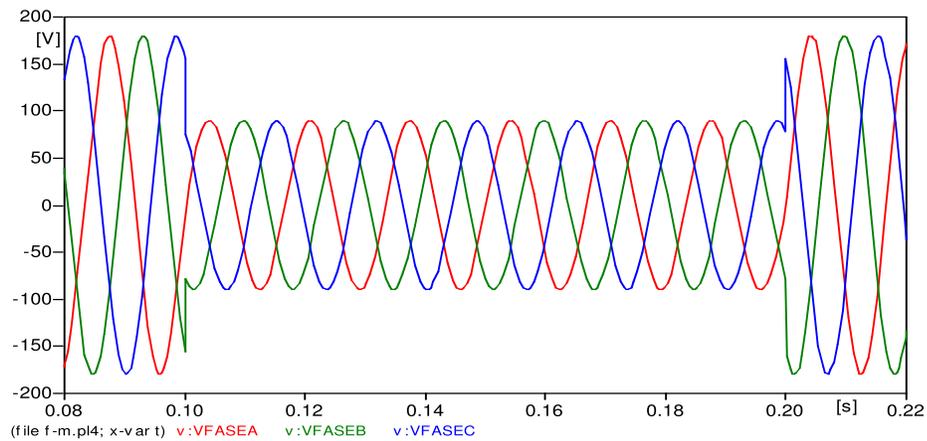


Figura 4.2. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo A obtenida en simulación.

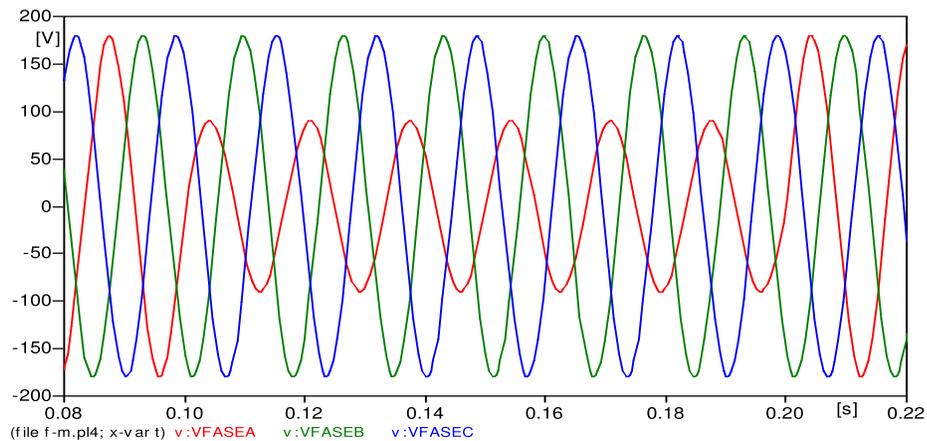


Figura 4.3. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo B obtenida en simulación.

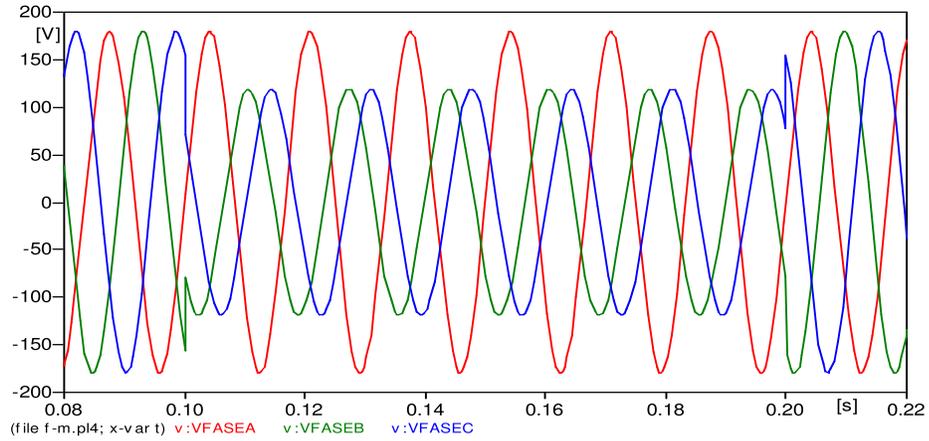


Figura 4.4. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo C obtenida en simulación.

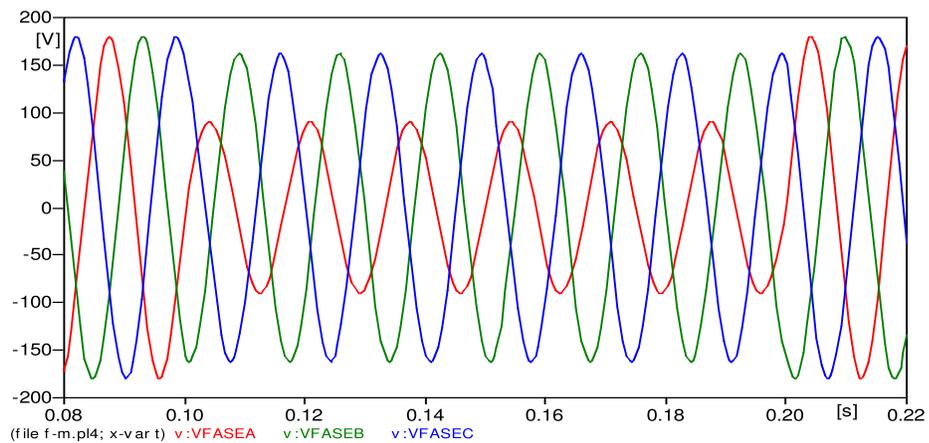


Figura 4.5. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo D obtenida en simulación.

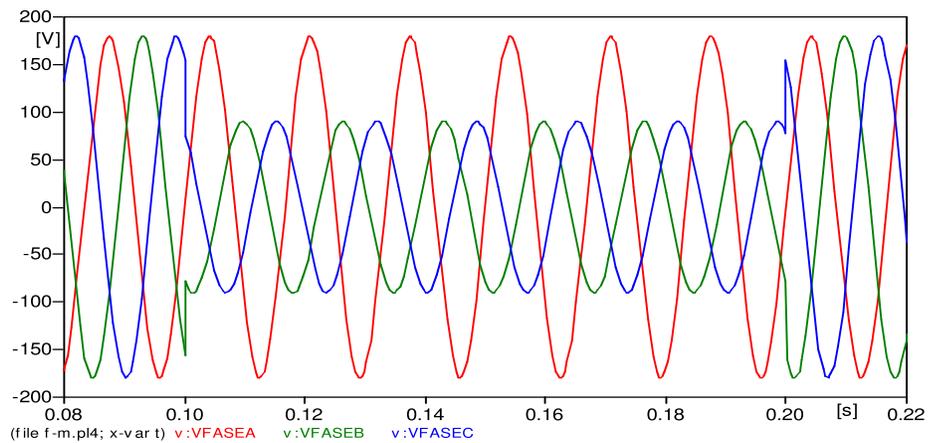


Figura 4.6. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo E obtenida en simulación.

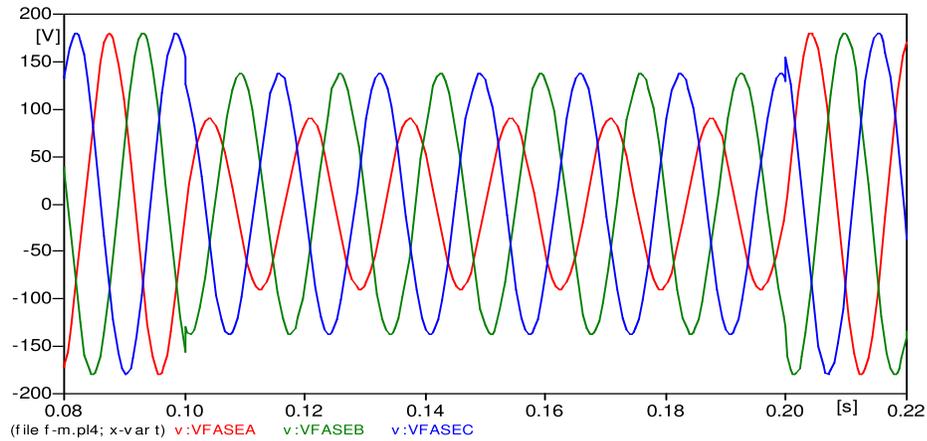


Figura 4.7. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo F obtenida en simulación.

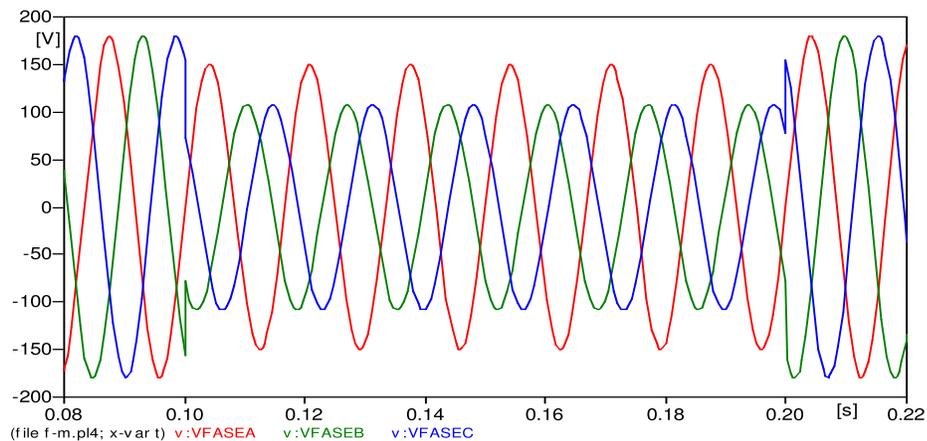


Figura 4.8. Representación temporal de una depresión de voltaje tipo G obtenida en simulación.

Se puede observar, en todos los casos expuestos, que las representaciones temporales de los voltajes trifásicos corresponden en magnitud y desfase de acuerdo a las ecuaciones mostradas en la Tabla 3.2 para los parámetros propuestos y también presentan el mismo comportamiento si son comparadas con las representaciones temporales mostradas en la Tabla 3.3 para todos los tipos de *sags*.

4.3. Características del sistema eléctrico estudiado

El sistema eléctrico estudiado está conformado por un motor de inducción (IM), cuyos parámetros se especificarán más adelante, alimentado por una fuente trifásica representativa del voltaje en el secundario de un transformador (VT_{Sec}) y otra fuente trifásica

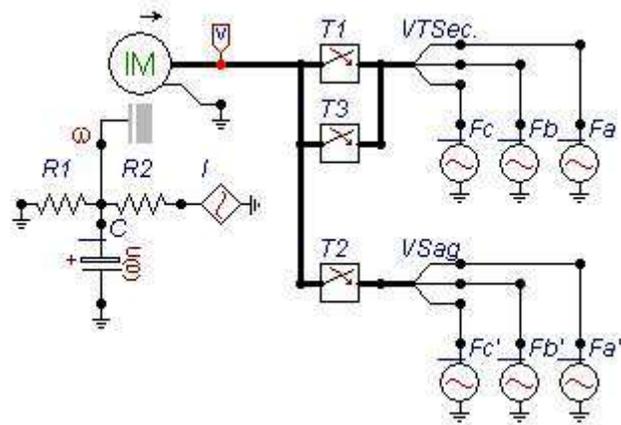


Figura 4.9. Diagrama del sistema eléctrico estudiado implementado en ATPDraw.

representativa de los voltajes característicos de las diferentes topologías de depresiones de voltaje ($VSag$).

El intervalo de tiempo en el que ocurre la depresión de voltaje está acotado desde un instante $t = ti$ hasta un instante $t = tf$, al inicio de este intervalo de tiempo el interruptor $T1$, que permanecía cerrado desde $t = 0$ y que permitía la alimentación de la máquina de inducción con $VTSec$, ahora y hasta el final de la simulación permanecerá abierto; el interruptor $T2$, que permanecía abierto desde $t = 0$, ahora permanecerá cerrado durante la depresión de voltaje, es decir, desde $t = ti$ hasta $t = tf$ y el interruptor $T3$, que también permanecía abierto desde $t = 0$, ahora y hasta el final de la simulación permanecerá cerrado permitiendo volver a los voltajes de alimentación originales $VTSec$.

La Figura 4.9 muestra el esquema implementado en ATPDraw del sistema eléctrico simulado.

La parte mecánica de la máquina de inducción requiere que el usuario la represente como una red eléctrica equivalente con elementos R , L y C concentrados, misma que se resuelve como si fuera parte de la red eléctrica completa. El par electromagnético de la máquina de inducción aparece como una fuente de corriente en esta red equivalente.

La Tabla 4.1 describe la equivalencia entre cantidades mecánicas y eléctricas. Para cada masa en el sistema rotante, se crea un nodo en la red eléctrica equivalente, con un capacitor a tierra de valor J para el momento de inercia. Si hay amortiguamiento proporcional a la velocidad de esta masa, se conecta una resistencia de conductancia D en

paralelo con este capacitor. Si hay par mecánico actuante sobre esta masa (cupla de una turbina en generadores, carga mecánica en motores), se conecta una fuente de corriente al nodo (positiva para par motor, negativa para par de carga). Si hay dos o más masas, se emplean inductores para conectar los capacitores a tierra adyacentes, con su inductancia igual a $1/K$ (recíproca del coeficiente de rigidez del eje que acopla ambas masas). Si hay amortiguamiento asociado con este acoplamiento de eje, entonces se conecta un resistor en paralelo con el inductor, de conductancia D . El par electromagnético es sumado automáticamente en el nodo apropiado por el ATP como una fuente de corriente.

Tabla 4.1. Equivalencia entre cantidades mecánicas y eléctricas.

Mecánica	Eléctrica
T Cupla actuante sobre una masa [Nm]	i Corriente en el nodo [A]
ω Velocidad angular [rad/s]	v Tensión de nodo [V]
θ Posición angular de la masa [rad]	$\int v dt$ [Vs]
J Momento de inercia [Kg m^2]	C Capacitancia a tierra [F]
K Coeficiente de rigidez [Nm/rad]	$1/L$ Recíproca de inductancia [1/H]
D Coeficiente de amortiguamiento [Nms/rad]	$1/R$ Conductancia [S]

En la Figura 4.10 se muestran las equivalencias entre los componentes mecánicos y eléctricos. Con estos componentes es posible modelar trenes de engranajes, modelos de parámetros distribuidos de rotores, etc.

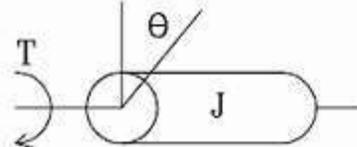
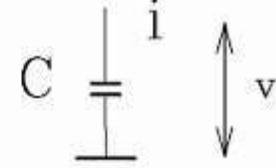
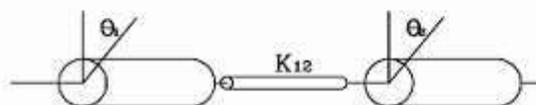
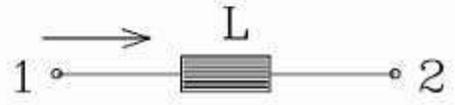
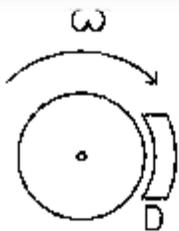
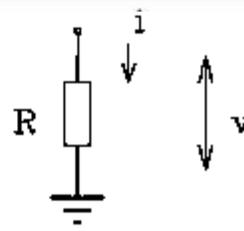
Mecánico	Eléctrico
 $T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = J \frac{d\omega}{dt}$	 $i = C \frac{dv}{dt}$
 $T_{12} = K_{12}(\theta_1 - \theta_2) = K_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt$	 $i_{12} = \frac{1}{L} \int (v_1 - v_2) dt$
 $T = D \cdot \omega$	 $i = \frac{1}{R} v$

Figura 4.10. Equivalencias entre componentes mecánicos y eléctricos.

4.4. Casos de estudio

En esta sección se simulará el comportamiento del motor de inducción y su control de velocidad cuando se encuentran sometidos a las diferentes tipologías de depresiones de voltaje. Algunos de los parámetros que se estudiarán son la velocidad, el par y las corrientes del estator.

En este trabajo se analizarán con mayor atención las depresiones de voltaje desbalanceadas tipo C y D consideradas estadísticamente las más comunes en los sistemas eléctricos y que ocurren principalmente debido a fallas monofásicas a tierra. Además también se analizarán los efectos producidos en dicha máquina por las depresiones de voltaje tipo A por ser la única tipología de características balanceadas.

4.4.1. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción típica

La Tabla 4.2 muestra los parámetros de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla del sistema eléctrico a simular [Prikler *et al.* 2002].

Tabla 4.2. Parámetros de la máquina de inducción típica.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Potencia nominal	P_n	3Hp
Voltaje (línea a línea)	V	220V
Frecuencia	f	60Hz
Pares de polos	P	2
Resistencia del estator	R_s	0.435 Ω
Inductancia del estator	L_{ls}	4E-3H
Resistencia del rotor	$R_{r'}$	0.816 Ω
Inductancia del rotor	$L_{lr'}$	2E-3H
Inductancia mutua	L_m	69.31E-3H

La Tabla 4.3 muestra los parámetros del sistema mecánico acoplado a la máquina de inducción del sistema eléctrico.

Tabla 4.3. Parámetros del sistema mecánico. Máquina de inducción típica.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Coefficiente de amortiguamiento	D	1E-6 Nms/Rad
Momento de inercia	J	0.089Kgm ²
Velocidad angular inicial	ω	188.496 Rad/Seg
Par de carga	T	-11.9Nm

La Tabla 4.4 muestra la equivalencia de los parámetros del sistema mecánico convertidos a magnitudes eléctricas de acuerdo a la Tabla 4.1 y a la Figura 4.10.

Tabla 4.4. Parámetros eléctricos equivalentes al sistema mecánico. Máquina de inducción típica.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Resistencia	R_1	1M Ω
Capacitancia	C	0.089F
Voltaje	U	188.496V
Corriente	I	-11.9A

a) Efecto en la velocidad de la máquina de inducción al variar la tipología de la depresión de voltaje y su profundidad, manteniendo constante su duración

La Figura 4.11 muestra el efecto de las diferentes tipologías de depresiones de voltaje en la velocidad de la máquina de inducción, se observa que cuando se presenta el *sag* tipo A la velocidad de la máquina de inducción disminuye en mayor grado.

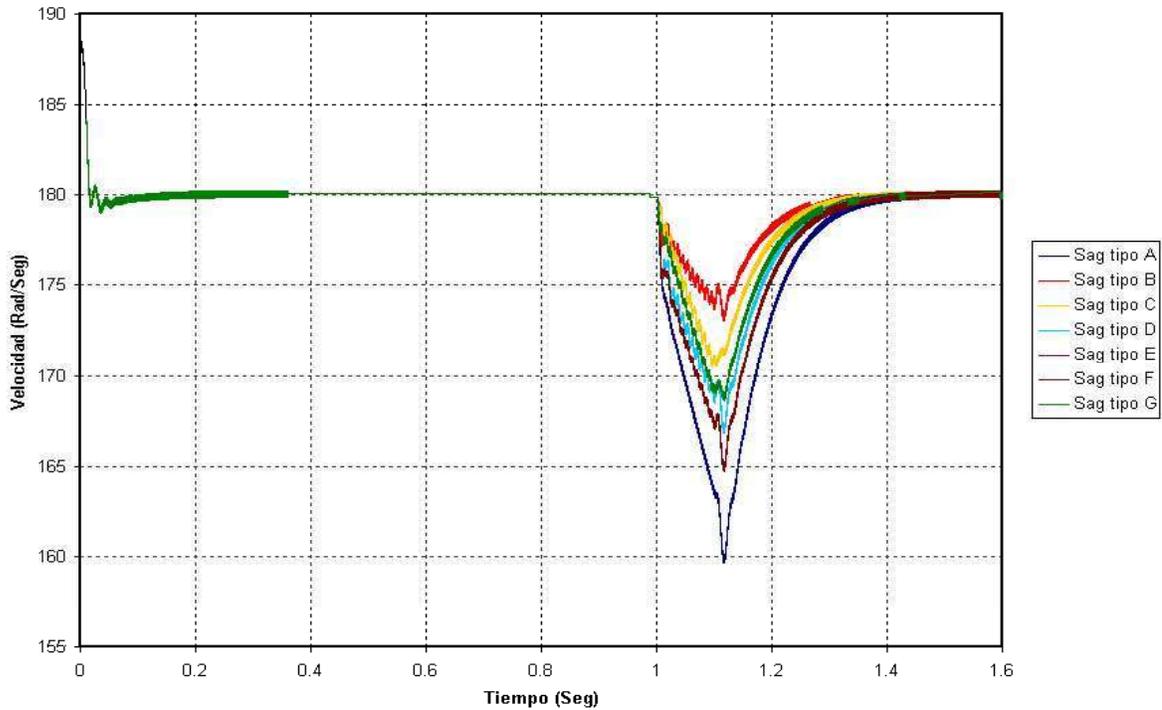


Figura 4.11. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.2$ y $\Delta t = 6$ ciclos. Máquina de inducción típica.

En la Figura 4.12 se muestra el efecto de los distintos tipos de depresiones de voltaje, pero ahora con una profundidad menor. Como se observa, en este caso se obtiene una menor disminución de la velocidad.

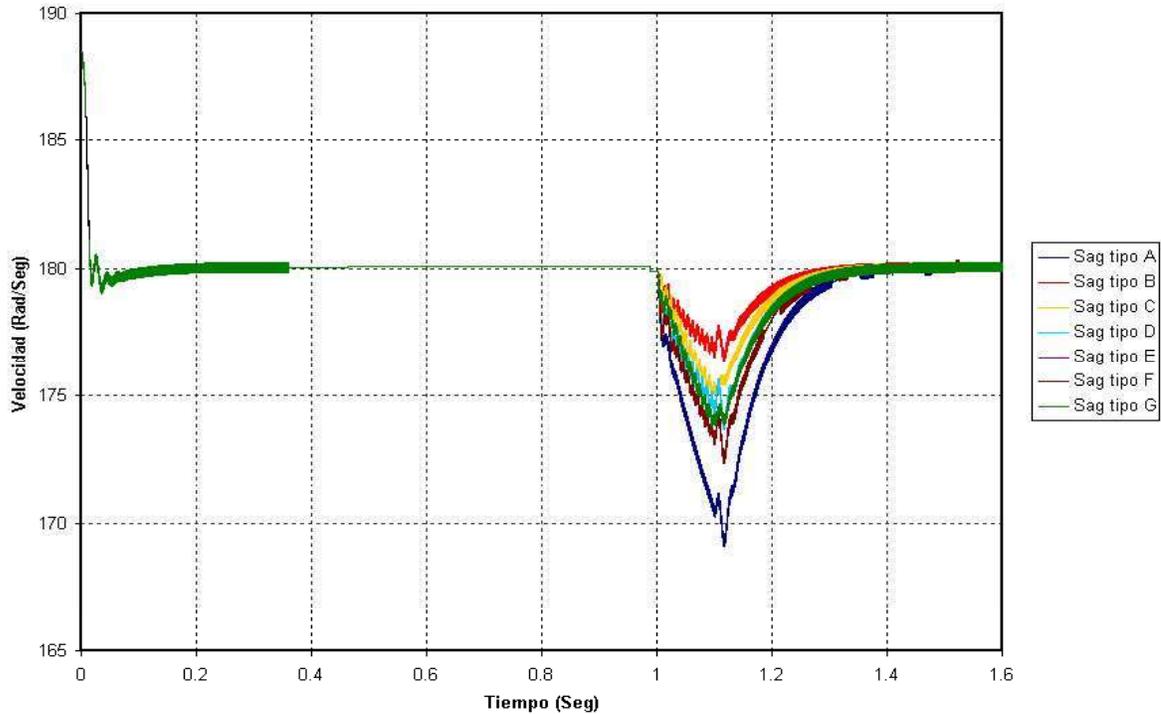


Figura 4.12. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 6$ ciclos. Máquina de inducción típica.

b) Efecto en la velocidad de la máquina de inducción al variar la tipología de la depresión de voltaje y su duración, manteniendo constante su profundidad

La Figura 4.13 se puede comparar con la Figura 4.12 ya que ambas fueron obtenidas para el mismo valor de profundidad y muestran el efecto de la duración de las diferentes tipologías de depresiones de voltaje en la velocidad de la máquina de inducción. Como se esperaba, se observa que cuando se incrementa la duración de la depresión de voltaje, la velocidad de la máquina de inducción disminuye en mayor medida.

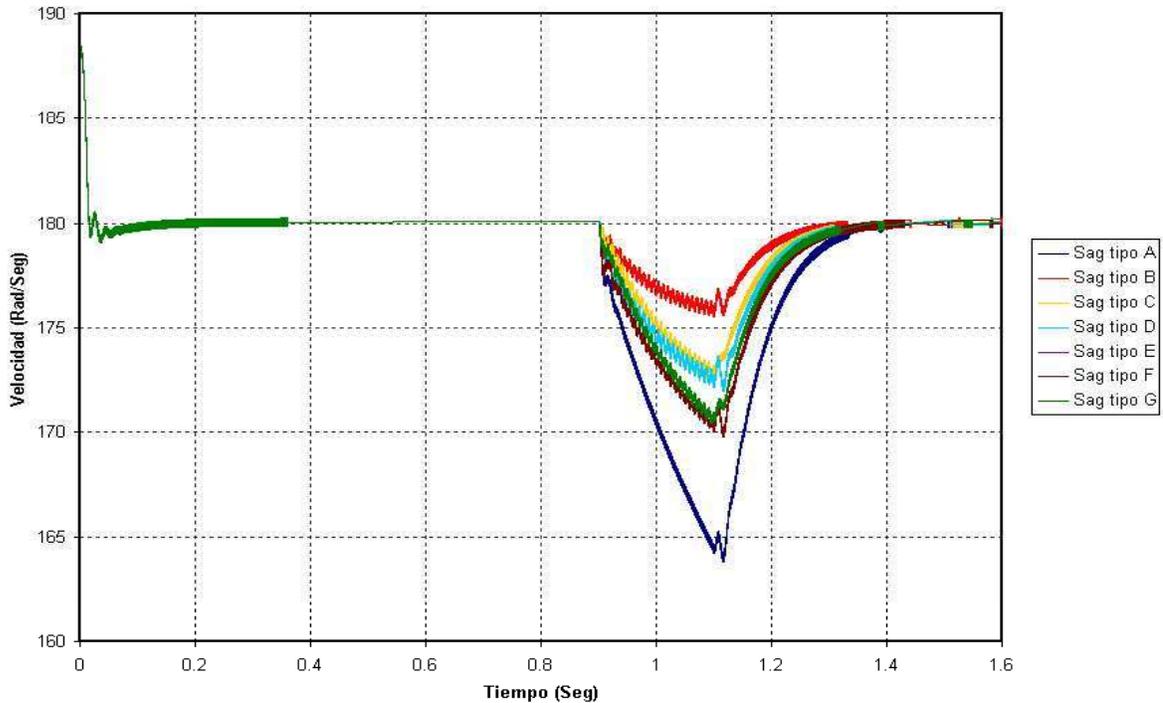


Figura 4.13. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 12$ ciclos. Máquina de inducción típica.

c) Efecto de las depresiones de voltaje tipos A, C y D en las corrientes del estator de la máquina de inducción

Las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestran las representaciones temporales de las corrientes del estator de la máquina de inducción cuando se presentan las tipologías A, C y D, respectivamente, de depresiones de voltaje. En ellas se observa que para los tipos A y D, las mayores sobrecorrientes se presentan justo al inicio y al final de la depresión de voltaje y para la tipología C existen principalmente sobrecorrientes importantes en las fases a y c durante todo el tiempo en que ocurre la depresión de voltaje.

En esta subsección se propuso una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una duración $\Delta t = 6$ ciclos para las diferentes tipologías de depresiones de voltaje.

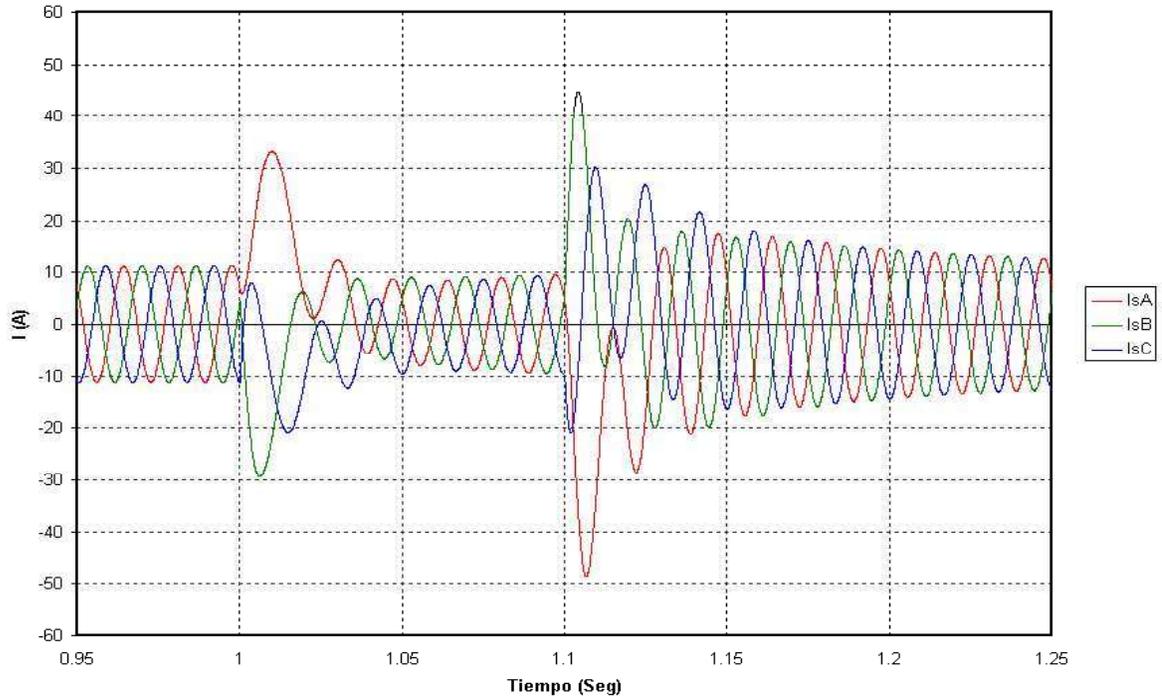


Figura 4.14. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción típica.

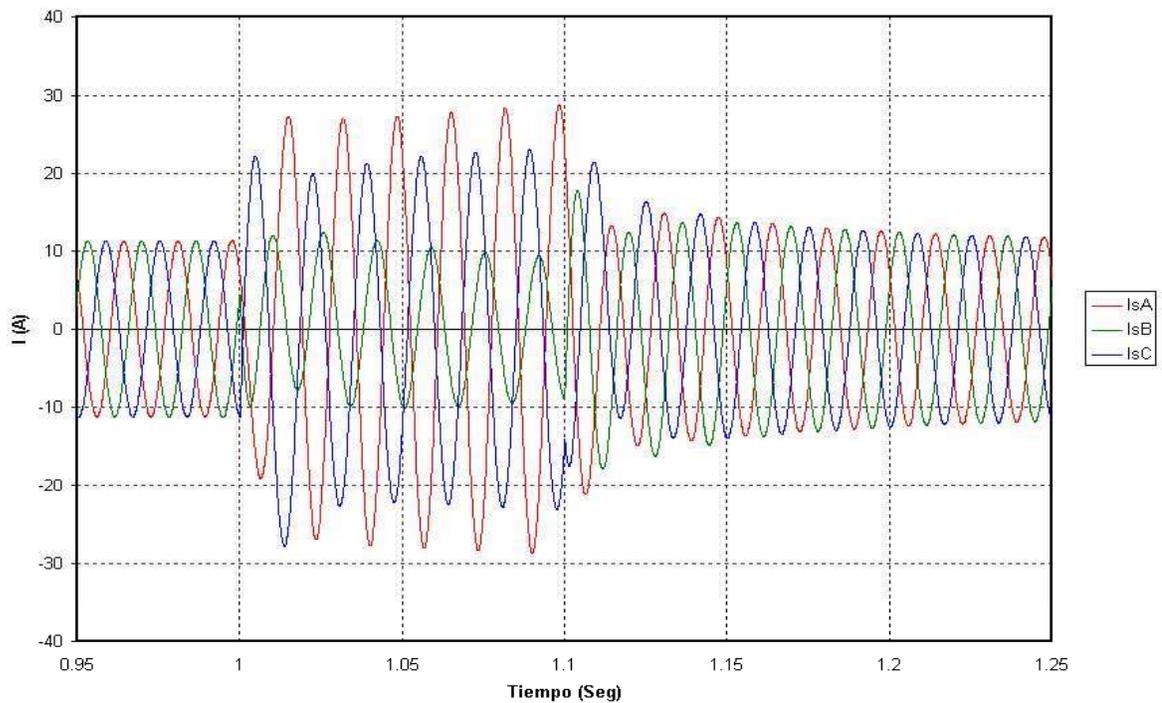


Figura 4.15. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción típica.

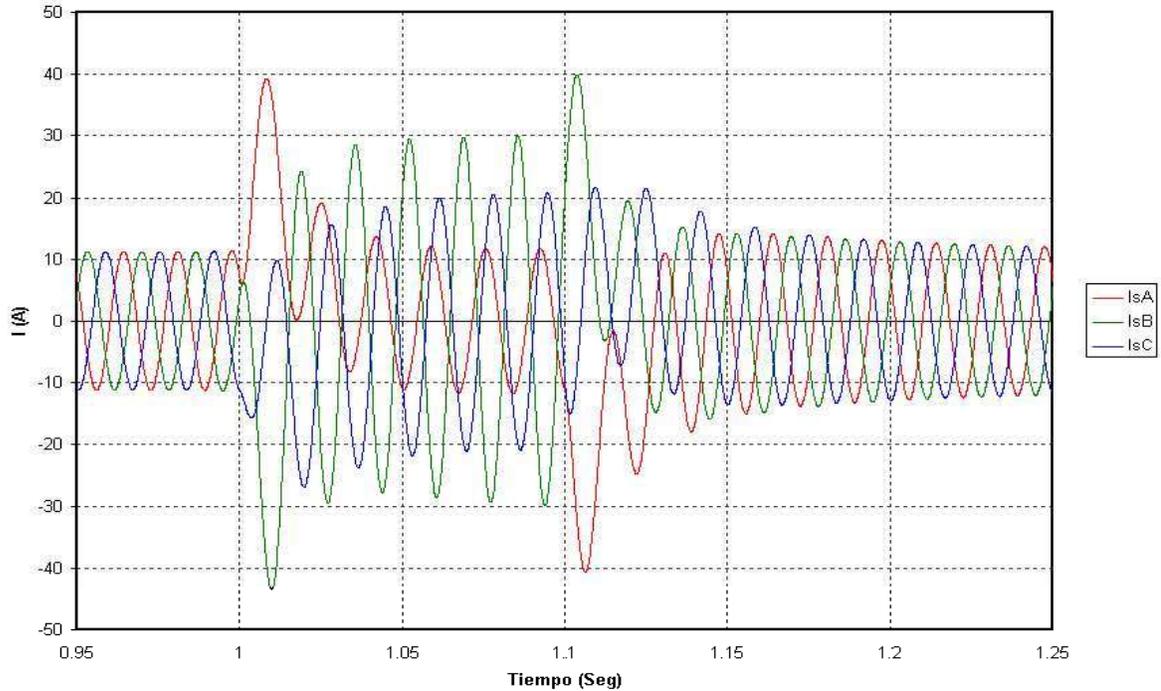


Figura 4.16. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción típica.

d) Efecto de las depresiones de voltaje tipos A, C y D en el par electromecánico de la máquina de inducción

Las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 muestran las representaciones temporales del par electromecánico de la máquina de inducción cuando se presentan las tipologías A, C y D, respectivamente, de depresiones de voltaje. En ellas se observa que en todos los casos existen esfuerzos electromecánicos instantáneos importantes durante todo el tiempo en que ocurre la depresión de voltaje y que derivan en las sobrecorrientes estudiadas en la sección anterior y en un posible daño del equipo si se tratara de un sistema real.

En esta subsección también se propuso una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una duración $\Delta t = 6$ ciclos para las diferentes tipologías de depresiones de voltaje.

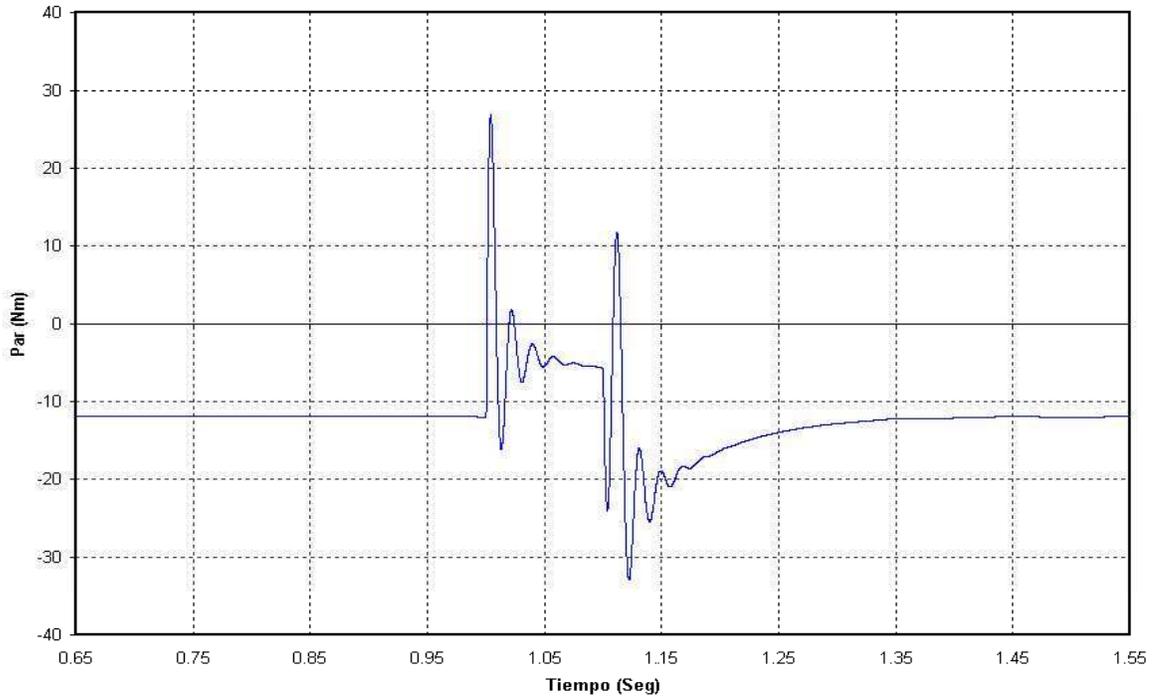


Figura 4.17. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción típica.

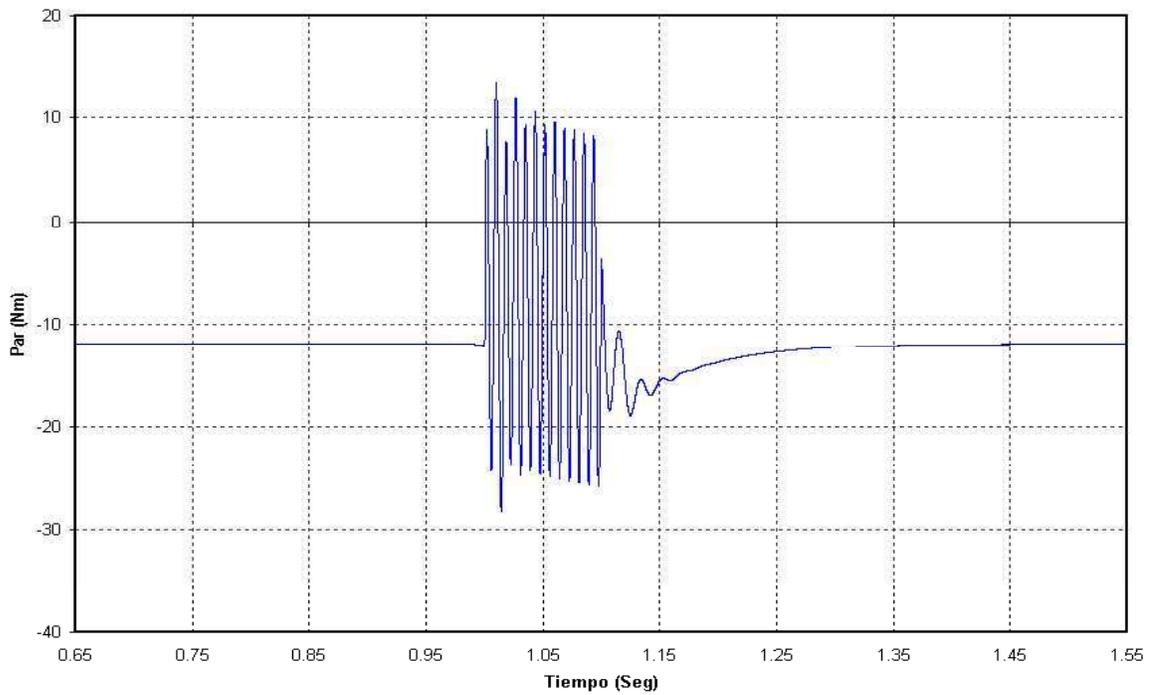


Figura 4.18. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción típica.

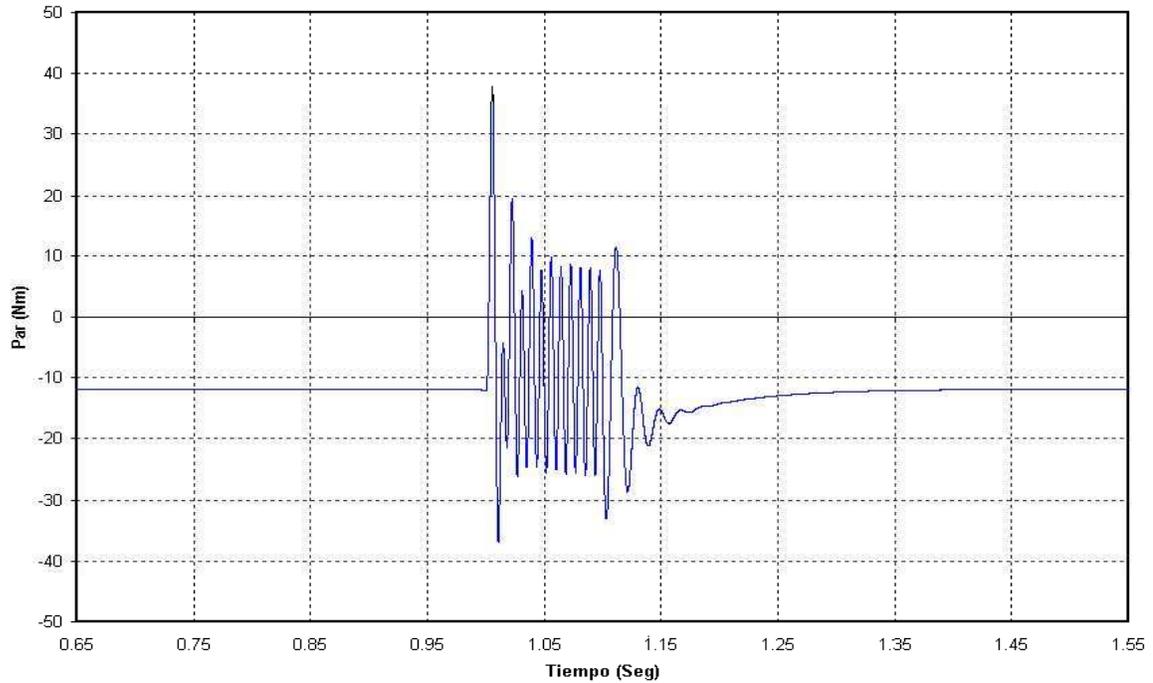


Figura 4.19. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción típica.

4.4.2. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción real

La Tabla 4.5 muestra los parámetros de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla con la que se cuenta para este proyecto de Tesis, que corresponden a una máquina de inducción del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica [Ábrego 2005].

Tabla 4.5. Parámetros de la máquina de inducción real.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Potencia nominal	P_n	2000W
Voltaje (línea a línea)	V	220V
Frecuencia	f	60Hz
Pares de polos	P	2
Resistencia del estator	R_s	0.8 Ω
Inductancia del estator	L_{ls}	3.1266E-3H
Resistencia del rotor	R_r'	0.1978 Ω
Inductancia del rotor	L_{lr}'	2.9162E-3H
Inductancia mutua	L_m	67.7267E-3H

La Tabla 4.6 muestra los parámetros del sistema mecánico acoplado a la máquina de inducción del sistema eléctrico.

Tabla 4.6. Parámetros del sistema mecánico. Máquina de inducción real.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Coeficiente de amortiguamiento	D	3.285E-3 Nms/Rad
Momento de inercia	J	0.1651Kgm ²
Velocidad angular inicial	ω	186.5Rad/Seg
Par de carga	T	-10.61Nm

La Tabla 4.7 muestra la equivalencia de los parámetros del sistema mecánico convertidos a magnitudes eléctricas de acuerdo a la Tabla 4.1 y a la Figura 4.10.

Tabla 4.7. Parámetros eléctricos equivalentes al sistema mecánico. Máquina de inducción real.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Resistencia	$R1$	304.414 Ω
Capacitancia	C	0.1651F
Voltaje	U	186.5V
Corriente	I	-10.61A

a) Efecto en la velocidad de la máquina de inducción al variar la tipología de la depresión de voltaje y su profundidad, manteniendo constante su duración

Las Figuras 4.20 y 4.21 muestran el efecto de la profundidad de las diferentes tipologías de depresiones de voltaje en la velocidad de la máquina de inducción, y como se estudió anteriormente, se observa que a un valor de profundidad menor la velocidad de la máquina de inducción disminuye en mayor grado. También se observa, al principio, un pequeño transitorio debido a la diferencia entre la velocidad de inicio propuesta y la real desarrollada por la máquina.

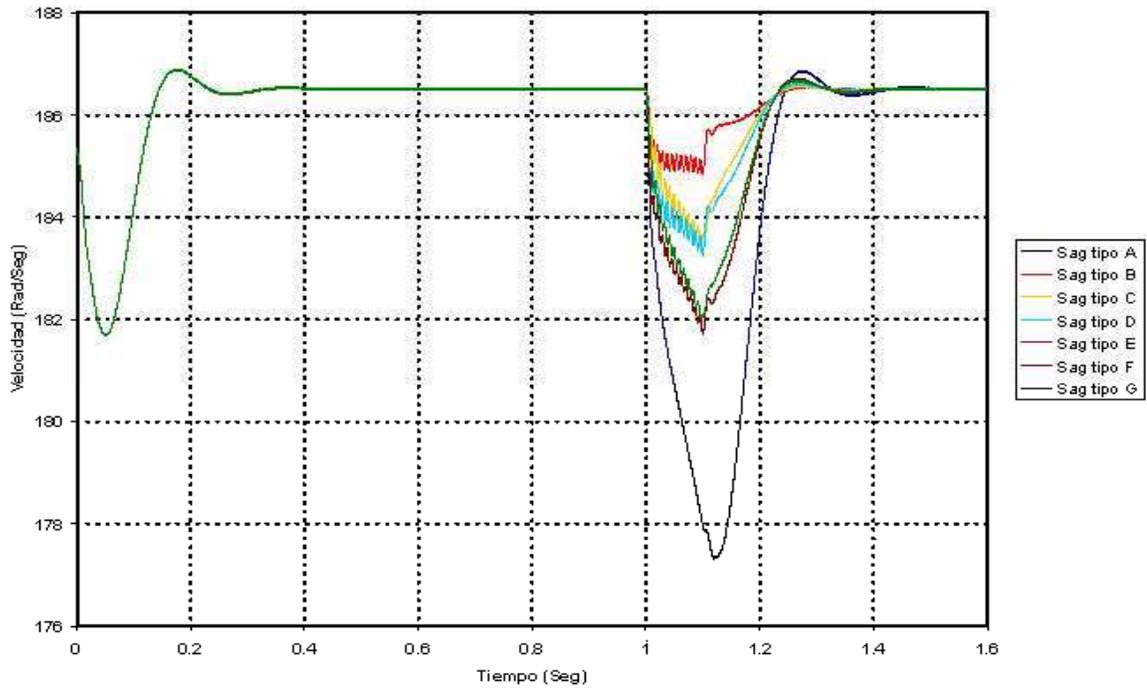


Figura 4.20. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.2$ y $\Delta t = 6$ ciclos. Máquina de inducción real.

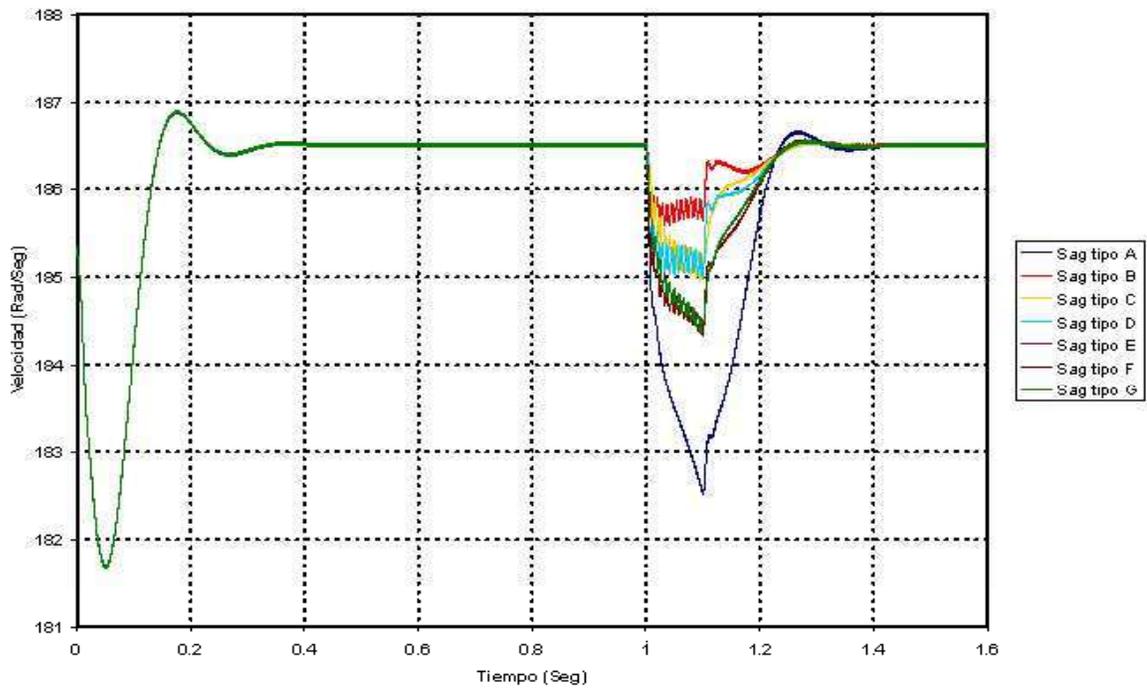


Figura 4.21. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 6$ ciclos. Máquina de inducción real.

b) Efecto en la velocidad de la máquina de inducción al variar la tipología de la depresión de voltaje y su duración, manteniendo constante su profundidad

La Figura 4.22 se puede comparar con la Figura 4.21 ya que ambas fueron obtenidas para el mismo valor de profundidad y muestran el efecto de la duración de las diferentes tipologías de depresiones de voltaje en la velocidad de la máquina de inducción, y como se estudió anteriormente, se observa que cuando se incrementa la duración de la depresión de voltaje, la velocidad de la máquina de inducción disminuye en mayor medida.

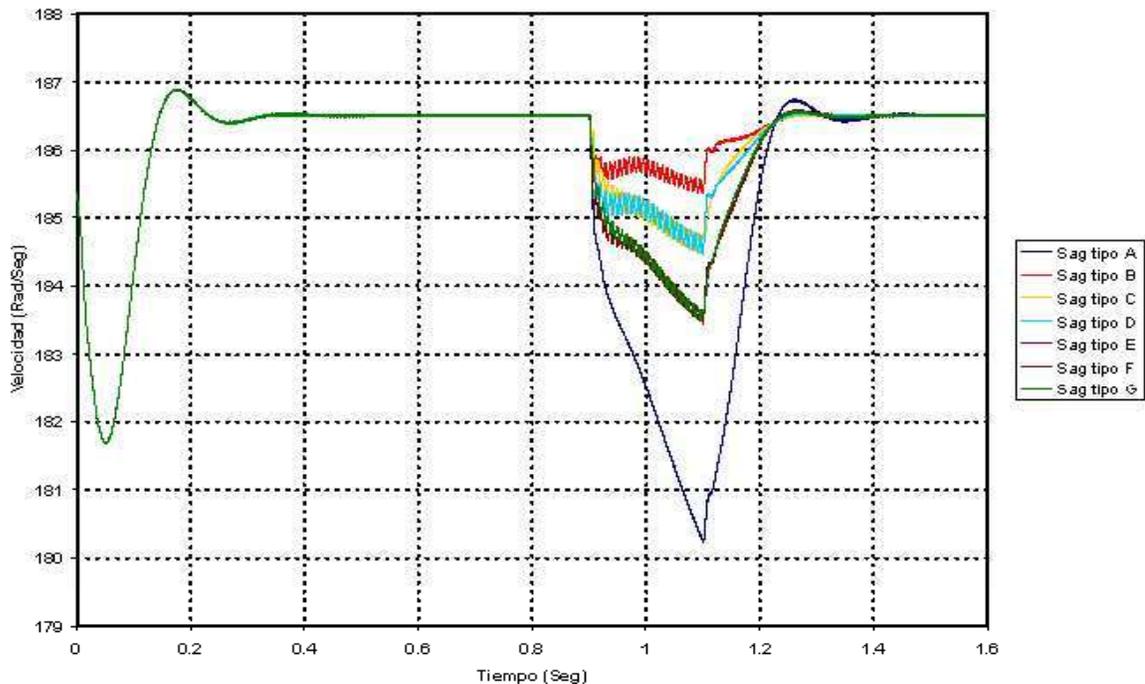


Figura 4.22. Efecto en la velocidad de la máquina de inducción con las diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.5$ y $\Delta t = 12$ ciclos. Máquina de inducción real.

c) Efecto de las depresiones de voltaje tipos A, C y D en las corrientes del estator de la máquina de inducción

Las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25 muestran las representaciones temporales de las corrientes del estator de la máquina de inducción cuando se presentan las tipologías A, C y D, respectivamente, de depresiones de voltaje. En ellas se observa que para los tipos A y D, las mayores sobrecorrientes se presentan justo al inicio y al final de la depresión de voltaje y para la tipología C existen principalmente sobrecorrientes importantes en las fases a y c

durante todo el tiempo en que ocurre la depresión de voltaje. Estos mismos efectos se mostraron anteriormente en el apartado 4.4.1.

También en este caso se simuló una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una duración $\Delta t = 6$ ciclos para las diferentes tipologías de depresiones de voltaje.

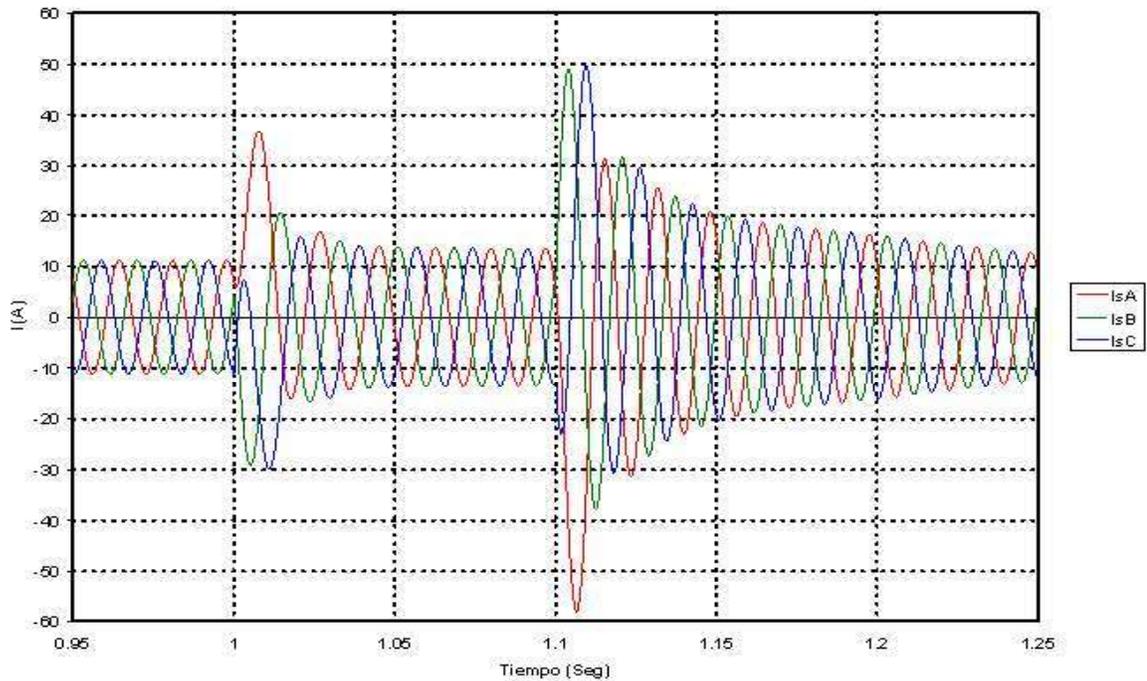


Figura 4.23. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción real.

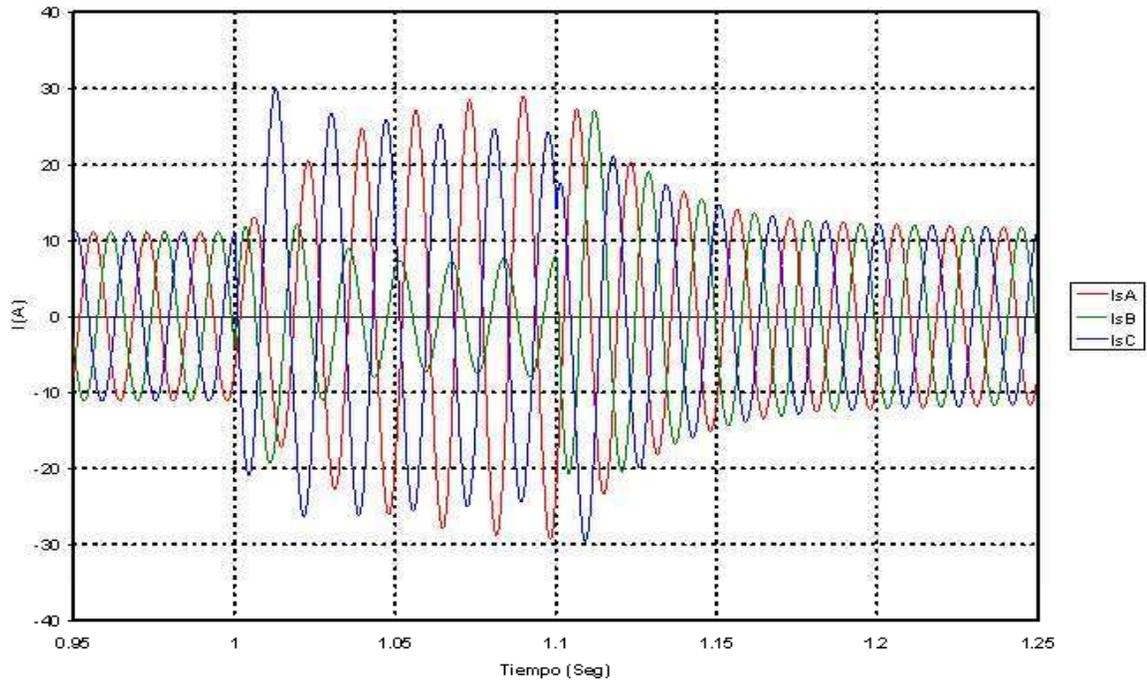


Figura 4.24. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción real.

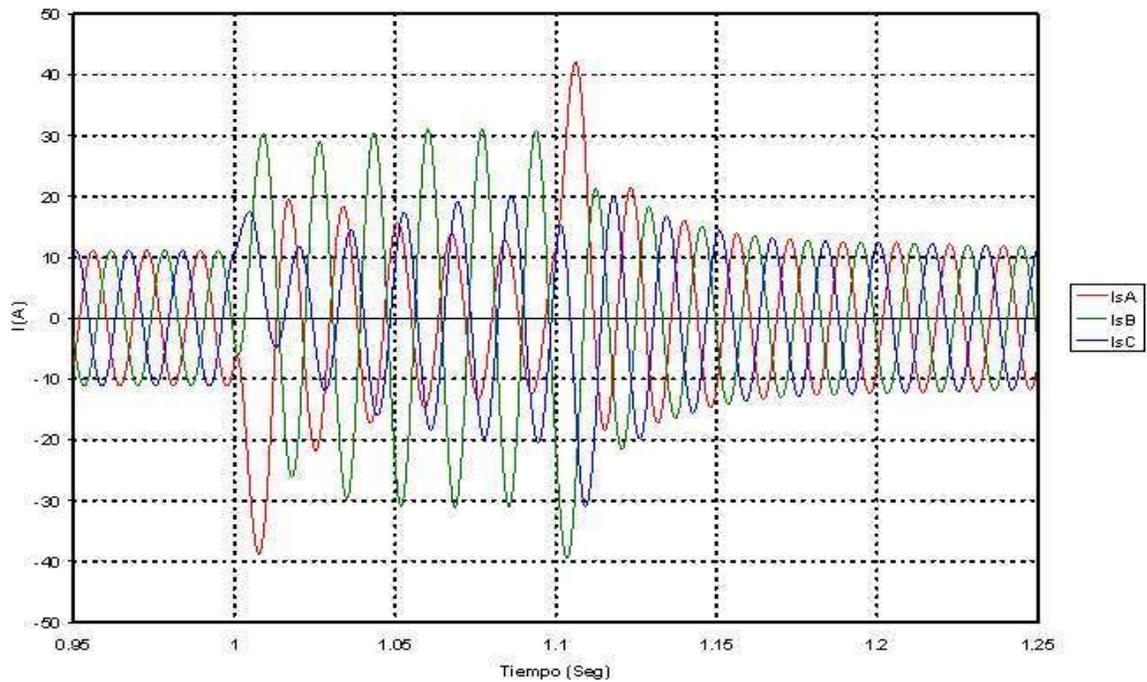


Figura 4.25. Representación temporal de las corrientes del estator en la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción real.

d) Efecto de las depresiones de voltaje tipos A, C y D en el par electromecánico de la máquina de inducción

Las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 muestran las representaciones temporales del par electromecánico de la máquina de inducción cuando se presentan las tipologías A, C y D, respectivamente, de depresiones de voltaje. De manera similar al caso de la máquina de inducción típica, se observa que se presentan importantes esfuerzos electromecánicos instantáneos durante el tiempo en el que ocurre la depresión de voltaje y por consecuencia se presentan sobrecorrientes que potencialmente ocasionarían un daño del equipo. Estos mismos efectos se mostraron anteriormente en el apartado 4.4.1.

De la misma forma se simuló una profundidad del 50% ($h = 0.5$) y una duración $\Delta t = 6$ ciclos para las diferentes tipologías de depresiones de voltaje.

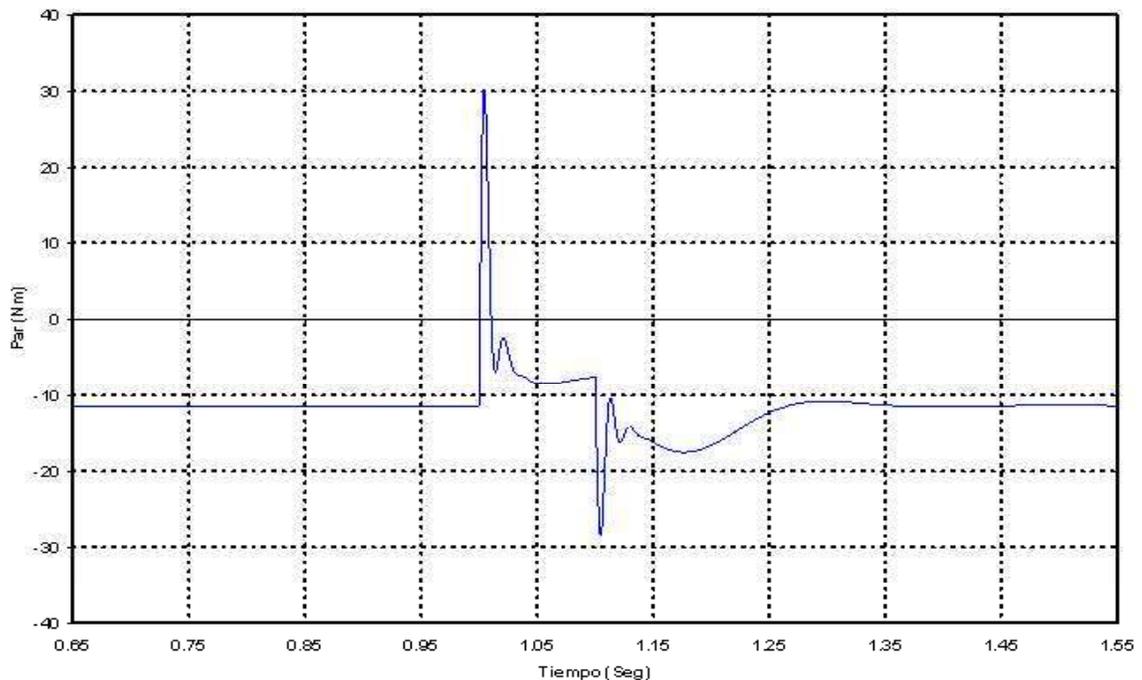


Figura 4.26. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo A. Máquina de inducción real.

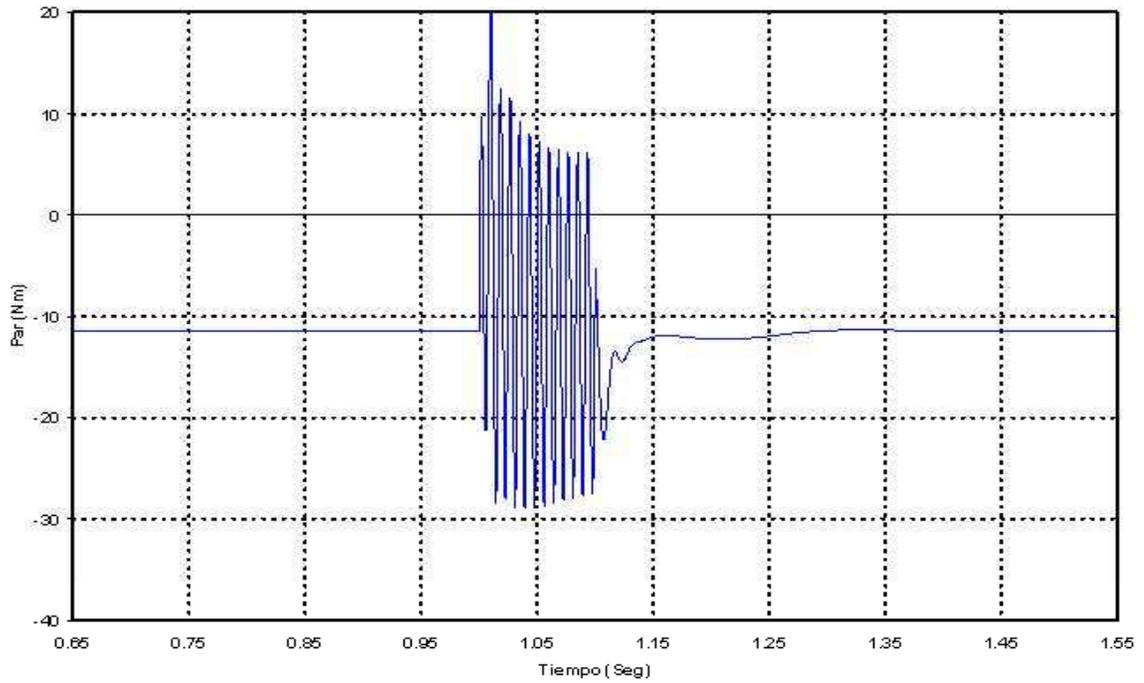


Figura 4.27. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo C. Máquina de inducción real.

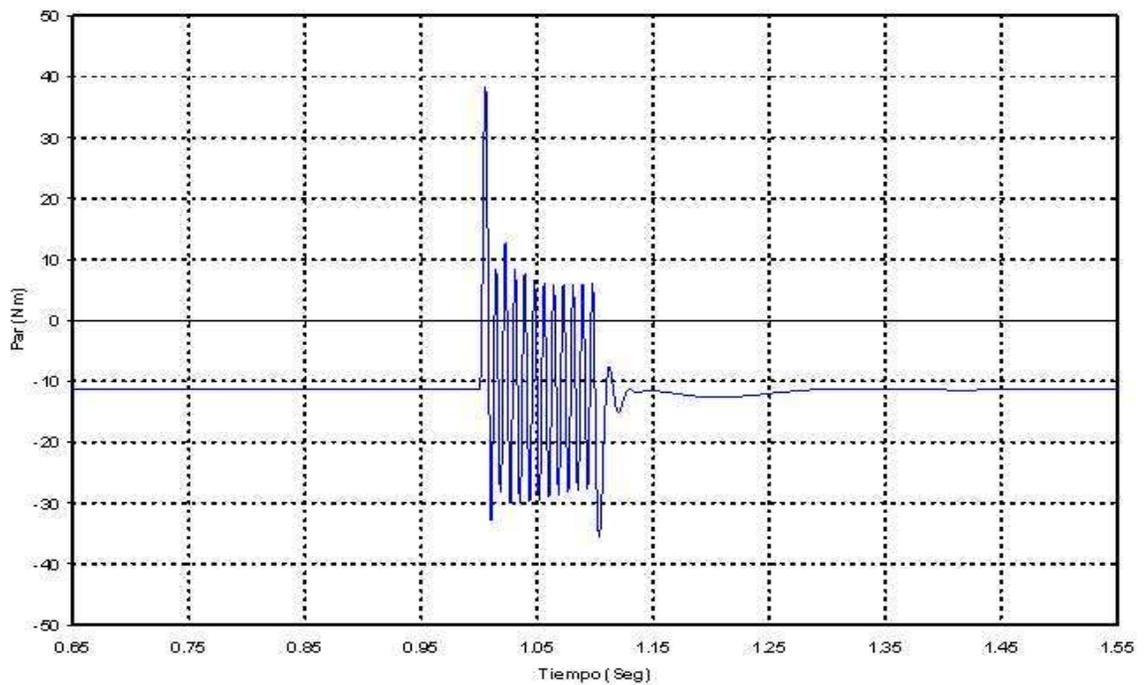


Figura 4.28. Representación temporal del par electromecánico de la máquina de inducción durante una depresión de voltaje tipo D. Máquina de inducción real.

4.4.3. Simulación y estudio de los efectos de depresiones de voltaje en una máquina de inducción real con un sistema rectificador-inversor para su control de velocidad

La Figura 4.29 muestra el sistema eléctrico estudiado similar al de la Figura 4.9 pero ahora se han adicionado, para el control de velocidad del motor de inducción, el sistema rectificador-inversor y el controlador de conmutación senoidal PWM con esquema V/Hz.

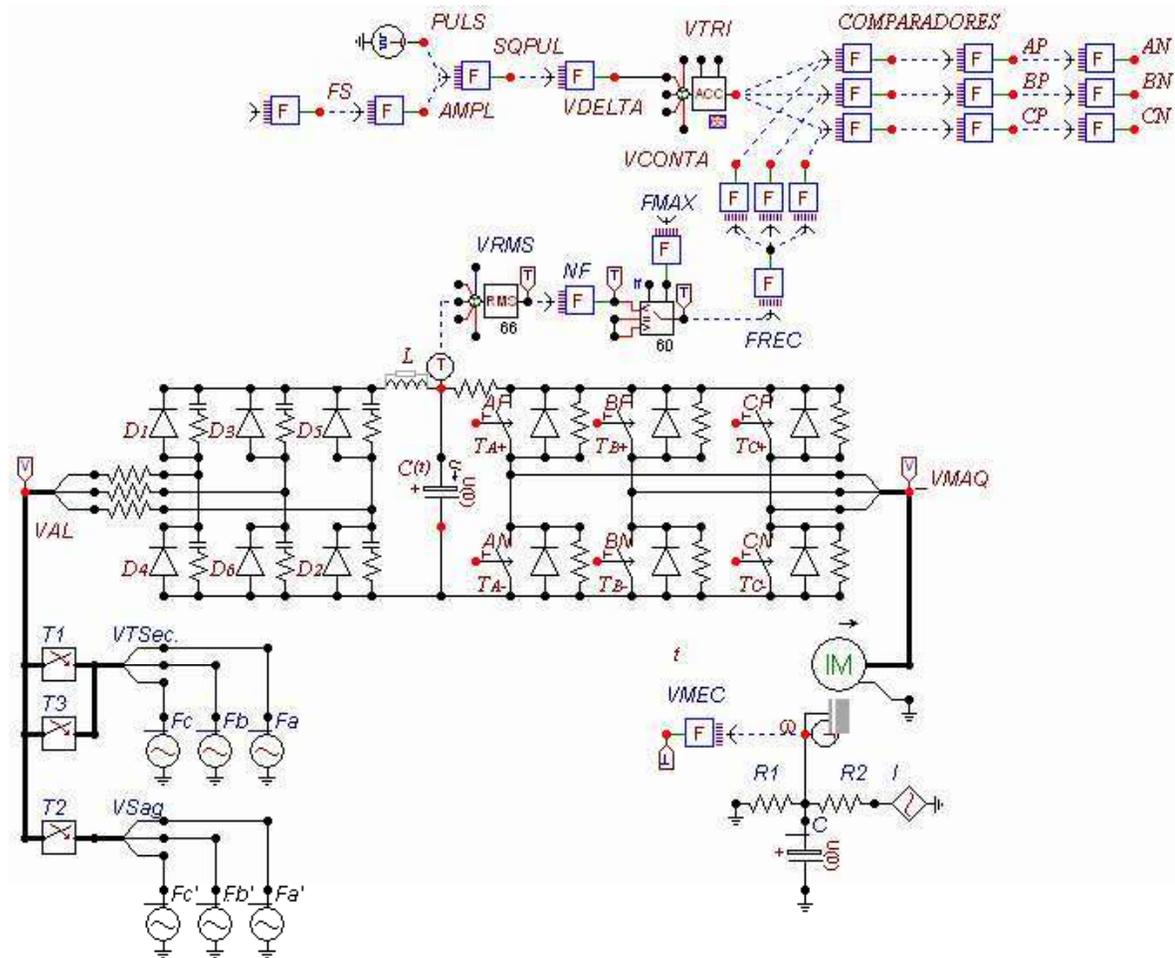


Figura 4.29. Diagrama del sistema eléctrico en estudio implementado en ATPDraw incluyendo el control de velocidad de frecuencia variable.

Las características que presenta la configuración utilizada en sus diferentes etapas son (ver Figura 4.29):

- Rectificador. La configuración utilizada en el rectificador trifásico de seis pulsos es un arreglo de seis diodos de potencia $D_1, D_2, D_3, \dots, D_6$. El flujo de potencia en el rectificador es unidireccional.

- Enlace de CD. Está constituido por un inductor (L) y un capacitor ($C_{(l)}$) siguiendo los valores recomendados en [Bellei *et al.* 1996] para la capacidad del motor.
- Inversor. La configuración utilizada para esta etapa es la de fuente de voltaje (VSI) típica para controladores con esquema de control V/Hz y consiste en un arreglo trifásico de seis tiristores representados por interruptores controlados por voltaje ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_6$).
- Esquema de control V/Hz de lazo abierto. En esta etapa el voltaje rms en estado estable del enlace de CD (V_{RMS}) se toma como referencia para obtener, mediante una relación lineal, una nueva frecuencia (NF) que es limitada por la frecuencia nominal de 60Hz (F_{MAX}) y determinar así la frecuencia final de salida del inversor ($FREC$).
- Controlador SPWM. La técnica de modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) se consigue alimentando cada fase del inversor con un comparador entre la señal portadora triangular ($VTRI$) de 1KHz, que se obtiene a partir de una transformación de los pulsos generados por una fuente de voltaje de onda cuadrada ($PULS$), y una señal senoidal de referencia ($VCONTA$) de frecuencia variable ($FREC$). En estado estable el índice de modulación de amplitud, m_a , adoptado fue de 0.95 y el índice de modulación de frecuencia, m_f , de 16.67.

Adicionalmente para proteger los elementos activos de conmutación de las sobretensiones producidas por una carga inductiva, como el motor de inducción, se colocó una red RC, conocida como *snubber*, en paralelo con cada uno de los elementos de este tipo, tanto en el rectificador como en el inversor.

Las Figuras 4.30-4.33 muestran el desempeño del sistema eléctrico etapa por etapa.

En la Figura 4.30 se muestra el voltaje de CA de la fase a antes, durante y después de una depresión de voltaje tipo A en el lado de CA del rectificador trifásico.

En la Figura 4.31 se muestra el voltaje rms en el enlace de CD a la salida del rectificador.

La Figura 4.32 muestra el voltaje línea-línea en el lado de CA del inversor que a su vez es aplicado al motor de inducción.

La Figura 4.33 muestra la velocidad del motor.

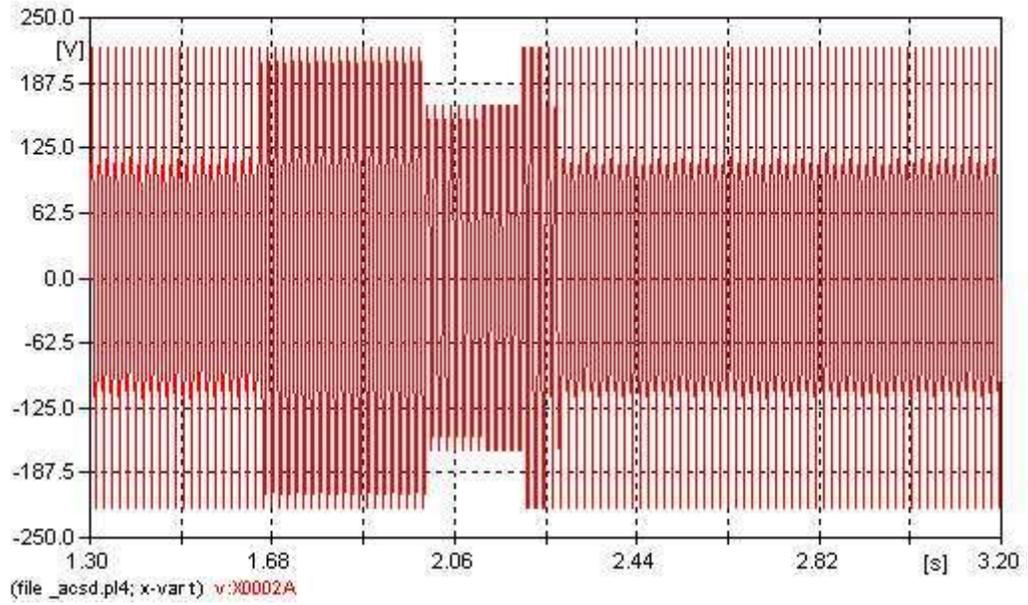


Figura 4.30. Voltaje de alimentación de la fase a en el lado de CA del rectificador.

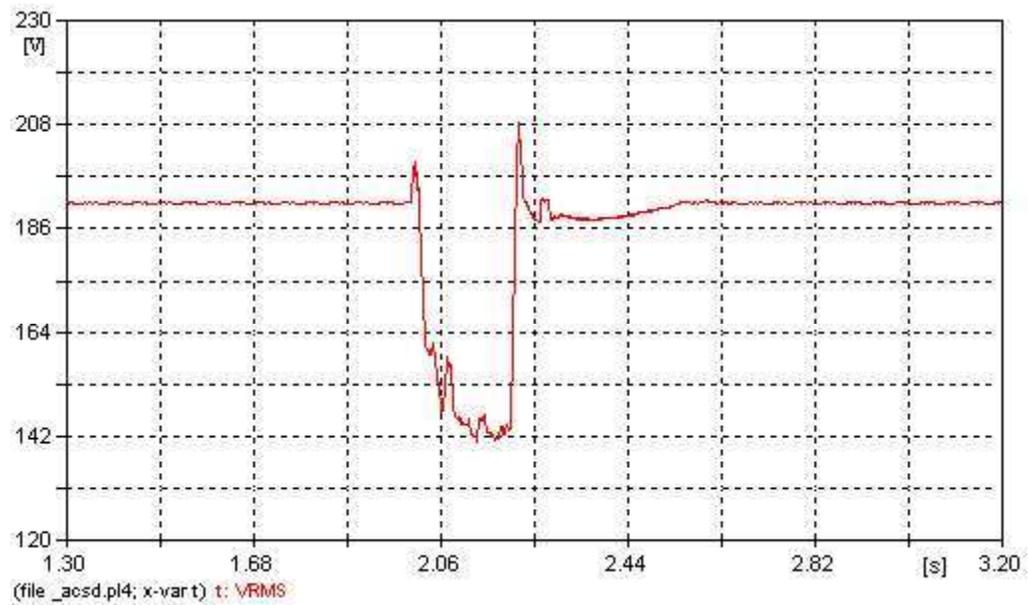


Figura 4.31. Voltaje rms en el enlace de CD.

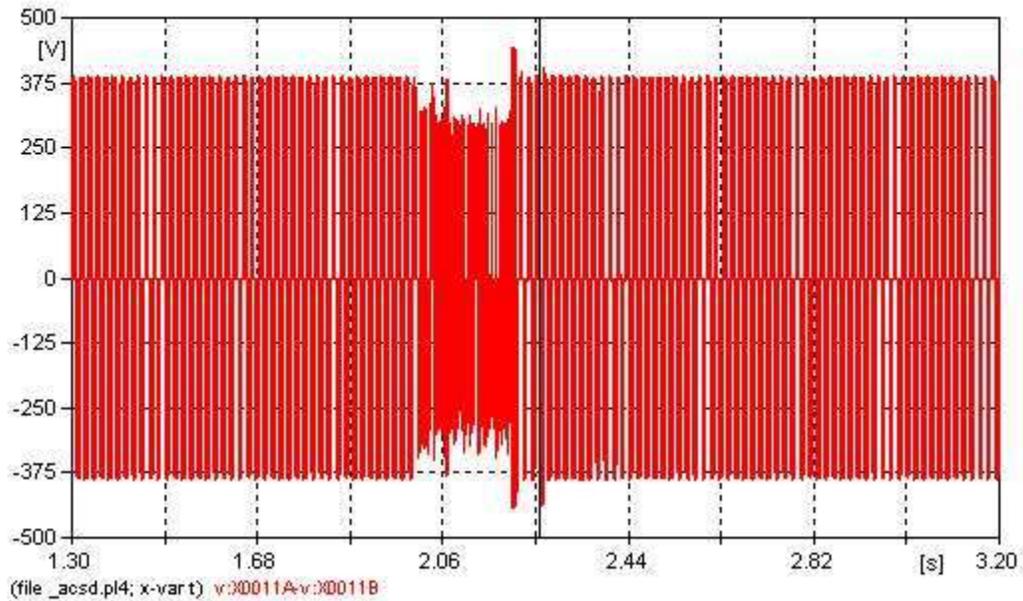


Figura 4.32. Voltaje línea-línea aplicado al motor de inducción.

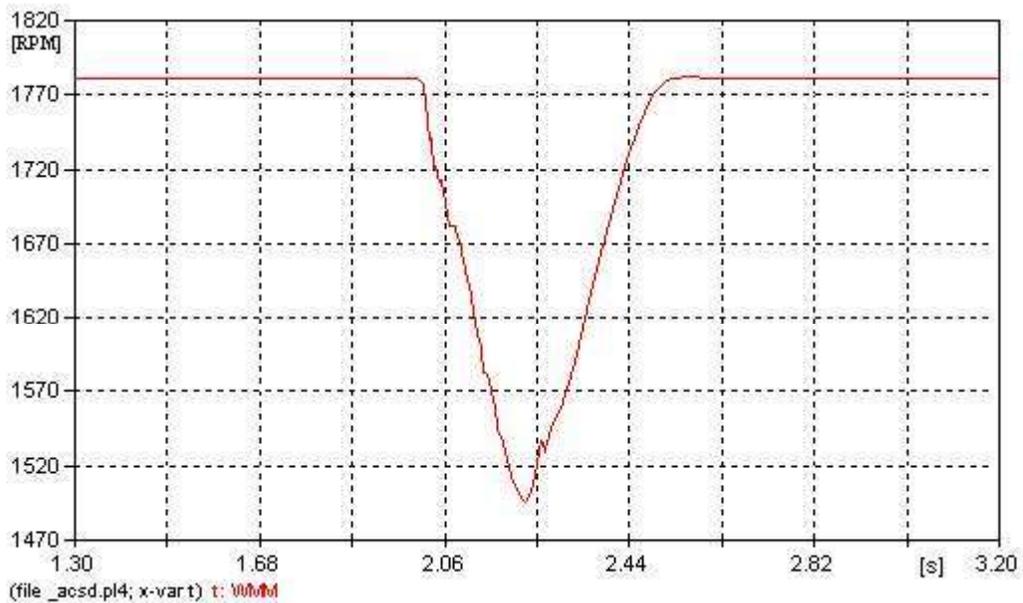


Figura 4.33. Velocidad del motor de inducción.

La velocidad del motor se rige por el voltaje y la frecuencia suministrados por el inversor. El desempeño del inversor depende del voltaje de CD y de la técnica de modulación aplicada a éste. Con la disminución del voltaje de CD, se reduce el voltaje efectivo aplicado al motor y por consiguiente el par y la velocidad disminuyen. El efecto de

las depresiones de voltaje en la velocidad del motor fue analizada considerando un tiempo de duración del *sag* de 6 y 12 ciclos (0.1 y 0.2 s). Las condiciones de operación del motor durante las simulaciones fueron a su velocidad y carga nominales. Las fallas en la red eléctrica fueron simuladas entre los 2.0 y 2.2 segundos de simulación.

La Figura 4.34 muestra la velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A de 0.2 segundos de duración y una profundidad $h = 0.75$ con esquema de control de velocidad y con frecuencia fija de 60Hz. La Figura 4.35 muestra los voltajes rms en el enlace de CD para estas mismas condiciones. Se puede observar una mayor disminución de la velocidad como resultado de la reducción proporcional de la frecuencia de alimentación a medida de la disminución en el voltaje del enlace de CD.

Las Figuras 4.36 y 4.37 muestran, de modo respectivo, el mismo efecto descrito anteriormente en la velocidad del motor y en el enlace de CD pero esta vez sometidos a una depresión de voltaje tipo D de 0.2 segundos de duración y una profundidad $h = 0.75$.

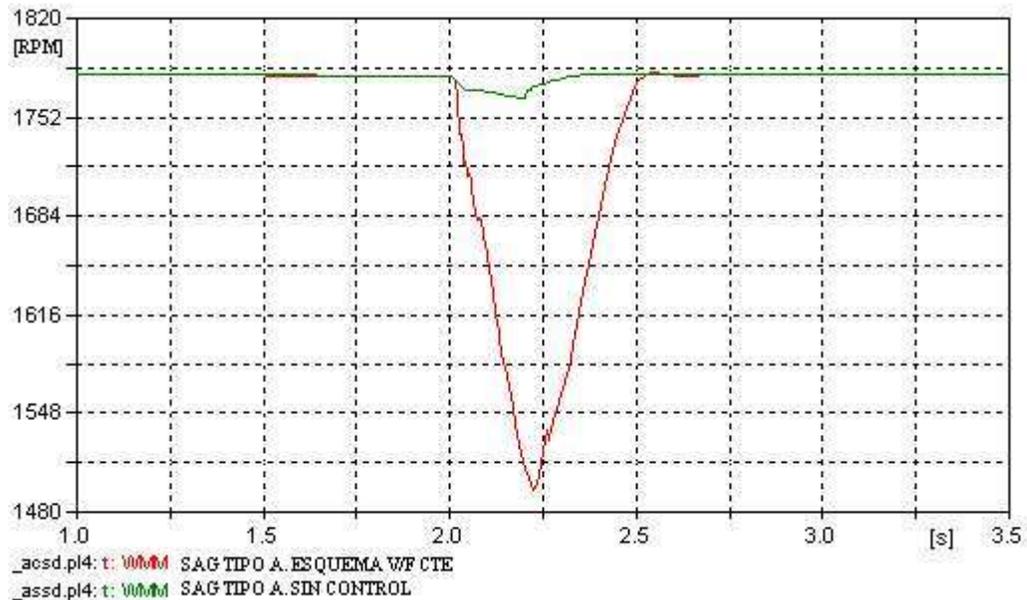


Figura 4.34. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos.

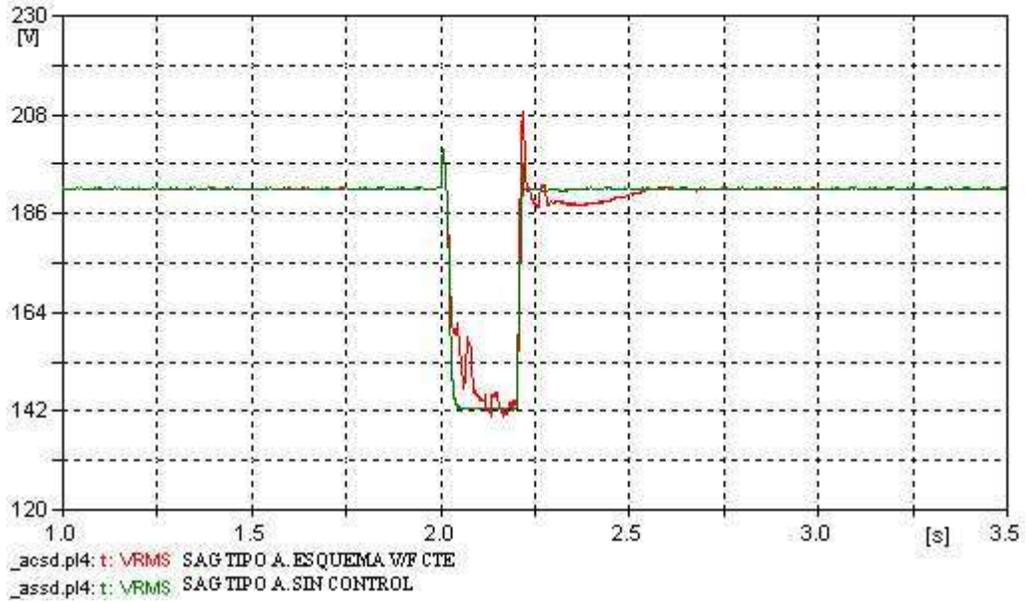


Figura 4.35. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos.



Figura 4.36. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo D, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos.



Figura 4.37. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo D, $h = 0.75$ y $\Delta t = 12$ ciclos.

La Figura 4.38 ilustra la velocidad del motor de inducción para una profundidad de $h = 0.75$ y una duración de 0.1 segundos para dos diferentes tipos de depresiones de voltaje. La Figura 4.39 muestra los voltajes rms en el enlace de CD para estas mismas condiciones. Se puede observar que el efecto de la depresión de voltaje simétrica tipo A es más severo en el voltaje del enlace de CD y en consecuencia también reduce la velocidad del motor en mayor grado en comparación con la depresión de voltaje asimétrica tipo D, este mismo efecto se observó en las simulaciones anteriores de las secciones 4.1.1 y 4.1.2.

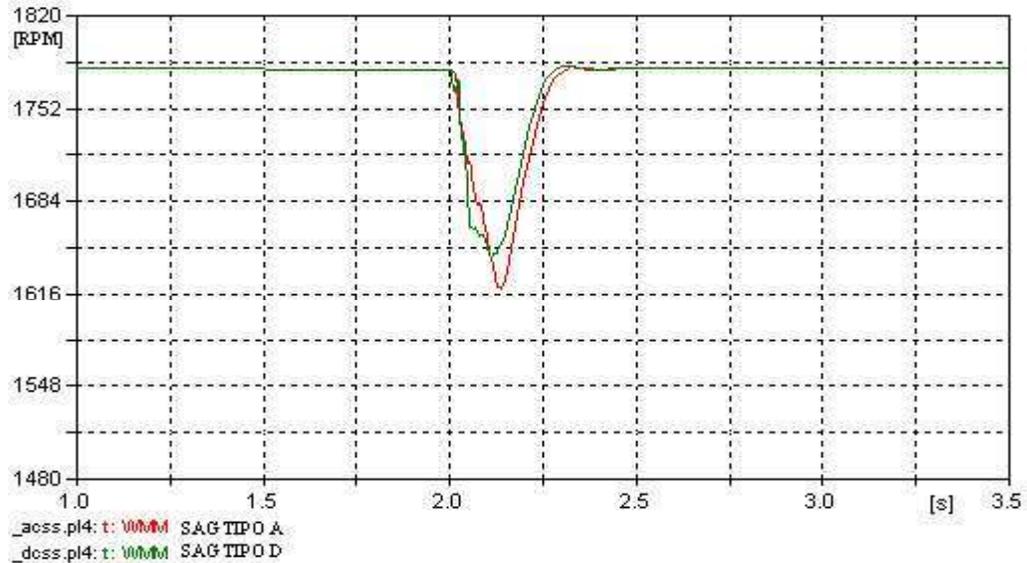


Figura 4.38. Velocidad del motor de inducción sometido a diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.75$ y $\Delta t = 6$ ciclos.

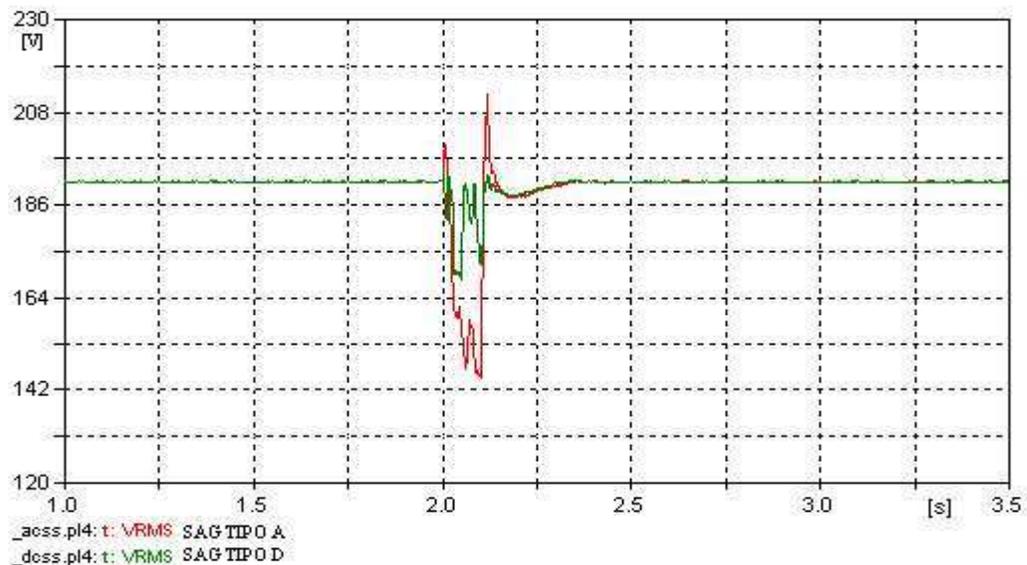


Figura 4.39. Voltaje rms en el enlace de CD bajo diferentes tipologías de depresiones de voltaje, $h = 0.75$ y $\Delta t = 6$ ciclos.

La Figura 4.40 muestra la velocidad del motor de inducción cuando se encuentra sometido a una depresión de voltaje tipo D de una duración de 0.2 segundos pero de diferente profundidad. La Figura 4.41 muestra los voltajes rms en el enlace de CD para estas mismas condiciones. Se puede observar, contrario a lo que se esperaba, que en este

caso aunque el valor del voltaje rms del enlace de CD se ve afectado de menor manera por la depresión de mayor profundidad, la velocidad del motor disminuye en mayor grado.

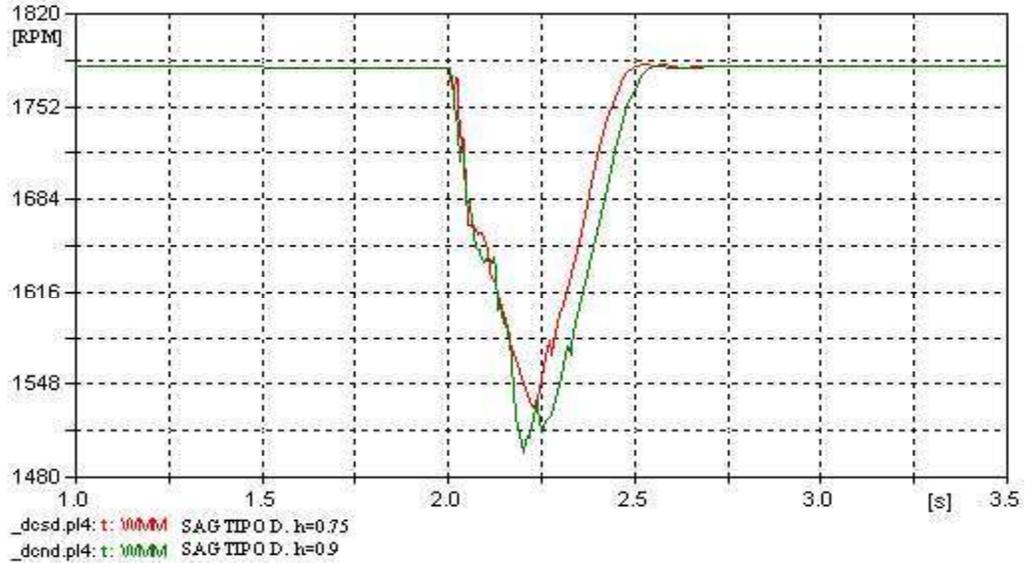


Figura 4.40. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo D, $\Delta t = 12$ ciclos y diferente profundidad.



Figura 4.41. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo D, $\Delta t = 12$ ciclos y diferente profundidad.

La Figura 4.42 muestra la velocidad del motor de inducción cuando se encuentra sometido a una depresión de voltaje tipo A de una profundidad $h = 0.75$ pero de diferente duración. La Figura 4.43 muestra los voltajes rms en el enlace de CD para estas mismas condiciones. Se puede observar, como se esperaba, que el aumento en la duración de la depresión de voltaje produce un efecto más severo en la velocidad del motor y en el voltaje rms del enlace de CD.

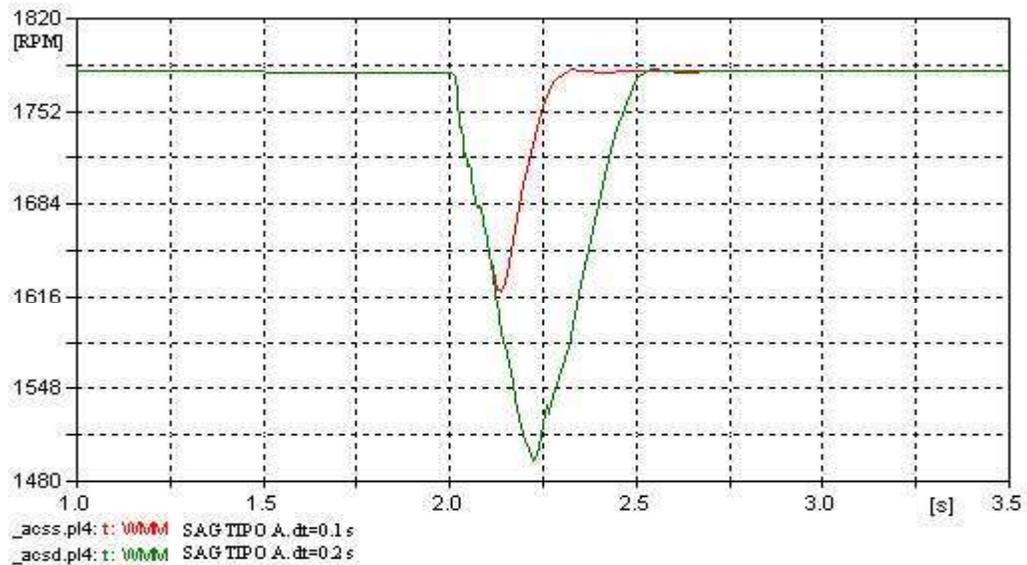


Figura 4.42. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y diferente duración.

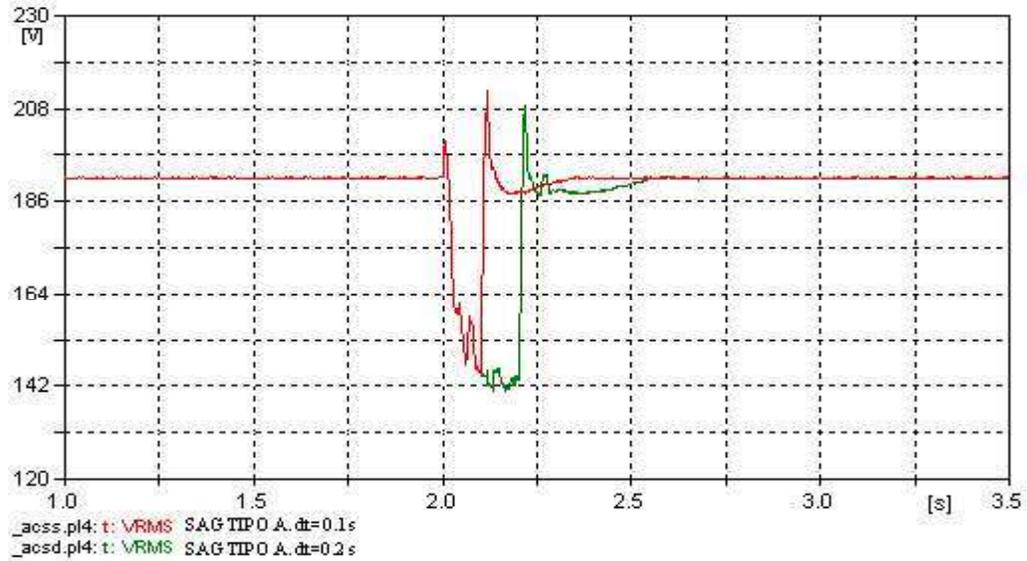


Figura 4.43. Voltaje rms en el enlace de CD bajo una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.75$ y diferente duración.

La Figura 4.44 muestra la velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A de 0.4 segundos de duración y una profundidad $h = 0.5$. Se puede observar que bajo estas circunstancias de falla severa el motor de inducción ya no se recupera e interrumpe su funcionamiento.



Figura 4.44. Velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje tipo A, $h = 0.5$ y $\Delta t = 24$ ciclos.

La magnitud del voltaje en el enlace de CD está determinada principalmente por la dimensión del capacitor, el tiempo de duración y el tipo de depresión de voltaje. La reducción progresiva de la velocidad del motor, es el resultado de la descarga del capacitor en el enlace de CD, hasta el momento en que el voltaje de la red eléctrica carga nuevamente al capacitor. El incremento en la dimensión del capacitor puede mejorar la continuidad del suministro eléctrico en el lado de CD, pero al mismo tiempo incrementa el costo y el volumen del controlador.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se cumplió con el objetivo planteado al inicio de este proyecto de Tesis, lo cual se muestra de manera clara en los casos de estudio presentados. A continuación se señalan los puntos más relevantes de su desarrollo y además se presentan algunas sugerencias para trabajos futuros.

Las conclusiones de este trabajo de Tesis son las siguientes:

Las depresiones de voltaje son un problema de gran interés que afecta la economía de grandes industrias debido a que pueden provocar un funcionamiento inadecuado, e incluso la interrupción del funcionamiento de un motor de inducción de gran potencia que se traduce en pérdidas de tiempo, producción o daño al equipo. Es por esto que es de gran importancia conocer la sensibilidad de estos equipos a este tipo de disturbios presentes en la red eléctrica para poder hacerles frente planteando estrategias que permitan minimizar sus consecuencias.

Se lograron simular las diferentes tipologías de depresiones de voltaje de distintas características de profundidad y duración, permitiendo observar los efectos producidos en la máquina de inducción como son la pérdida de velocidad, picos de par y picos de intensidad. Así como también el efecto producido en el control de velocidad de frecuencia variable basado en electrónica de potencia.

Los resultados de los casos de estudio presentados en este trabajo de Tesis fueron comparados con estudios similares reportados en la literatura, observándose resultados satisfactorios.

Para analizar el motor de inducción y su control de velocidad, bajo el efecto de depresiones de voltaje, se utilizó la herramienta ATPDraw, que aunque dispone de los diferentes componentes eléctricos, electrónicos y de control para la simulación, se requiere un conocimiento previo e importante de las principales características de los mismos, debido a que el programa utiliza modelos muy detallados de dichos componentes, que para su correcto funcionamiento, hay que introducir y precisar adecuadamente.

Debido al hecho de que EMTP/ATP no es un programa comercial y puede ser usado libremente, facilita que cualquier usuario pueda utilizar esta herramienta en aplicaciones que requieran estudiar el funcionamiento de una máquina de inducción en circunstancias similares a las aquí expuestas o plantear nuevos casos de estudio en trabajos futuros, por ejemplo, cambiando la estrategia de conmutación, agregando un voltaje adicional para contrarrestar las pérdidas a bajas frecuencias, o bien, centrando este nuevo estudio en alguna otra parte del sistema eléctrico, por ejemplo haciendo énfasis en el efecto de la dimensión del capacitor en el enlace de CD.

Para finalizar cabe mencionar que el desarrollo de este trabajo de Tesis forma parte del proyecto de investigación “*Efectos de depresiones de voltaje en máquinas de inducción y sus controles*” aprobado por el H. Consejo de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo que contempla además, realizar en tiempo real, mediciones que permitan caracterizar y estudiar el comportamiento de la máquina de inducción y su control de velocidad bajo el efecto de depresiones de voltaje.

Referencias

- [Ábrego 2005] Ábrego Díaz Alejandra. “*Determinación de parámetros de un motor de inducción jaula de ardilla*”. Tesis de Licenciatura, UMSNH. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Morelia, México 2005.
- [Aleoiza *et al.* 2003] Aleoiza E. C. *et al.* “*Analysis and design of a new voltage sag compensator for critical loads in electrical power distribution systems*”. IEEE, Trans. on Ind. Appl., Vol. 39, N° 4, Julio/Agosto 2003.
- [Bellei *et al.* 1996] Bellei T. A., O’Leary R. P., Camm E. H. “*Evaluating Capacitor-Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives Due to Voltage Magnification*”. IEEE, Trans. on Power Delivery, Vol. 11, Julio 1996.
- [Bollen 2000] Bollen Math H. J. “*Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*”. IEEE PRESS Series on Power Engineering, 2000.
- [Cardona *et al.* 2006] Cardona J., Barros J. “*ATP prediction of voltage sag effect on sensitive loads*”. ICREPQ International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Palma de Mallorca, España, Abril 2006.

- [Córcoles 1998] Córcoles F. “*Estudio y caracterización de la máquina de inducción. Aplicación de métodos analíticos y aproximados para el análisis transitorio*”. Tesis doctoral, UPC. Departament d’Enginyeria Elèctrica, 1998.
- [Chapman 2005] Chapman Stephen. “*Máquinas eléctricas*”. McGrawHill, 2005.
- [Guasch 2006] Guasch Pesquer Luis. “*Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y en los transformadores trifásicos*”. Tesis Doctoral, UPC. Departament d’Enginyeria Elèctrica, Barcelona, España, Enero 2006.
- [IEEE 1995] IEEE. IEEE Standard 1159-1995. “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”. New York, USA, 1995.
- [IITREE 2009] IITREE-UNLP-CAUE. *El ATP/EMTP*. Argentina. Abril de 2009. <http://www.iitree-unlp.org.ar/caue/atp.htm>.
- [Key 1995] Key T. “*Predicting behaviour of induction motors during service faults and interruptions*”. IEEE Industry Appl. Mag., Enero/Febrero 1995.
- [Kosow 1993] Kosow Irving L. “*Máquinas eléctricas y transformadores*”. Segunda Edición, Prentice Hall, 1993.
- [Krause *et al.* 2002] Krause Paul C., Wasynczuk Oleg, Sudhoff Scout D. “*Analysis of electrical machinery and drive systems*”. Segunda Edición, IEEE Series on Power Engineering, 2002.

- [Martínez *et al.* 2003] Martínez Velasco J. A., Martín-Arnedo J. “*Voltage sag analysis using an Electromagnetic Transient Program*”. CIPST Int. Conf. on Power Systems Transients, Louisiana, USA, Septiembre/Octubre 2003.
- [Montero *et al.* 2000] Montero O., Enjeti P. “*Application of a boost ac-ac converter to compensate for voltage sags in electric power distribution systems*”, Proc. IEEE PESC Vol. 1, pp. 470-475, 2000.
- [Murphy *et al.* 1988] Murphy J., Turnbull F. “*Power Electronic Control of AC Motors*”. Pergamon Press, 1988.
- [Newmann *et al.* 2001] Newmann G., Perera S., Gosbell V., Smith V. “*Voltage sag ride through improvement of moderna a.c. drives: Review of methods and case study*”. Proc. AUPEC 01, Perth, pp. 304-309, Septiembre 2001.
- [Öhrström *et al.* 2003] Öhrström M., Söder L. “*A comparison of two methods used for voltage dip characterization*”. IEEE Power Technology Conference, Bologna, Italia, 2003.
- [Prikler *et al.* 2002] Prikler László, Høidalen Has Kristian. “*ATPDraw 3.5 for Windows Users’ Manual*”. Norway, 2002.
- [Rocha *et al.* 2005] Rocha B. H., Madrigal M. “*Análisis del Comportamiento en Controladores de Velocidad Variable durante Depresiones de Voltaje*”. IEEE Latin America Transactions, Vol. 3, Nº 5, Diciembre 2005.

- [Sarmiento *et al.* 1996] Sarmiento H. G., Estrada E. “*A voltage sag study in an industry with adjustable speed drives*”, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 16-19, Enero/Febrero 1996.
- [UNE 2001] UNE. UNE-EN 50160. “*Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*”. Madrid: UNE, 2001.