



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO,
EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL
INTERCONECTADO, ALTERNATIVAS Y SOLUCIONES**

Daniel Estuardo Polanco Palma
Asesorado por el Ing. Edgar Noel Aguilar Palma

Guatemala, noviembre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO,
EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL
INTERCONECTADO, ALTERNATIVAS Y SOLUCIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

DANIEL ESTUARDO POLANCO PALMA
ASESORADO POR EL ING. EDGAR NOEL AGUILAR PALMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO, EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO, ALTERNATIVAS Y SOLUCIONES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 27 de febrero de 2007.



Daniel Estuardo Polanco Palma

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 21 de OCTUBRE 2008.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
Arranques de motores sincrónicos de gran tamaño en el área occidental
del Sistema Nacional Interconectado, alternativas y soluciones, del
estudiante; Daniel Estuardo Polanco Palma, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Balboa Barrios
Coordinador de Ingeniería de Potencia


JGBB/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Daniel Estuardo Polanco Palma, titulado: Arranques de motores sincrónicos de gran tamaño en el área occidental del sistema Nacional Interconectado, alternativas y soluciones, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 24 DE OCTUBRE 2003.

Universidad de San Carlos
de Guatemala




Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 383.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO, EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO, ALTERNATIVAS Y SOLUCIONES**, presentado por el estudiante universitario Daniel Estuardo Polanco Palma, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, noviembre de 2008



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Con todo mi cariño, admiración y respeto:

Mis padres

Elder Isnel Polanco Orellana

Florinda Palma Espina

Mis Hermanos

Alex Omar Polanco Palma

Elder Fransico Polanco Palma

Ya que por ellos siempre he tenido grandes motivos para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Antes que a nadie y sobre todas las cosas, agradezco a Dios, por acompañarme con su presencia durante todos los días de mi vida, darme las bendiciones y el conocimiento necesario para poder llegar hasta donde ahora me encuentro.

Familia

Mi papa Elder Isnel Polanco Orellana, por su ejemplo de fuerza, dedicación y constancia incansable, sus consejos y cariño.

Mi mama Florinda Palma Espina, por su amor y dedicación recibidos a la largo de toda mi vida, por su ejemplo de rectitud inquebrantable, su apoyo económico y sobre todo por estar ahí en los malos momentos.

Mis hermanos, por su cariño y ayuda brindada en todo momento en forma incondicional.

Amigos

Mis amigos y compañeros de escuela, Carlos Fuentes, Edgar Chaj, Gelbert Juárez, Leonel Leal, Juan Valle, David Yax, Paolo y Felix Velasquez por toda la ayuda prestada durante la carrera y para la realización de este trabajo, y de quienes he aprendido que la amistad hay que saberla valorar.

Profesionales

De manera particular, agradezco sinceramente la disposición y colaboración del Ing. Edgar Noel Aguilar Palma, por su asesoría, e invaluable paciencia para la culminación a buen término de este trabajo de graduación.

Ing. Vicente Espinoza, ya que sin su ayuda y sus ideas no habría podido realizar este trabajo.

Ing Yury Urbina y Manolo Medina, por sus consejos, y por darme la oportunidad de realizar parte de mi trabajo en el AMM.

Mis amigos y compañeros de trabajo del Centro de Despacho de Carga del AMM, por el amplio espíritu de colaboración.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MOTORES SÍNCRONOS	1
1.1. Definición	1
1.2. Reactancia sincronía y circuitos equivalentes	2
1.3. Motores síncronos bajo la perspectiva del campo Magnético	5
1.4. Operación del motor síncrono en estado estable	7
1.4.1. Curva característica par-velocidad de los motores síncronos	7
1.4.2. Efecto de los cambios de carga	9
1.4.3. Efecto de cambios en la corriente de campo en los motores síncronos	11
2. ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS	15
2.1. Introducción	15
2.2. Características par motor-velocidad de cargas mecánicas	16
2.3. ¿Por qué un motor síncrono no tiene par de arranque?	18
2.4. Métodos de arranque para un motor síncrono	19

2.5.	Arranque asíncrono o con devanados de Amortiguamiento	22
2.6.	Tipos de arranques asíncronos	27
2.6.1.	Arranque directo	27
2.6.2.	Arranque por autotransformador	29
2.6.3.	Arranque estrella-delta	32
2.6.4.	Métodos de arranque por inserción de impedancia (resistencia e inductancia)	36
2.6.5.	Métodos de arranque por inserción de resistencias rotóricas	36
3.	FLUJO DE CARGA	39
3.1.	Introducción	39
3.2.	El problema de flujos de carga	40
3.2.1.	Aspectos Importantes para el análisis de flujo de carga	42
3.2.2.	Análisis de un sistema de dos buses	44
3.3.	Ecuaciones de flujo de potencia	46
3.4.	Definición de las incógnitas para la solución de los flujos de potencia	51
3.4.1.	Definición de incógnitas	51
3.4.2.	Tipos de buses	54
3.5.	Métodos numéricos para la solución de flujos de potencia	55
3.5.1.	Método de Newton Raphson	55

4	ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS PARA ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO, EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO	61
4.1.	Metodología	61
4.1.1.	Escenarios	61
4.1.2.	Demandas	61
4.1.3.	Bases de datos para el análisis	61
4.1.4.	Proceso de datos y software utilizado	61
4.1.5.	Elementos monitoreados en el estudio	62
4.1.5.1.	Sistema aislado	62
4.1.5.2.	Sistema Nacional Interconectado	62
4.1.6.	Criterios aplicados	63
4.1.7.	Parámetros del estudio	63
4.1.7.1.	Motor	63
4.1.7.2.	Carga	65
4.1.7.3.	Dispositivos de arranque	65
4.2.	Estudio de Arranque de motor síncrono en un sistema aislado	66
4.2.1.	Arranque directo	67
4.2.2.	Arranque asistido por capacitores	71
4.2.3.	Arranque por medio de inserción de impedancias	75
4.2.4.	Arranque por medio de autotransformador	80
4.2.5.	Arranque por medio de resistencias rotoricas	84
4.2.6.	Arranque estrella-delta	89
4.2.7.	Comparación y conclusiones de los arranques en el sistema aislado	90
4.3.	Estudio de arranque de motor síncrono en Sistema Nacional Interconectado	93
4.3.1	Arranques por autotransformador y resistencias	

rotóricas	93
4.3.1.1. Máxima invierno 2010	93
4.3.1.2. Máxima verano 2010	95
4.3.2. Comparación y conclusiones de los arranques en el SNI	98

CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Circuito equivalente la armadura de un motor síncrono en forma fasorial	2
2.	Circuito equivalente para la fase A de una máquina síncrona	3
3.	Circuito equivalente para el motor síncrono con impedancia síncrona constante	4
4.	Diagrama fasorial de un motor subexcitado alimentándose de una corriente I_A en atraso	4
5.	a) Diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en atraso. b) El diagrama de campo magnético correspondiente	5
6.	a) Diagrama fasorial de un motor síncrono. b) Diagrama de campo magnético correspondiente	7
7.	Característica par-velocidad del motor síncrono	8
8.	a) Diagrama fasorial de un motor que opera con un factor de potencia en adelanto. b) Efecto de incrementar la carga en la operación de un motor síncrono	10
9.	a) Motor que opera con factor de potencia en atraso, b) Efecto del incremento en la corriente de campo	11
10.	Curvas V de un motor síncrono	14
11.	a) Diagrama fasorial de un motor síncrono subexcitado, b) Diagrama fasorial de un motor síncrono sobreexcitado	14
12.	Características par motor-velocidad de cargas mecánicas	17
13.	Par de arranque de un motor síncrono	19
14.	Diagrama simplificado de una máquina con dos polos	

	salientes que muestra los devanados de amortiguamiento	22
15.	Arranque con devanados de amortiguamiento	24
16.	Curva característica de un motor de inducción	27
17.	Características de arranque directo	28
18.	Esquema de arranque por autotransformador	30
19.	Conexión Kormdorfer	30
20.	Curva par-velocidad del arranque con autotransformador y directo	31
21.	Circuito de fuerza y control para el arranque estrella-delta	34
22.	Proceso de reducción de corriente en el arranque estrella triángulo	35
23.	Esquema de conexiones del arranque por resistencias rotóricas	37
24.	Potencia transferida entre dos buses	41
25.	Sistema de dos buses	44
26.	Sistema de dos buses. Representación de la línea de transmisión	45
27.	Sistema de dos buses. Inyecciones netas de potencias	46
28.	Tipos de buses	54
29.	Parámetros generales del motor	64
30.	Circuito equivalente del motor sincrónico	64
31.	Modelo de estabilidad del motor	65
32.	Características de la carga	65
33.	Parámetros para arranques: por condensador, resistor e inductancia y resistencia en el colector	66
34.	Parámetros para arranques: por autotransformador y estrella-delta	66
35.	Sistema aislado de prueba	67
36.	Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque directo	68
37.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque directo	68
38.	Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor). Arranque directo	69

39.	Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque directo	69
40.	Factor de potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo	70
41.	Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo	70
42.	Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo	71
43.	Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores	72
44.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores	72
45.	Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor). Arranque asistido por capacitores	73
46.	Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores	73
47.	Factor de Potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores	74
48.	Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores	74
49.	Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores	75
50.	Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	76
51.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	77
52.	Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor). Arranque por inserción de impedancias	77
53.	Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	78
54.	Factor de Potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por inserción de impedancias	78
55.	Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW.	

	Arranque por inserción de impedancias	79
56.	Comportamiento del par eléctrico y mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por inserción de impedancias	79
57.	Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	81
58.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	81
59.	Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor). Arranque por inserción de impedancias	82
60.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias	82
61.	Factor de Potencia en el Motor de 2.9MW. Arranque por inserción de impedancias	83
62.	Corriente de Arranque en el Motor de 2.9MW. Arranque por inserción de impedancias	83
63.	Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por autotransformador	84
64.	Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por resistencias rotoricas	85
65.	Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por resistencias rotoricas	86
66.	Voltaje en el BUS-C del sistema aislado. (Barra donde se conecta el motor). Arranque por resistencias rotoricas	86
67.	Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque por resistencias rotoricas	87
68.	Factor de Potencia en el motor de 2.9MW. Arranque por resistencias rotoricas	87
69.	Corriente de Arranque en el motor de 2.9MW. Arranque por resistencias rotoricas	88
70.	Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por resistencias rotoricas	88
71.	Iteraciones del arranque estrella-delta	90

72.	Voltaje en la barra MAR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	94
73.	Voltaje en la barra TEJ-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	94
74.	Voltaje en la barra SMR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	95
75.	Voltaje en la barra TAC-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	95
76.	Voltaje en la barra MAR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	96
77.	Voltaje en la barra TEJ-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	96
78.	Voltaje en la barra SMR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	97
79.	Voltaje en la barra TAC-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas	97

TABLAS

I.	Valores críticos en el arranque directo	71
II.	Valores críticos en el arranque asistido por capacitores	72
III.	Valores críticos en el arranque por inserción de impedancias	75
IV.	Valores críticos en el arranque por autotransformador	84
V.	Valores críticos en el arranque por autotransformador	89
VI.	Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque	91
VII.	Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque en el SIN, máxima invierno 2010	95
VIII.	Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque en el SIN, mínima verano 2010	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Ampere
Kv	Kilovolt
Km	Kilometro
MW	Megawatt
MVA	Megavoltampere
MVAR	Megavoltampere reactivo
kcmil	Kilocircular mil
P.U.	Valor por unidad
P	Potencia activa
P_{ij}	Flujo de carga del nodo i al nodo j
Q	Potencia reactiva
Q^{\min}	Límite menor de regulación de Potencia reactiva
Q^{\max}	Límite mayor de regulación de Potencia reactiva
$V_{\text{especificado}}$	Voltaje fijado
Z_{SER}	Impedancia serie
Y_{SH}	Admitancia paralelo
B	Susceptancia
G	Conductancia
I	Corriente eléctrica
V	Voltaje
R	Resistencia

X_L	Reactancia inductiva
S	Potencia aparente
H	Constante de inercia
HP	Caballos de fuerza
D_G	Factor de amortiguamiento
δ	Ángulo de desfase
Δ	Cambio incremental
e	Número de Euler
∂	Derivada parcial
f'	Primera derivada de f
$\frac{\partial}{\partial x} f _0$	Derivada parcial de f en x
S^*	Potencia aparente conjugada
\sum	Sumatoria de Riemann
A^T	Transpuesta de la matriz A
γ	Coefficiente de contribución
\Re	Número real
$\ \vec{A}\ $	Valor absoluto del vector A

GLOSARIO

AGC	<i>Automatic Generation Control</i> (control automático de generación)
AMM	Administrador del Mercado Mayorista
Caso base	Modelo de un sistema de potencia operando en condiciones normales
CDC	Centro de despacho de carga
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Colapso de voltaje	Proceso a través del cual la secuencia de eventos de algún incidente provoca que se tengan niveles de magnitud de voltaje inaceptables en gran parte del sistema eléctrico.
Contingencia	Suceso imprevisible en una red eléctrica que afecta su funcionamiento
Criterio N-1	Fallo en uno de los elementos de una red eléctrica
DEOCSA	Distribuidora de Energía de Occidente
DEORSA	Distribuidora de Energía de Oriente

Despacho económico	Asignación de los generadores de una red para suplir la creciente demanda a lo largo de un día de operación típico basado en criterios de costos de producción
EDACBF	Esquema de desconexión automático de carga por baja frecuencia
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala Sociedad Anónima
EGEE	Empresa de Generación de Energía Eléctrica
ETCEE	Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica
Flujo de potencia	Transporte de potencia eléctrica en las líneas de transmisión de una red
HIS	Registro histórico
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
MAR-69	Barra 69KV de la Subestación Marlin
Matriz de admitancias	Arreglo matricial de los componentes de una red eléctrica que es función de los parámetros de sus líneas de transmisión

Matriz jacobiana	Arreglo matricial propio de los métodos numéricos empleado en modelos de sistemas eléctricos no lineales
MEM	Ministerio de Energía y Minas
NCO	Normas de Coordinación de Operación
NOTAUCT	Normas Técnicas de Estudios para Acceso a la Red de Transporte
PSAF	<i>Power Sistem Analysis Framework</i>
SCADA	<i>Supervisory control and acquisition</i> (Control supervisorio y adquisición de datos)
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SER	Sistema Eléctrico Regional
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i> (Cargabilidad a la impedancia de sobrevoltaje)
SITR	Sistema Informático en Tiempo Real
SMR-69	Barra 69KV de la subestación San Marcos
SMRTEJ69	Línea 69KV entre las subestaciones San Marcos y Tejutla
SNI	Sistema Nacional Interconectado

TAC-69	Barra 69KV de la subestación Tacana
TEJ-69	Barra 69KV de la subestación Tejutla
TEJMAR69	Línea 69KV entre las subestaciones Tejutla y San Marcos

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se ha analizado el arranque de motores en el área occidental del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, dicho trabajo se enfoca en determinar cuál de los métodos de arranque provoca la menor perturbación en los parámetros de seguridad establecidos por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) en las Normas de Coordinación de Operación del Administrador del Mercado Mayorista (AMM)

Los ensayos y simulaciones se hacen en el modelo de datos de la red del Sistema Nacional Interconectado proporcionados por el Administrador del Mercado Mayorista y por la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE) de Guatemala. El estudio se basa en las proyecciones de demanda para dos escenarios: Máxima Invierno 2010 y Máxima Verano 2010.

Debido a que en la zona occidental de Guatemala, en la actualidad, se cuenta con motores de gran tamaño, producto de la explotación minera, este estudio se llevará a cabo con motores de este tipo (4000HP, 4.1KV y 240 RPM). El estudio consiste en realizar los diferentes arranques para motores síncronos en las diferentes épocas del año (seca y lluviosa) en demanda máxima y poder ver sus efectos en el Sistema Nacional Interconectado. Los criterios que se consideraron son los siguientes:

- Niveles operativos de tensión en condiciones normales: 95-105%
- Abatimiento del factor de potencia.
- Tiempo de duración del arranque.

La metodología usada se basa en el arranque de un motor por medio de los siguientes métodos: directo, asistido por capacitores, inserción de impedancias, autotransformador, resistencias rotoricas y estrella-delta; todo en un sistema aislado. Luego de este estudio se determinó que las dos mejores alternativas eran los métodos por resistencias rotoricas y autotransformador. Sabiendo esto se procedió al arranque del motor en el SNI por medio de los métodos mencionados, hecho esto se determina que la mejor opción para el arranque de motores de gran tamaño es el método por medio de resistencias rotoricas.

En este estudio se tomó en cuenta la transformación de la línea La Esperanza – San Marcos de 69KV a 138KV, y aun así es importante resaltar que en ninguno de los escenarios, ni con ninguno de los métodos de arranque se logro estar dentro de los parámetros de seguridad establecidos.

OBJETIVOS

- **General:**

Analizar el impacto en el área occidental del SIN, de los diferentes arranques para un motor síncrono de gran tamaño y determinar cuál es el más adecuado.

- **Específicos:**

1. Determinar los niveles de voltaje en las principales barras del área occidental del país, en el instante del arranque de un motor de gran tamaño, en demanda máxima tanto en época seca como en época lluviosa.
2. Establecer que método para el arranque es el más adecuado, esto quiere decir, cuál de los métodos mitiga de mejor manera el impacto del arranque de los motores sincrónicos de gran tamaño en el área occidental del Sistema Nacional Interconectado.
3. Determinar el tipo de elementos de compensación reactiva necesarios para eliminar la violación de los límites de voltaje para mantener los niveles de calidad de energía óptimos.

INTRODUCCIÓN

Durante la puesta en marcha de un motor de las proporciones mencionadas en este estudio, la corriente solicitada es considerablemente grande y puede provocar una caída de tensión que afecte el funcionamiento de equipos y usuarios conectados a la red, especialmente en el caso de la insuficiencia de la sección de la línea de distribución. En ocasiones, la caída puede llegar a ser perceptible en barras de subestaciones considerablemente alejadas.

Debido a esto, está establecido en las Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT), que es indispensable la realización de estudios eléctricos que muestren el impacto que tendrán la adición de nuevas cargas en el Sistema Nacional Interconectado.

En los últimos años, la explotación minera en la parte occidental del país ha ido creciendo, la adición de nueva carga eléctrica en las líneas también ha ido creciendo. Esta carga es caracterizada por los motores síncronos usados en las mencionadas minas, ya que son motores por lo general de 3000 a 4000 HP usados para bandas transportadoras y maquinas amoladoras.

Según la NCO-2 el voltaje en los nodos tiene un margen de regulación de $\pm 5\%$ en condiciones normales de operación, con lo que un arranque con los motores analizados en este estudio representa un problema significativo para el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

El fenómeno de la estabilidad de voltaje ha emergido como uno de los problemas prioritarios dentro del esquema de la planeación y operación de los SEP's. Uno de los primeros trabajos publicados en torno al tema de la estabilidad de voltaje fue hecho por Venikov, a principios de la década de los 60's en la antigua Unión Soviética. Su trabajo de investigación fue inicialmente motivado por un problema presentado en un sistema de distribución. Posteriormente, Weedy en Inglaterra, demostró que este fenómeno no sólo podría ocurrir en sistemas de distribución sino también presentarse en los SEP's. Después de esta investigación, el problema de estabilidad de voltaje en los SEP's llegó a ser ampliamente reconocido por el sector de la industria eléctrica.

1. MOTORES SÍNCRONOS

1.1. Definición

Los motores síncronos tienen como particularidad que la velocidad de rotación del motor se entrelaza o sincroniza con la frecuencia del sistema, de ahí su nombre. El campo magnético del devanado de excitación apunta en la dirección en que gira el rotor (Es común llamar en una máquina síncrona al estator devanado de armadura o inducido y al estator devanado de campo o excitación). Ahora, la tasa de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la ecuación:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (1.1)$$

Donde f_e = frecuencia eléctrica en Hz.

n_m = Velocidad mecánica del campo magnético en r/min.

P = número de polos.

Debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica del sistema. Si se sabe que la frecuencia en el sistema generalmente es 60 Hz, entonces la velocidad del motor dependerá únicamente del número de polos que este tenga, como se ve al despejar de la ecuación 1.1 n_m y sustituir f_e por 60 Hz:

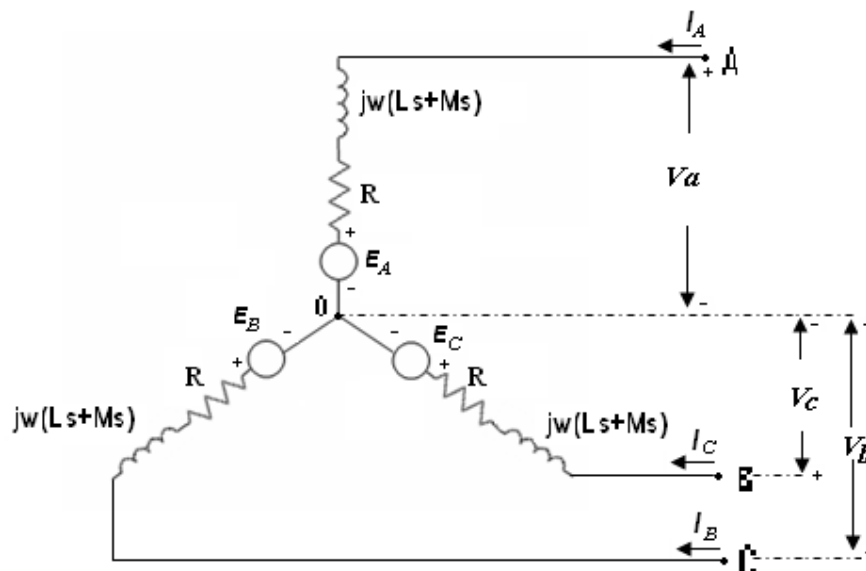
$$n_m = \frac{7200}{P} \quad (1.2)$$

Por ejemplo, si se desea que el rotor de un motor gire a 3600 r/min, debe de tener 2 polos.

1.2. Reactancia Sincrónica y circuitos equivalentes

El modelo del circuito acoplado de la figura 1 representa el devanado de armadura o inducido de un motor síncrono de rotor cilíndrico.

Figura 1. Circuito equivalente la armadura de un motor síncrono en forma fasorial

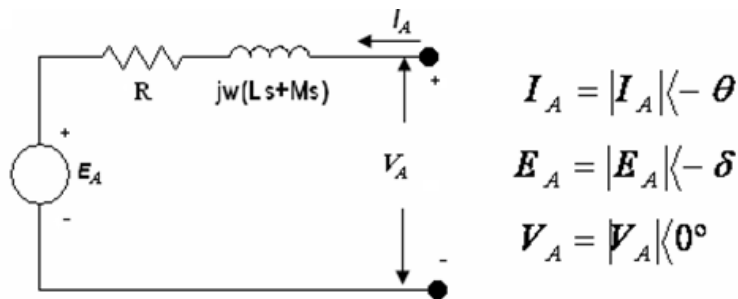


Donde L_s es la inductancia propia de las bobinas concentradas A , B y C , que es igual a las inductancias propias L_{aa} , L_{bb} , y L_{cc} ($L_s = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc}$) de los devanados distribuidos de la armadura que representan las bobinas; y M_s representa las inductancias mutuas L_{ab} , L_{bc} , L_{ca} entre cada par adyacente de bobinas.

Suponga que la máquina está rotando a velocidad sincrónica ω_{sinc} y que la corriente de campo I_f es de corriente directa estable. Bajo estas condiciones, el circuito trifásico balanceado de la figura 1 da el estado estable de operación de la máquina.

Al seleccionar la fase A como la referencia en la máquina, se obtiene el circuito equivalente monofásico de la figura 2, con corrientes y voltajes sinusoidales de estado estable que adelantan a sus correspondientes corrientes y voltajes en las fases B y C, en 120° y 240° respectivamente.

Figura 2. Circuito equivalente para la fase A de una máquina sincrónica.



De este circuito equivalente se puede obtener la siguiente ecuación fasorial

$$V_A = E_A + RI_A + j\omega L_S I_A + j\omega M_S I_A \quad (1.3)$$

Cuando la corriente del inducido I_A adelanta al voltaje del inducido V_A el ángulo θ es numéricamente negativo; y cuando I_A atrasa a V_A el ángulo θ es numéricamente positivo. La ecuación anterior se repite para las fases B y C, puesto que se aplican condiciones simétricas. La cantidad combinada $\omega(L_s + M_s)$, tiene las dimensiones de reactancia y es costumbre llamarla *reactancia sincrónica o de dispersión* X_d de la máquina. La *impedancia sincrónica o de dispersión* Z_d de la máquina se define por

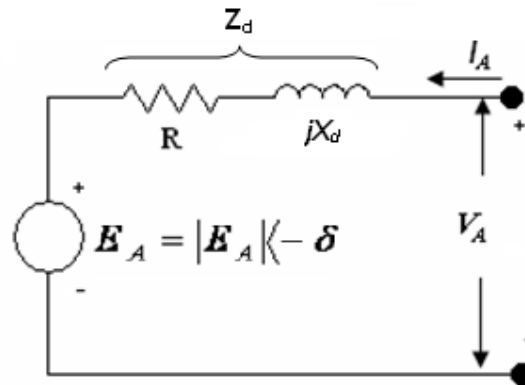
$$Z_d = R + j\omega(L_s + M_s) = R + jX_d \quad (1.4)$$

Y entonces la ecuación 1.3 se puede escribir de forma más compacta como

$$V_A = E_A + RI_A + jI_A X_d \quad (1.5)$$

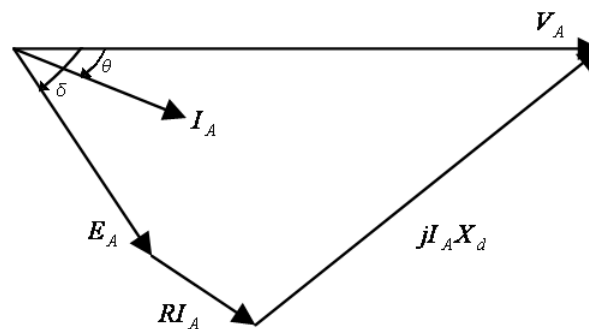
De la cual se obtiene el circuito equivalente del motor mostrado en la figura 3.

Figura 3. **Circuito Equivalente para el motor síncrono con impedancia síncrona constante**



Y a continuación se muestra el diagrama fasorial correspondiente a un motor, con factor de potencia en atraso con respecto al voltaje en terminales. Observe que E_A siempre atrasa a V_A para el motor (δ siempre será negativo para el motor).

Figura 4. **Diagrama Fasorial de un motor subexcitado alimentándose de una corriente I_A en atraso.**

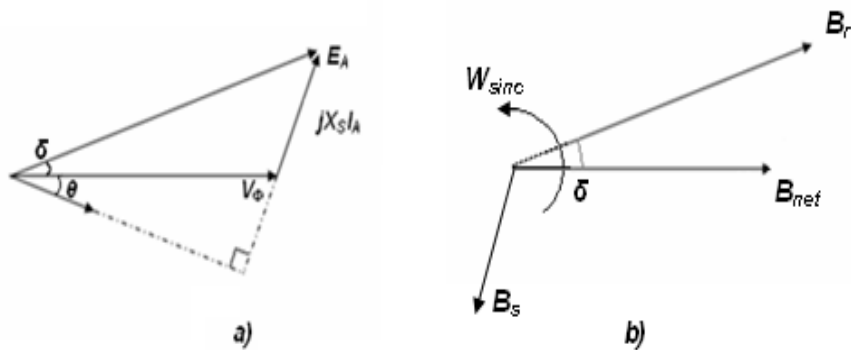


1.3. Motores síncronos desde la perspectiva del campo magnético

Para comenzar a entender la operación de un motor síncrono, es preciso dar una mirada a un generador síncrono conectado a un bus infinito. El generador tiene un motor primario que gira el eje y causa que éste rote. La dirección del par aplicado del motor primario sigue la dirección del movimiento porque el motor primario hace que el generador gire.

En la figura 5a se muestra el diagrama fasorial de un generador que opera con una corriente de campo grande y en la figura 5b se puede ver el diagrama del campo magnético correspondiente.

Figura 5. a) Diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en atraso. b) El diagrama de campo magnético correspondiente.



Como se describió anteriormente, B_R produce E_A , B_{net} produce V_ϕ y B_s produce $E_{estat} (=jX_{sI_A})$. La rotación tanto del diagrama de campo magnético como del diagrama fasorial es en sentido contrario al de las agujas del reloj en la figura 5.

El par inducido se puede calcular a partir del diagrama de campo magnético. Entonces el par inducido esta dado por

$$\tau_{ind} = kB_R x B_{net} \quad (1.6)$$

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} sen\delta \quad (1.7)$$

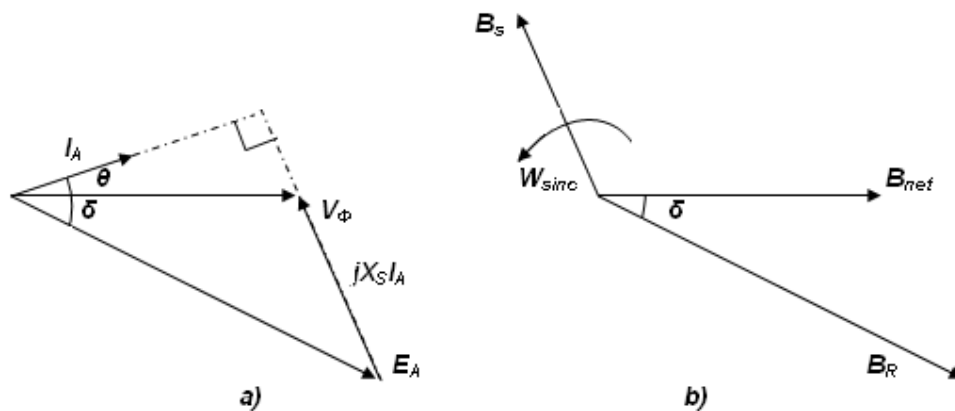
Donde K = constante que representa la construcción de la maquina.

δ = Angulo de par de la máquina.

Y a partir de el diagrama de campo magnético de la figura 5b se puede ver que el par inducido en la máquina es positivo, en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario al par aplicado en el eje. Esto quiere decir que el par inducido τ_{ind} , en una máquina síncrona en operación generador, es contrario al par aplicado τ_{ap} . Ahora suponga que la potencia mecánica en el eje se deja de aplicar, lo que esto provoca es que la velocidad del rotor disminuya. Si la velocidad del rotor disminuye, también disminuirá progresivamente la velocidad de rotación de B_R hasta llegar a quedar atrás de B_{net} . Como se aprecia en la figura 1-10b. Cuando esto sucede la operación de la máquina cambia drásticamente. De la ecuación 1.6 se puede ver que si B_R esta detrás de B_{net} entonces el resultado de la ecuación será negativo. O sea que la dirección de τ_{ind} será en contra de las agujas del reloj y en la misma dirección que el movimiento de la máquina, la cual en ese preciso momento comienza a funcionar como motor. El ángulo del par δ en incremento tiene como resultado un par cada vez más grande en dirección de la rotación, hasta que a la larga el par inducido del motor es igual al par de la carga en su eje. Ahora la máquina opera en estado estable y a velocidad síncrona como motor.

El diagrama fasorial correspondiente a la operación como generador se muestra en la figura 5a y el diagrama fasorial correspondiente de la operación como motor se puede apreciar en la figura 6a. La razón de que la cantidad $jX_S I_A$ apunte de V_ϕ a E_A en el generador y de E_A a V_ϕ en el motor, es porque se invirtió el sentido de la corriente I_A en la definición del circuito equivalente de un motor.

Figura 6. a) Diagrama fasorial de un motor síncrono. b) Diagrama de campo magnético correspondiente.



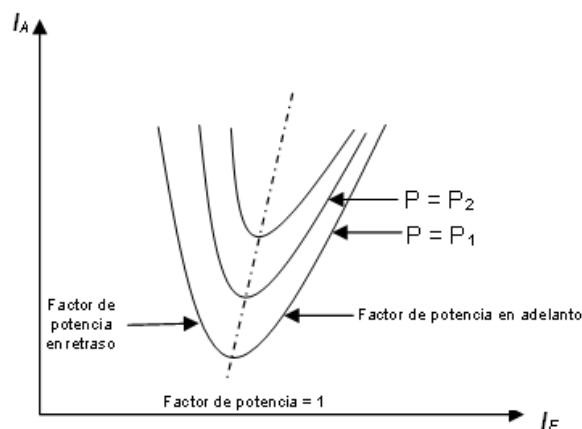
1.4. Operación de un motor síncrono en estado estable

1.4.1. Curva característica par-velocidad de los motores síncronos

Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Es normal que estén conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, por lo que los sistemas de potencia parecen buses infinitos para los motores.

Esto quiere decir que el voltaje en terminales y la frecuencia del sistema serán constantes sin importar la cantidad de potencia que consume el motor. La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, por lo que la velocidad del motor será constante sin importar la carga. En la figura 7 se muestra la curva característica par-velocidad. La velocidad en estado estable del motor es constante desde el vacío hasta el par máximo que el motor puede suministrar (llamado par máximo), por lo que la regulación de velocidad del motor será 0%. No habrá ninguna variación de la velocidad en el motor.

Figura 7. a) Característica par-velocidad del motor sincrónico.



Si el par inducido está dado por la ecuación

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{net} \quad (1.6)$$

O bien

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi} E_A \text{sen}\delta}{\omega_m X_d} \quad (1.8)$$

El par máximo que se presenta cuando $\delta = 90^\circ$. Sin embargo, los pares normales a plena carga son mucho menores que éste. De hecho, el par máximo es por lo regular tres veces el par de la máquina a plena carga.

Cuando el par en el eje de un motor síncrono excede el par máximo, el rotor no puede seguir unido al campo magnético del estator y al campo magnético neto. En cambio, se comienza a retrasar con relación a ellos. Conforme el rotor pierde velocidad, el campo magnético del estator “lo rebasa” varias veces y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada rebase. El enorme par resultante oscila primero hacia un lado y luego hacia otro y provoca que todo el motor vibre con fuerza. La pérdida de sincronización una vez que se excede el par máximo se conoce como deslizamiento de polos.

El par máximo del motor esta dado por

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi} E_A}{\omega_m X_d} \quad (1.9)$$

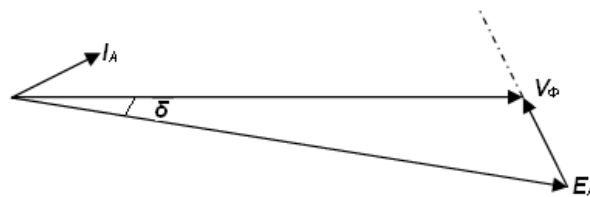
Esta ecuación indica que mientras más grande sea la corriente de campo (y por lo tanto E_A) más grande será el par máximo del motor. Por lo tanto, hay una ventaja en la estabilidad cuando se opera el motor con una gran corriente de campo o un gran E_A .

1.4.3. Efecto de los cambios de carga

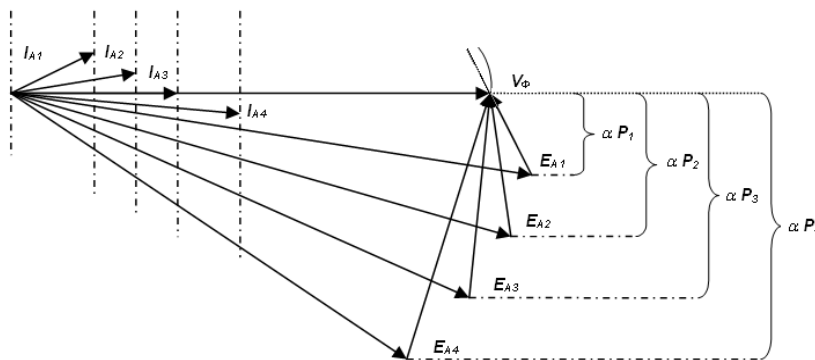
Si se fija una carga al eje de un motor síncrono, el motor desarrollará suficiente par como para mantener el motor y su carga a velocidad síncrona. ¿Qué pasa si la carga en un motor síncrono cambia?

Para encontrar la respuesta a esta pregunta, examínese un motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en adelanto, tal como se muestra en la figura 8. Si se incrementa la carga en el eje del motor, el rotor comenzará a perder velocidad. Conforme pierde velocidad, el ángulo del par δ se hace más grande y se incrementa el par inducido. Este incremento en el par inducido a la larga acelera de nuevo el motor y éste vuelve a girar a velocidad síncrona, pero con un ángulo de par δ más grande.

Figura 8. a) Diagrama fasorial de un motor que opera con un factor de potencia en adelanto. b) Efecto de incrementar la carga en la operación de un motor síncrono.



a)



b)

¿Cuál es la forma del diagrama fasorial durante este proceso? Para encontrar la respuesta a esta pregunta, examínese las restricciones sobre la máquina durante un cambio en la carga.

La figura 8a muestra el diagrama fasorial del motor antes de que se incrementen las cargas. El voltaje interno generado E_A es igual a $K\Phi\omega$ y, por lo tanto, sólo depende de la corriente de campo en la máquina y de la velocidad de ésta. La velocidad está restringida a ser constante en función de la fuente de potencia de entrada y, debido a que no se ha tocado el circuito de campo, también es constante la corriente de campo. Por lo tanto $|E_A|$ debe ser constante aun cuando la carga varía. Se incrementarán las distancias proporcionales de la potencia ($E_A \sin \delta$ e $I_A \cos \theta$), pero la magnitud de E_A debe ser constante. Conforme varía la carga, E_A se mueve hacia abajo pero su magnitud no cambia, como se muestra en la figura 8b. Conforme E_A se mueve hacia abajo cada vez más, se debe incrementar la cantidad $jX_S I_A$ para llegar de la punta de E_A hasta V_ϕ y, por lo tanto, también se incrementa la corriente en el inducido I_A . Nótese que el ángulo θ del factor de potencia también cambia, cada vez está menos en adelanto y más en retraso.

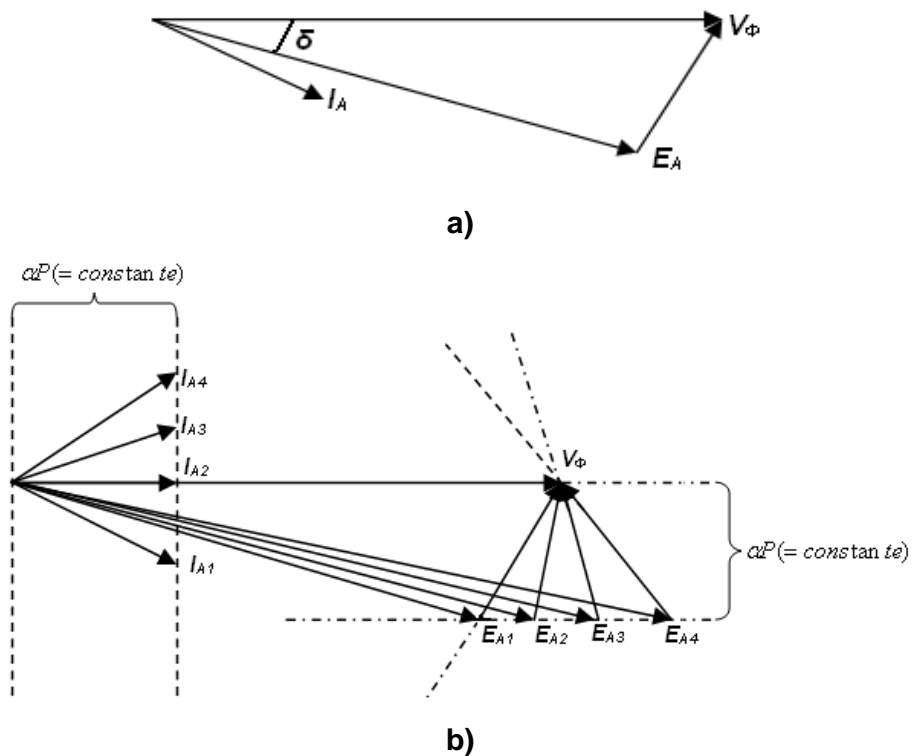
1.4.3. Efecto de cambios en la corriente de campo en los motores síncronos

Se ha estudiado cómo un cambio en la carga en el eje de un motor síncrono afecta al motor. Hay otra cantidad en un motor síncrono que se puede ajustar: su corriente de campo. ¿Qué efecto tiene un cambio en la corriente de campo en un motor síncrono?

Para encontrar la respuesta a esta pregunta, examínese la figura 9. La figura 9a muestra un motor síncrono que opera inicialmente con un factor de potencia en retraso. Ahora, increméntese su corriente de campo y obsérvese el resultado en el motor.

Nótese que un incremento de la corriente de campo incrementa la magnitud de E_A , pero no afecta la potencia real suministrada por el motor. La potencia suministrada por el motor sólo cambia cuando cambia el par en la carga del eje. Puesto que un cambio en I_f no afecta la velocidad del eje n_m y debido a que la carga en el eje no cambia, la potencia real suministrada no cambia. Por supuesto, V_ϕ también es constante debido a que la fuente de potencia que alimenta el motor lo mantiene constante. Las distancias proporcionales a la potencia en el diagrama fasorial ($E_A \text{sen} \delta$ e $I_A \text{cos} \theta$) deben permanecer constantes.

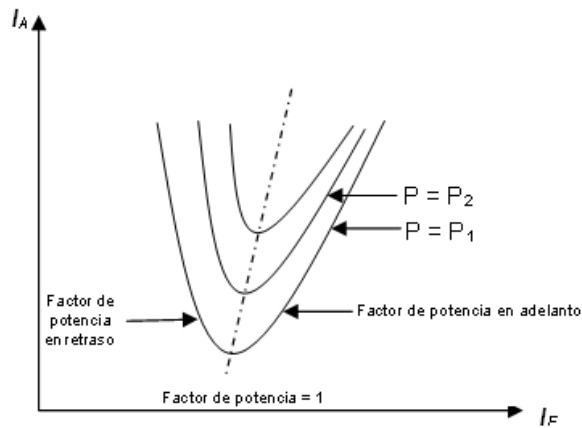
Figura 9. a) Motor que opera con factor de potencia en atraso. b) Efecto del incremento en la corriente de campo.



Nótese que conforme se incrementa el valor de E_A , la magnitud de la corriente en el inducido I_A primero disminuye y luego se incrementa de nuevo. Con un E_A bajo, la corriente en el inducido está en retraso y el motor es una carga inductiva. Actúa como una combinación de inductor y resistor y consume potencia reactiva Q . Conforme se incrementa la corriente de campo, la corriente en el inducido a la larga se alinea con V_ϕ y el motor permanece puramente resistivo. Si se incrementa la corriente de campo aún más, la corriente en el inducido está en adelanto y el motor se vuelve una carga capacitiva. Ahora actúa como una combinación de capacitor y resistor, consume potencia reactiva negativa $-Q$ o, alternativamente, suministra potencia reactiva al sistema.

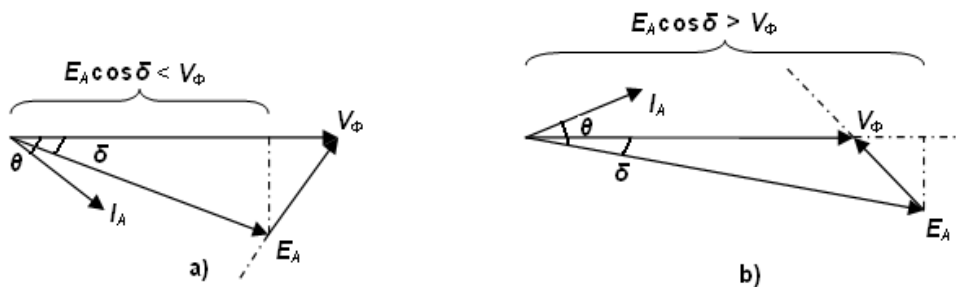
En la figura 10 se muestra una gráfica de I_A e I_F de un motor síncrono. Esta gráfica se llama: “curva V del motor síncrono”. Hay muchas curvas V que corresponden a diferentes valores de potencia real. Para cada curva, la corriente mínima del inducido se presenta con un factor de potencia unitario cuando sólo se suministra al motor potencia real. En cualquier otro punto de la curva se suministra alguna cantidad de potencia reactiva, ya sea al motor o desde el motor. Para corrientes de campos menores que el valor que resulta en la mínima I_A , la corriente del inducido está en retraso y consume Q . Para corrientes de campo mayores que el valor que resulta en la mínima I_A , la corriente del inducido está en adelanto y suministra Q al sistema de potencia como la haría un capacitor. Por lo tanto, si se controla la corriente de campo de un motor síncrono, se puede controlar la potencia reactiva suministrada a, o consumida por, el sistema de potencia.

Figura 10. **Curvas V de un motor síncrono**



Quando la proyección del favor E_A sobre V_ϕ ($E_A \cos \delta$) es más corta que V_ϕ , el motor síncrono tiene una corriente en atraso y consume Q. Debido a que la corriente de campo es pequeña en esta situación, se dice que el motor está subexcitado. Por otro lado, cuando la proyección de E_A sobre V_ϕ ($E_A \cos \delta$) es más larga que V_ϕ , el motor síncrono tiene una corriente en adelanto y suministra Q al sistema de potencia. Debido a que la corriente de campo es grande en esta situación, se dice que el motor esta sobreexcitado. En la figura 11 se muestran los diagramas fasoriales que ilustran estos conceptos.

Figura 11. a) Diagrama fasorial de un motor síncrono subexcitado, b) Diagrama fasorial de un motor síncrono sobreexcitado



2 ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS

2.1. Introducción

Un motor síncrono es una máquina eléctrica de corriente alterna, la cual se caracteriza porque su rapidez bajo condiciones de estado estacionario es proporcional a la frecuencia de la corriente que lleva en su inducido o armadura. Esto quiere decir que el motor funciona a velocidad síncrona, el problema es llevar a la máquina a dicha velocidad.

Una máquina sincrónica no tiene par de arranque. Por lo tanto, en general se fabrican de forma de que pueda desarrollar un suficiente par de inducción para el arranque por medio de jaulas auxiliares, hasta una velocidad próxima al sincronismo en la que la corriente de excitación desarrolle un par de sincronización conveniente.

El comportamiento dinámico del conjunto motor-máquina accionada está regido por la siguiente ecuación diferencial:

$$T_m - T_r = J \bullet \frac{dw}{dt} \quad (2.1)$$

Donde T_m es el par motor, T_r el par resistente, J es el momento de inercia del conjunto motor-maquina accionada y w es la velocidad angular de dicho conjunto. Por lo tanto, para que el conjunto comience a girar se necesita que el par motor supere al par resistente, de manera de generar una aceleración angular de arranque.

El proceso de arranque finaliza cuando se equilibra el par motor con el par resistente, estabilizándose la velocidad de giro del motor. Es decir que el par de arranque será superior al par nominal y para que esto suceda se necesita una corriente de arranque superior a la nominal.

Si el motor arranca a plena carga, el bobinado tiende a absorber una cantidad de corriente muy superior a la nominal, lo que hace que las líneas de alimentación incrementen considerablemente su carga y como consecuencia directa se produzca una caída de tensión. La intensidad de corriente durante la fase de arranque puede tomar valores entre 5 a 6 veces mayores que la corriente nominal del motor, esto depende plenamente de las características físicas del motor.

2.2. Características par motor-velocidad de cargas mecánicas

Un aspecto importante a analizar al momento de un arranque es la carga mecánica conectada al rotor del motor, ya que para un sistema dotado de movimiento de rotación se puede decir que,

$$P = \tau \cdot \omega \quad (2.2)$$

Donde:

P = Potencia

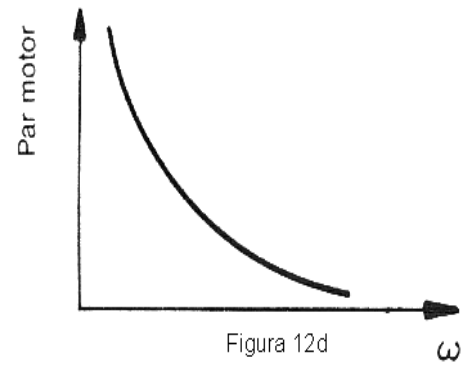
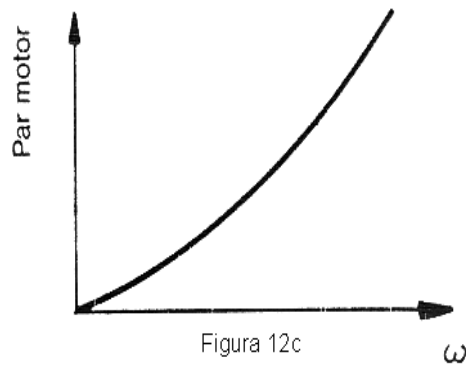
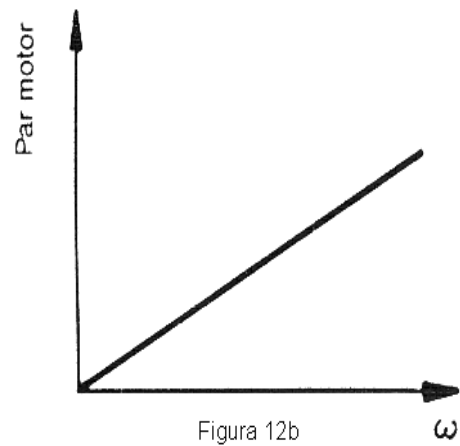
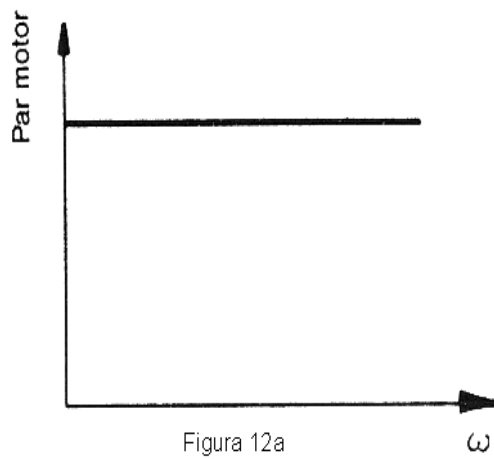
τ = Par

ω = Velocidad angular del movimiento

Entonces se puede decir que, tal carga necesita de un par dado τ a una velocidad dada de rotación.

Matemáticamente existen infinitas combinaciones de τ y ω de modo que den el mismo valor de P; sin embargo, físicamente, una carga mecánica específica esta asociada a una único par.

Figura 12. Tipos de cargas mecánicas



En función de sus características de par-velocidad, se pueden dividir las cargas mecánicas en 4 grandes grupos:

1. Par constante, prácticamente independiente de la rotación (Figura 12a), Ejemplo: grúas, transportadoras de correas bajo carga constante.
2. Par que varía linealmente con la rotación, (Figura 12b). Ejemplo: molinos de rodillos, bombas de pistón, cepillos y sierras para madera.
3. Par que varía con el cuadrado de la velocidad rotación o variación parabólica (Figura 12c). Ejemplo: ventiladores, mezcladoras, centrifugadoras, bombas centrifugas, bombas de vacío, compresores.
4. Par que varía inversamente con la rotación (Figura 12d). Ejemplo: herramientas tales como las fresadoras.

Veamos nuevamente la figura 12a, se puede observar que para este tipo de carga se necesita una velocidad constante y un par constante, características principales de un motor síncrono, debido a esto es lógico que esta sea la aplicación principal de dichos motores, teniendo lugar principalmente en minas donde las bandas transportadoras y amoladoras son parte esencial del proceso de extracción de materiales.

2.3. ¿Por qué un motor síncrono no tiene par de arranque?

En la actualidad, en su gran mayoría, los motores utilizados en la industria son motores de inducción o asíncronos. El punto débil de los motores síncronos estriba en la dificultad que presenta el arranque. En efecto, por su propia definición el motor síncrono sólo puede producir par a velocidad sincrónica. Esto implica que, en reposo, justo en el momento del arranque, el par del motor es cero.

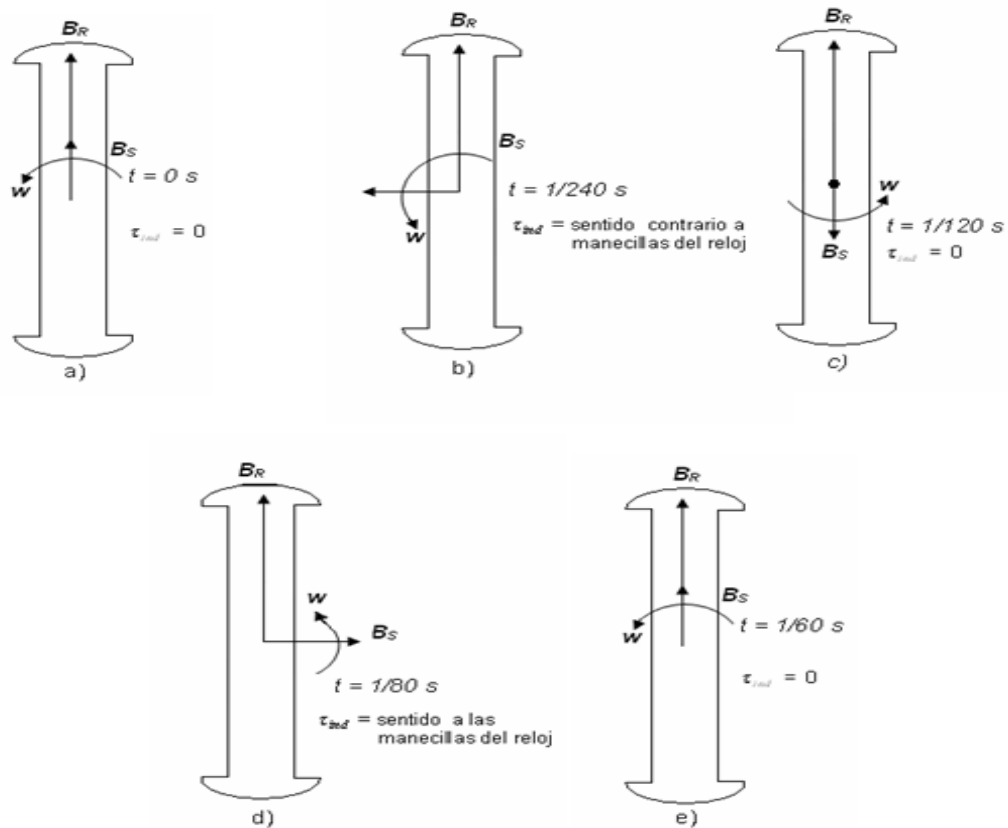
Para entender el problema de arranque, véase la figura 13. Ésta muestra un motor síncrono a 60Hz en el momento en que se aplica potencia a los devanados del estator o inducido. El devanado de campo o rotor está estacionario y, por lo tanto, el campo magnético B_R también. El campo magnético del inducido B_S comienza a girar dentro del motor síncrono a velocidad síncrona.

La figura 13a muestra la máquina en el tiempo $t = 0$ s, cuando B_R y B_S están perfectamente alineados. Con la ecuación del par inducido

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{net} \quad (1.6)$$

ó
$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \text{sen} \delta \quad (1.7)$$

Figura 13. Par de arranque de un motor síncrono



El par inducido en el eje del rotor es cero ya que $\text{sen } 0^\circ = 0$. En la figura 13b se observa la situación en el tiempo $t = 1/240$ s. En tan corto tiempo el rotor apenas se ha movido, pero el campo magnético del estator apunta ahora hacia la izquierda. Con la ecuación del par inducido, el par en el eje del rotor ahora tiene un sentido contrario a las manecillas del reloj. La figura 13c muestra la situación en el tiempo $t = 1/120$ s. En ese momento B_R y B_S están apuntando en direcciones opuestas y el par inducido es igual a cero una vez más ($\text{sen } 180^\circ = 0$). En el tiempo $t = 1/80$ s. El campo magnético del estator apunta hacia la derecha y el par resultante es en sentido al de las manecillas del reloj como se ve en la figura 13d.

Por último, en $t = 1/60$ s, el campo magnético del estator está nuevamente una vez más con el campo magnético del rotor y $\tau_{ind} = 0$. Durante un ciclo eléctrico, el par pasó de tener una dirección en sentido opuesto al de las manecillas del reloj a tener una dirección en el sentido de las manecillas del reloj y el par promedio durante el ciclo completo es cero. Lo que sucede con el motor es que vibra muy fuerte con cada ciclo eléctrico y finalmente se sobrecalienta.

Dicho de otra forma, el motor síncrono sólo puede funcionar como tal, cuando por medio de un procedimiento auxiliar en el arranque sea llevado previamente a la velocidad de sincronismo.

2.4. Métodos de arranque para un motor síncrono

Existen tres métodos para arrancar de manera segura un motor síncrono o mejor dicho, para llevar a la velocidad síncrona el motor:

1. Arranque a frecuencia reducida: Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semiciclo de la rotación del campo magnético. Esto se puede lograr con una reducción de la frecuencia de de la potencia eléctrica aplicada. Hace algún tiempo, el hecho de encontrar una fuente de frecuencia variable representaba un problema muy complicado y por lo tanto el método no era muy usado. Sin embargo, en la actualidad eso ha cambiado; ahora existen los inversores-rectificadores y los ciclo-convertidores, que se pueden utilizar para convertir una frecuencia de entrada a cualquier frecuencia deseada. Con el desarrollo de estos accionadores de estado sólido tan modernos es perfectamente posible controlar continuamente la frecuencia eléctrica aplicada al motor desde una fracción de hertz hasta por arriba de la nominal.

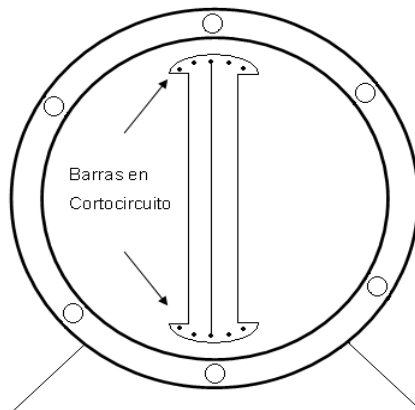
2. Arranque por motor auxiliar: Se utiliza un motor primario externo para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Luego se apaga o desconecta el motor principal, cuando esto sucede la máquina se frena y el campo magnético del rotor B_R se atrasa con respecto a B_{net} y la máquina síncrona empieza a comportarse como motor. Es un poco complicado y además implica los costos extras de un primotor y su mantenimiento. Este método es poco usado y es necesario solamente cuando la parte del sistema en el que se pretende conectar el motor no permite elevadas corrientes de arranque.

3. Arranque asíncrono: En este caso la máquina se arranca como motor asíncrono utilizando los devanados amortiguadores. Definitivamente la técnica más utilizada para el arranque de motores síncronos es la utilización de estos devanados de amortiguamiento ya que es un método económico y sencillo a la vez. Por tal razón, ahondaremos más en este método a continuación.

2.5. Arranque asíncrono o con devanados de amortiguamiento

Los devanados de amortiguamiento son unas barras especiales dispuestas de ranuras labradas en la cara del rotor de un motor síncrono y en cortocircuito en cada extremo con un gran anillo en cortocircuito.

Figura 14. Diagrama simplificado de una máquina con dos polos salientes que muestra los devanados de amortiguamiento



Para entender lo que un conjunto de devanados de amortiguamiento causan en un motor síncrono, examínese el rotor con dos polos salientes de la figura 14. Este rotor muestra un devanado de amortiguamiento con las barras en cortocircuito en los extremos de las dos caras de los polos conectadas con alambres.

Suponga de manera inicial que el devanado de campo principal del rotor se desconecta y que se aplica un conjunto de voltajes trifásicos al estator de esta máquina. Cuando se aplica la potencia por primera vez en el tiempo $t = 0$ s, suponga que el campo magnético B_s es vertical, como se muestra en la figura 15a. Conforme el campo magnético B_s gira en dirección contraria a la de las manecillas del reloj, induce un voltaje en las barras del devanado de amortiguamiento que está dado por la ecuación

$$e_{ind} = (v \times B) \bullet l \quad (2.3)$$

Donde v = velocidad de la barra en relación con el campo magnético
 B = vector de densidad de flujo magnético
 l = longitud del conductor en el campo magnético

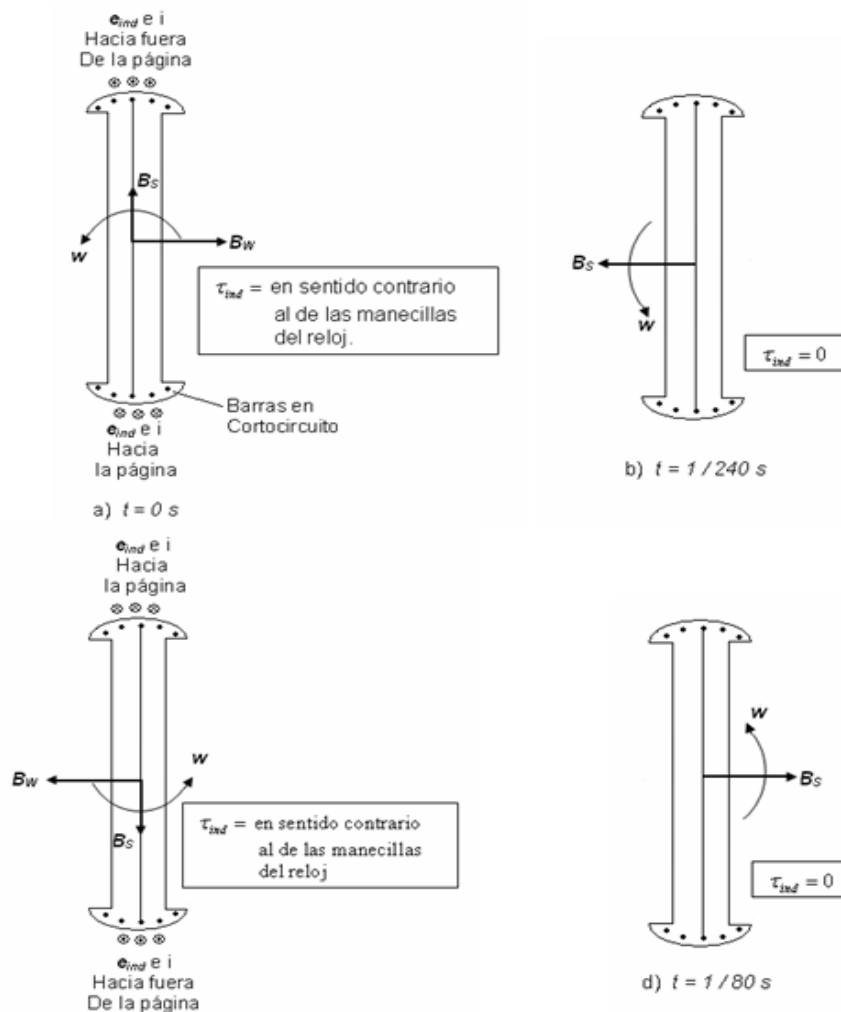
Las barras que están encima del rotor se mueven hacia la derecha en relación con el campo magnético, por lo que la dirección resultante del voltaje inducido es hacia fuera de la página. De manera similar, el voltaje inducido es hacia dentro de la página en las barras de abajo. Estos voltajes producen un flujo de corriente hacia fuera de las barras de arriba y hacia las barras de abajo, que da como resultado un campo magnético en el devanado B_w que apunta hacia la derecha. De la ecuación del par inducido

$$\tau_{ind} = kB_w \times B_s \quad (2.4)$$

El par resultante en las barras (y en el rotor) es en sentido opuesto al de las manecillas del reloj.

La figura 15b muestra la situación en $t = 1/240$ s. En este momento, el campo magnético del estator ya giró 90° , mientras que el rotor apenas se ha movido (simplemente no puede acelerar en tan corto lapso de tiempo). En este momento, el voltaje inducido en los devanados de amortiguamiento es cero, debido a que v es paralelo a B . Sin un voltaje inducido, no hay corriente en los devanados de amortiguamiento y el par inducido es cero. La figura 15c muestra la situación en $t = 1/120$ s. Ahora el campo magnético del estator ha girado 90° y el rotor aún no se ha movido.

Figura 15. Arranque con devanados de amortiguamiento.



El voltaje inducido en los devanados de amortiguamiento es hacia fuera de la página en las barras inferiores y hacia la página en las barras superiores, lo que causa que el campo magnético B_w apunte hacia la izquierda. El par inducido resultante está dado por

$$\tau_{ind} = kB_w \times B_s \quad (2.4)$$

Y va en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Por último, la figura 15d muestra la situación en $t = 1/80s$. En este momento, como en $t = 1/240 s$, el par inducido es cero.

A diferencia del análisis del arranque sin devanados de amortiguamiento, en donde el par inducido al final de un ciclo completo era cero, con devanados de amortiguamiento se tiene que aunque a veces el par inducido es cero, también a veces es en sentido opuesto al de las manecillas del reloj pero nunca en contra de las manecillas, con lo cual, al final de un ciclo completo tendremos un par neto unidireccional. Ya que hay un par neto en una sola dirección, el rotor del motor se acelera.

Entonces, se puede decir que este tipo de arranque es completamente diferente a arrancar a un motor síncrono con su corriente de campo normal, ya que en ese caso el par va primero en el sentido de las manecillas del reloj y luego en sentido opuesto al de las manecillas del reloj, con un promedio cero. En este caso, el par siempre va en la misma dirección, por lo que el promedio del par es diferente de cero.

Aun cuando se acelera el rotor del motor, nunca alcanza por completo velocidad síncrona. Esto es debido a que si la máquina funciona a velocidad síncrona el campo magnético del estator B_S gira a la misma velocidad que el rotor con lo cual el movimiento relativo entre ellos es cero, esto quiere decir que si no hay movimiento entre ellos tampoco puede haber inducción en los devanados y por lo tanto no hay ni corriente, ni par inducido que mantenga en movimiento la máquina. Entonces el rotor no podrá acelerar hasta la velocidad síncrona pero sí puede acercarse a ella. Se debe acercar lo suficiente a n_{sinc} como para que se genere corriente de campo regular y el rotor gire al ritmo de los campos magnéticos del estator.

En una máquina real los devanados de campo no están en circuito abierto durante el procedimiento de arranque. Si los devanados de campo estuvieran en circuito abierto, entonces se producirían voltajes demasiado altos en ellos durante el arranque. Si los devanados de campo están en cortocircuito durante el arranque, no se producen voltajes peligrosos y la corriente de campo inducida contribuye con un par de arranque extra para el motor.

En resumen, si una máquina tiene devanados de amortiguamiento, se puede encender siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

1. Desconectar los devanados de campo de su fuente de potencia corriente directa y que estén en cortocircuito.
2. Aplicar un voltaje trifásico al estator del motor y dejar que el motor acelere hasta llegar casi a velocidad síncrona. El motor no debe tener ninguna carga en su eje para que su velocidad se pueda aproximar tanto como sea posible a n_{sinc} .

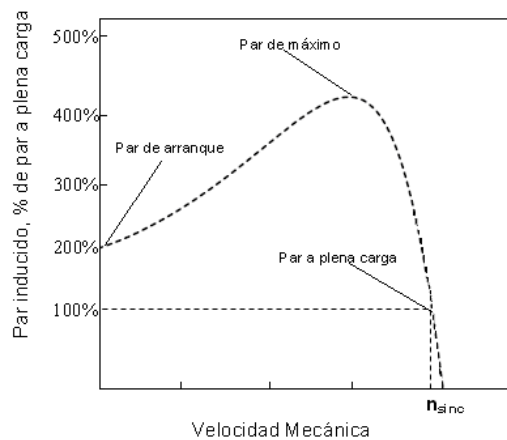
3. Conectar el circuito de campo a su fuente de potencia. Una vez que esto se lleva a cabo, el motor se fija a velocidad síncrona y se le pueden añadir cargas a su eje.

2.6. Tipos de arranques asíncronos

2.6.1. Arranque directo

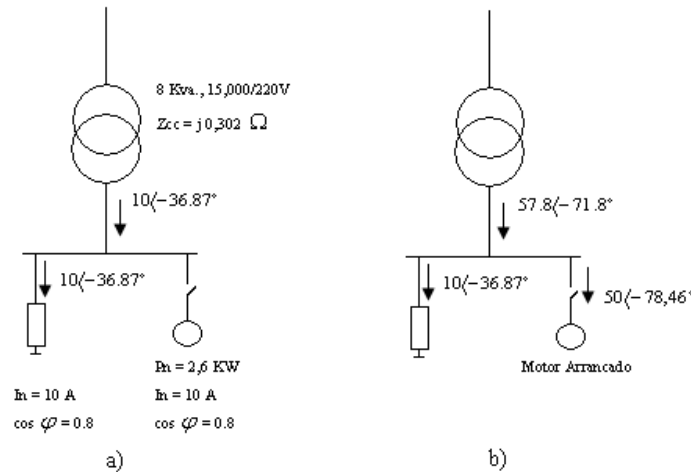
Debido a que el motor síncrono se arranca transformándolo en un motor asíncrono o de inducción, el comportamiento en el arranque y los métodos de arranque son los mismos que para un motor de inducción.

Figura 16. Curva característica de un motor de inducción



Una de las características principales de este arranque, es que cuando el motor se conecta directamente a su tensión asignada éste produce un elevado par de arranque, que es típicamente de 1,4 a 2 veces el par de plena carga, como se ve en la figura 15. La contrapartida de este elevado par de arranque es doble: por una parte el valor eficaz de la corriente de arranque I_a que el motor absorbe de la red es muy elevada (de 5 a 6 veces la asignada); por otra, su factor de potencia es muy bajo (típicamente 0,20 a 0,30 en retraso).

Figura 17. Características de arranque directo



Para justificarlo basta con tener en cuenta que el motor se encuentra en reposo y de acuerdo con el circuito equivalente de el motor, la intensidad queda limitada básicamente por las resistencias y reactancias de dispersión de estator y rotor, que además de tener un valor relativamente pequeño tiene una componente inductiva elevada. La impedancia de entrada del motor a rotor está comprendida entre 0,16 y 0,22 p.u. y tiene una relación X/R entre 15 y 25, según la potencia del motor.

Estas características de arranque directo del motor pueden ocasionar perturbaciones inadmisibles en el funcionamiento global de la red. Imagine una red de distribución constituida por varios usuarios conectados al secundario de una transformador, con las potencias indicadas en la figura 17a. En funcionamiento normal, la corriente total consumida, de 10 A, con un factor de potencia de 0,8, produce una caída de tensión en la impedancia de cortocircuito del transformador de un 3%, perfectamente admisible. Pero si el motor **M** se arranca por conexión directa en la red (figura 17b), la corriente total en el momento inmediatamente posterior a la conexión pasa a ser 57.8 A con un factor de potencia de 0,31 en retraso. En estas condiciones la caída de tensión en el transformador pasa a ser del 13,1%, de modo que la tensión en el punto común de conexión con los restantes consumidores se ha reducido al 86,9 %.

La situación en realidad podría ser peor, ya que si las demás cargas están construidas fundamentalmente por motores eléctricos, éstos se comportan durante el disturbio como cargas de potencia constante, y por lo tanto, ante una bajada de tensión, consumen más corriente lo que agrava la situación. Si la caída de tensión es excesiva, puede provocarse la parada de alguno de estos motores o la desconexión por actuaciones de los relés de mínima tensión. Es por tal razón que se han desarrollado varios tipos de arranque asíncronos, los cuales se presentan a continuación.

2.6.2. Arranque con autotransformador

Este método, que define la filosofía del arranque a tensión reducida, consiste en intercalar un autotransformador reductor entre la red de alimentación y el motor durante el proceso de arranque. Una vez acelerado el motor, el autotransformador se eliminará y el motor queda conectado directamente en la red. El esquema de conexión se muestra en la figura 18.

En la primera posición de arranque se aplica al motor la tensión reducida del autotransformador y una vez el motor en las proximidades de su velocidad de régimen se le conecta a la plena tensión de la red quedando el autotransformador en vacío. Un esquema usado para el arranque por autotransformador para motores de gran potencia es el que muestra la siguiente figura, conocido por conexión Kormdorfer (Figura 19). El arranque tiene lugar en tres tiempos sin interrupción de la corriente de alimentación del motor y terminado aquel el transformador se queda sin corriente.

Figura 18. Esquema de arranque por autotransformador

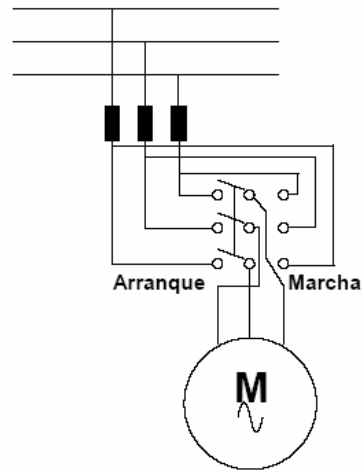
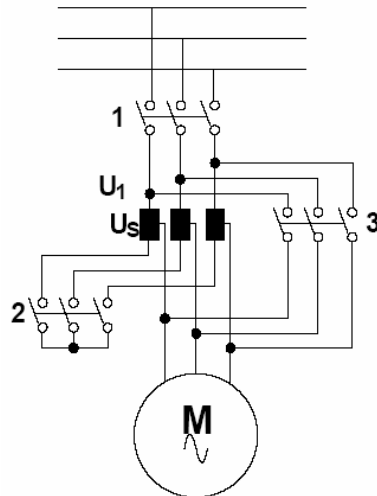


Figura 19. Conexión Kormdorfer



El proceso se desarrolla como sigue. En el primer paso se cierran los interruptores 1 y 2, aplicándose al motor la tensión reducida secundaria U_s proveniente del autotransformador. En el segundo tiempo, que se introduce cuando el motor esta ya en las proximidades de la plena marcha, se abre el interruptor 2, con lo cual el autotransformador como tal quedará fuera de servicio y el motor bajo una tensión igual a la de la red menos la caída de tensión reactiva en las espiras primarias del autotransformador intercaladas en serie con el motor, que proporciona una tensión en bornes del motor intermedia entre la secundaria del autotransformador U_s y la de la red U_1 .

Y en el tercer tiempo, unos segundos después del anterior, se cierra el interruptor 3, que cortocircuita las espiras anteriores y el motor queda alimentado a la plena tensión de la red U_1 .

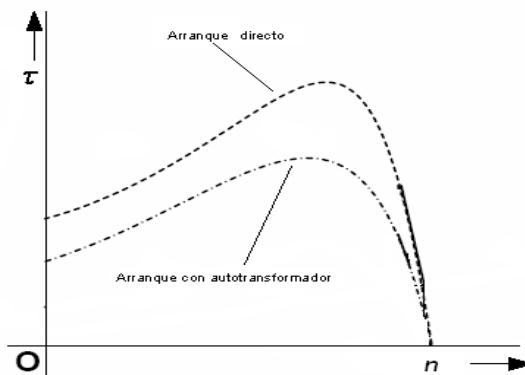
Entonces es importante ver que la tensión y la corriente en el motor se reducen con este arranque en proporción a la relación de transformación a de la siguiente manera:

$$U_{motor} = \frac{U_{red}}{a} \quad (2.5)$$

$$I_{motor} = \frac{I_{arranquedirecto}}{a} \quad (2.6)$$

A continuación se muestra el comportamiento de la curva par-velocidad en arranque directo comparado con el arranque con autotransformador.

Figura 20 Curva par-velocidad del arranque con autotransformador y directo



Los mismos resultados se obtendrían con transformador en lugar de autotransformador. Se emplea este último precisamente por razones de tipo económico, ya que se trata de una inversión que sólo se utiliza como equipo auxiliar en el momento del arranque. De hecho, en el caso de grandes instalaciones con motores de gran potencia y características similares se aprovecha el mismo autotransformador para arrancar en forma secuencial los motores, cuando no es necesario el arranque simultáneo.

Por otra parte, el hecho de que el autotransformador sólo actúe un período muy breve, permite asignarle un tipo de servicio de corta duración, lo que se traduce en la práctica en la asignación de una potencia nominal menor (*derating*), teniendo en cuenta la curva de calentamiento y la inercia térmica del equipo.

Desde un punto de vista económico, el conjunto de aparatos de maniobra y relés de temporización que aparte del autotransformador se requieren en este tipo de arranque, hacen que este método sea de precio relativamente elevado comparado con los arrancadores por resistencias, por lo cual solo se justifica su empleo en motores de potencias superiores a los 50 kW.

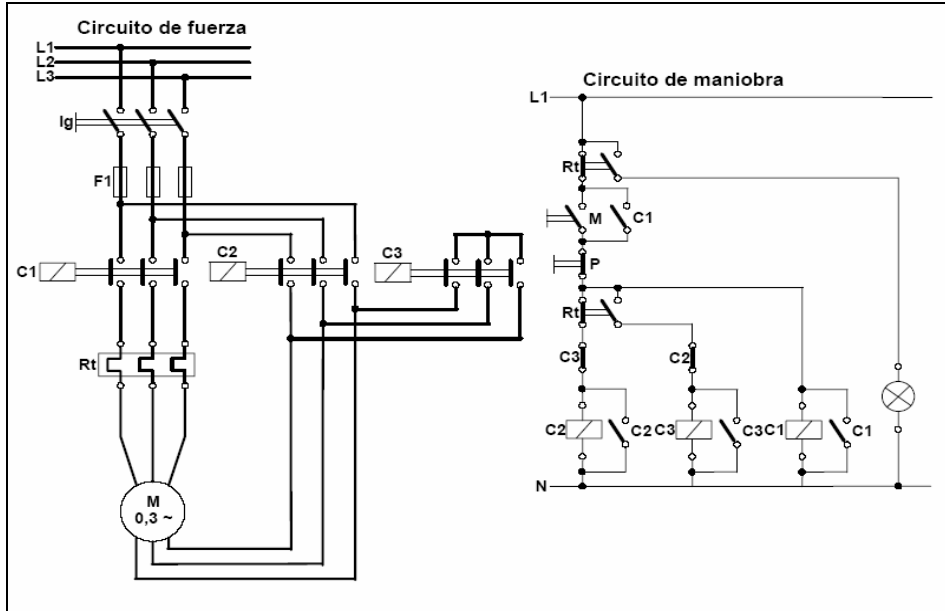
2.6.3. Arranque estrella-delta

Para que este método pueda ser aplicado, el motor debe poder funcionar en régimen permanente delta a la tensión asignada a la red, U_{red} . Esto quiere decir que el motor deberá tener accesibles, en su caja de bornes las seis terminales correspondientes a las fases del estator, para su conexión en delta o estrella.

Esta solución no solo permite la utilización del motor con dos tensiones distintas, que estén en la relación de 1 a $\sqrt{3}$, sino también el arranque del motor normalmente previsto para trabajar con la conexión triángulo a la tensión nominal, con una tensión por fase reducida. A este propósito sabemos que U_{red} es la tensión compuesta de la red, esta será también la tensión aplicada a cada fase de motor cuando esté trabajando normalmente en triángulo. Si el mismo devanado estuviese conectado en estrella, la tensión de fase del motor sería $\sqrt{3}$ veces inferior. A base pues de un simple cambio de conexión de las fases del devanado estático, tenemos la posibilidad de reducir la tensión aplicada al motor en la puesta en marcha, limitando consecuentemente, al igual que con los métodos anteriores, el golpe de la corriente de arranque. En este simple principio esta basado el método de arranque estrella-triángulo. En el momento de arranque el devanado conectado en estrella queda sometido a una tensión por fase igual a $U_{red} / \sqrt{3}$ y cuando el motor alcanza una cierta velocidad de giro, se conecta en triángulo pasando la tensión de fase a ser igual a U_{red} . Según esto, el método es equivalente al arranque por autotransformador con una relación de transformación $a = \sqrt{3}$.

Si, mediante un juego de contactotes, como los de la figura 21, se conecta el motor en estrella durante la fase de arranque, eso equivale a aplicar a cada una de las fases una tensión $\sqrt{3}$ veces menor a la que puede soportar en condiciones normales. La corriente de cada una de las fases será por tanto $\sqrt{3}$ veces menor. Pero como además el estator está conectado en estrella, esa corriente de fase será precisamente la corriente que el motor absorbe de la red, que es precisamente la que interesa reducir. Comparando la situación con un arranque directo, la tensión se reduce $\sqrt{3}$ pero además la corriente también se reduce $\sqrt{3}$.

Figura 21. Circuito de fuerza y control para el arranque estrella-delta



Con referencia a la figura 2-11 (conexión estrella) se verifica que

$$I_{fase,Y} = \frac{U_{red}}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z_{fase}} = I_{linea,Y} = I_{arranque,Y} \quad (2.7)$$

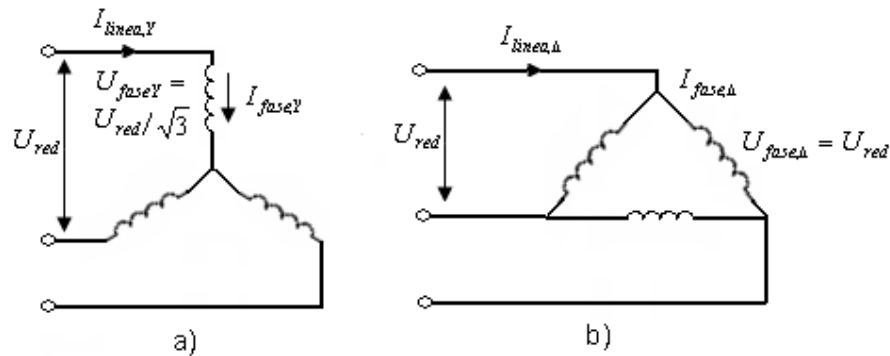
Y ahora con respecto a la figura 2-13b (conexión en triángulo):

$$I_{fase,\Delta} = \frac{U_{red}}{Z_{fase}} = \frac{I_{linea,\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{arranque,\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Comparando ambas ecuaciones se comprueba que:

$$I_{arranque,Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_{red}}{Z_{fase}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{arranque,\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{arranque,\Delta}}{3} \quad (2-9)$$

Figura 22. Proceso de reducción de corriente en el arranque estrella triángulo



Así pues, el efecto total con arranque en estrella equivale a dividir por tres la intensidad que el motor absorbe de la red.

Dado que en el fondo el método consiste en aplicar a cada fase del estator una tensión $\sqrt{3}$ veces menor, el par mecánico interno producido será 3 veces más pequeño ya que el par interno inducido es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada. El procedimiento es en todo equivalente al de arranque, mediante autotransformador de relación de transformación única $\sqrt{3}$, pero con la ventaja de que el equipo auxiliar necesario es mucho menos costoso. Sin embargo la desventaja de este arranque estriba en su bajo par de arranque (3 veces menor al nominal), por tal razón no se garantiza que el motor pueda arrancar si en su eje tiene conectada una carga con un elevado par constante. Este método se utiliza con cargas donde el par inicial es bajo y varía con el cuadrado de la velocidad rotación. Ejemplo: ventiladores, mezcladoras, centrifugadoras, bombas centrifugas, bombas de vacío, compresores.

2.6.4. Métodos de arranque por inserción de impedancia (Resistencia e Inductancia)

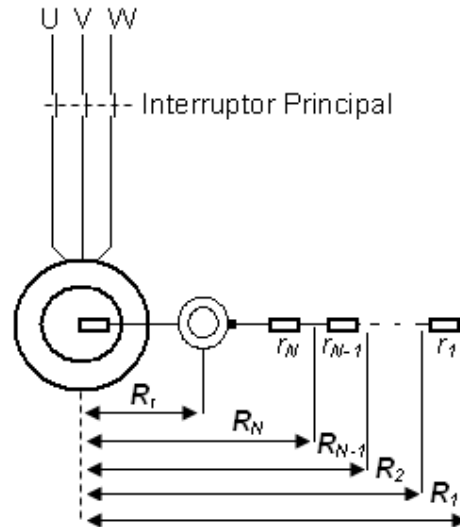
Dado que el problema de la elevada corriente de arranque del motor por medio de devanados de amortiguamiento (arranque asíncrono) deriva en última instancia del bajo valor de la impedancia que presenta el motor a la red en los instantes iniciales (así como el hecho que el factor de potencia es muy bajo), la otra alternativa consiste en incrementar la impedancia del motor durante el proceso de arranque a base de insertar una impedancia (preferiblemente una resistencia) en serie en el circuito equivalente. Esta impedancia se puede insertar en el circuito del estator o en el circuito del rotor.

En el primer caso, la impedancia externa junto a la impedancia del estator constituye un divisor de tensión, de modo que la tensión efectivamente aplicada al motor queda reducida. Hasta aquí el procedimiento sería similar a los estudiados anteriormente, sino fuera porque en este caso sólo actúa uno de los mecanismos de reducción de intensidad; a saber, y el de reducir la tensión aplicada al motor. La efectividad del proceso es por lo tanto muy limitada.

2.6.5. Métodos de arranque por inserción de resistencias rotoricas

El fundamento del método consiste en introducir un reóstato trifásico en los terminales del rotor, cuyo efecto es incrementar la resistencia de deslizamiento (propia de un motor de inducción), que en el instante inicial del arranque es cero, e ir eliminando dicho reóstato progresivamente a medida que el proceso de arranque va avanzando y el deslizamiento se va reduciendo. Para que esto sea posible es preciso tener acceso a las terminales del rotor, lo cual sólo se cumple en motores de rotor devanado. Además, de esta forma, se aumenta el factor de potencia del motor en el arranque.

Figura 23 Esquema de conexiones del arranque por resistencias rotóricas.



La forma normal de efectuar esta conexión es mediante un reóstato trifásico constituido por escalones de resistencia, cuyo esquema se muestra en la figura 22 para una sola de las fases del rotor. Cada uno de los escalones de resistencia del reóstato tiene por valor r_1, r_2, \dots, r_{N-1} . La resistencia total del circuito del rotor (reóstato más devanado) será, en cada caso, $R_1, R_2, \dots, R_{N-1}, R_r$ que es la resistencia del rotor.

Una vez eliminado todo el reóstato, el motor alcanza la velocidad de giro que corresponde al par de carga sobre la curva par-velocidad. Eligiendo adecuadamente los valores de los distintos escalones se puede conseguir que el par medio durante el proceso de arranque sea muy alto, manteniendo, en todo caso, una intensidad de estator reducida. Es por tanto el método idóneo para arranques difíciles con elevado par resistente o con cargas que tienen un momento de inercia elevado.

3. FLUJO DE CARGA

3.1. Introducción

Con la evolución de los Sistemas Eléctricos de Potencia SEP, se ha necesitado cada vez más, herramientas con la capacidad de poder procesar todas las variables contenidas en estos. Antes de los años 40s, la cantidad de interconexiones en los sistemas eléctricos era muy pequeña, por lo cual los sistemas eran predominantemente radiales. Los estudios de dichos sistemas eran, relativamente sencillos. Sin embargo, una vez que se conocieron las ventajas de las interconexiones, los SEP fueron creciendo cada vez más. Con esto los estudios requeridos se tornaron más demandantes y a la vez complicados. Afortunadamente esta evolución de los sistemas eléctricos coincidió con la llegada de la computadora digital. La primera mención de la computadora como herramienta para el calculo de flujos de potencia se remonta al año 1947 y se relaciona con el articulo titulado “Machina computations of power network performance”, AIEE Transactions, volumen 66, escrito por L.A. Dunstan. Sin embargo, el crédito por la formulación del problema con una orientación adecuada para su programación en computadora digital, se concede, generalmente, a J. Ward y H. Hale, quienes escribieron el articulo “Digital computer solutions of power flor problems” en el AIEE Transactions, volumen 75, en 1956. El sistema utilizado en este artículo es ampliamente utilizado como sistema de pruebas, para validar métodos de análisis de flujos de potencia aún hoy en día, es quizás el sistema más utilizado con ese propósito.

Pero ¿Cuál es el objetivo del estudio de flujos de potencia? El objetivo de este estudio es obtener voltajes nodales. Con estas variables conocidas, se determinará los flujos en las líneas de transmisión, y en general de los elementos del sistema de transmisión, dados los niveles de demanda y generación.

La red eléctrica se considera lineal, sin embargo es bien conocido que el modelo matemático para el estudio de flujos de potencia es no lineal; de lo anterior se debe al hecho que en su formulación se utiliza de manera explícita la potencia eléctrica, como el producto de $V \cdot I$, las cuales son cantidades complejas.

Es importante resaltar que las aplicaciones del análisis de flujos de potencia son tan vastas como importantes. Constituyen la herramienta esencial para el análisis, la plantación y el diseño de tanto de los sistemas eléctricos, como la operación y control de los mismos.

3.2. El problema de flujos de carga

Antes de iniciar la formulación del problema de flujos de potencia, es imprescindible plantear la relación que existe entre potencia activa, potencia reactiva, voltaje y ángulo de voltaje (P , Q , $|V|$ y δ).

Consideremos una línea de transmisión, como se muestra en la figura 24, en la cual se ha omitido la resistencia serie, con el fin de simplificar el análisis posterior, lo cual no compromete las conclusiones, además de que en líneas aéreas de transmisión en efecto la relación x/r (Reactancia/Resistencia) es muy alta, lo cual significa que el valor de la resistencia es despreciable para algunos fines.

Figura 24. Potencia transferida entre dos buses



La potencia S_{12} será igual a

$$S_{12} = V_1 I_{12}^* = V_1 \left(\frac{V_1 - V_2}{jx} \right)^* = \frac{|V_1|^2 - V_1 V_2^*}{-jx} = j \left(\frac{V_1^2}{x} - \frac{V_1 V_2}{x} \right) \quad (3.1)$$

$$= j \left(\frac{|V_1|^2}{x} - e^{j(\theta_1 - \theta_2)} \right) = j \left(\frac{|V_1|^2}{x} - \frac{|V_1||V_2|}{x} [\cos(\theta_1 - \theta_2) + j \text{sen}(\theta_1 - \theta_2)] \right) \quad (3.2)$$

$$= \frac{|V_1||V_2|}{x} \text{sen}(\theta_1 - \theta_2) + j \left(\frac{|V_1|^2}{x} + \frac{|V_1||V_2|}{x} [\cos(\theta_1 - \theta_2)] \right) \quad (3.3)$$

De lo anterior, obtenemos separando parte real y parte imaginaria de la última expresión

$$P_{12} = \Re\{S_{12}\} = \frac{|V_1||V_2|}{x} \text{sen}(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.4)$$

$$Q_{12} = \Im\{S_{12}\} = \frac{|V_1|^2}{x} + \frac{|V_1||V_2|}{x} [\cos(\theta_1 - \theta_2)] \approx \frac{|V_1|}{x} (|V_1| - |V_2|) \quad (3.5)$$

La última aproximación se debe a que $(\theta_1 - \theta_2)$ es muy pequeño y por tanto: $\cos(\theta_1 - \theta_2) \approx 1$.

Lo anterior muestra que existe una fuerte dependencia entre $P - \delta$, por un lado, y entre $Q - IVI$ por otro. Por lo que podemos observar que, debido a que δ está relacionado con la frecuencia, entonces un exceso de MW generados tiende a elevar la frecuencia, mientras que un exceso de MVAR generados tiende a elevar IVI. Es también muy importante observar que mientras f (frecuencia) es una variable de efecto global y por lo tanto su cambio se siente en todo el sistema, IVI es una variable de efecto local y sus cambios, por consecuencia, no son uniformes y son más grandes en los buses con mayor exceso de Q . En este punto es importante hacer la observación de que el término bus constituye un tecnicismo de uso muy extendido, y es sinónimo de nodo. Las observaciones anteriores son cruciales en la comprensión de la formulación del modelo de flujos de potencia.

3.2.1. Aspectos Importantes para el análisis de flujo de carga

Los aspectos más importantes del estudio de flujos de potencia pueden resumirse como sigue:

1. Solamente los generadores pueden producir potencia activa, P . La localización y capacidad de dichos generadores es fija. La generación debe ser igual a la demanda más las pérdidas. Esta ecuación de balance debe cumplirse en todo momento (tanto para P como para Q). Dado que la potencia generada debe dividirse entre los generadores en una razón única con el objeto de lograr operación económica óptima, los niveles de generación deben mantenerse en puntos definidos por anticipado.
2. Los enlaces de transmisión pueden transmitir solamente ciertas cantidades de potencia (cargabilidad), debemos asegurarnos de operar dichos enlaces cerca de los límites de estabilidad o térmico.

3. Se deben mantener los niveles de voltaje de operación de ciertos buses dentro de ciertas tolerancias. Lo anterior, se logra mediante la generación apropiada de potencia reactiva.
4. Si el sistema eléctrico que es el objeto del estudio forma parte de un sistema más grande o está interconectado a otro sistema, deberá cumplir ciertos compromisos contractuales de potencia en puntos de enlace con los otros sistemas vecinos.
5. Los disturbios ocurridos después de grandes fallas en el sistema, pueden causar salidas de servicio; los efectos de dichos eventos pueden minimizarse mediante estrategias de pre-falla apropiadas desarrolladas a través de múltiples estudios de flujos de potencia.
6. Para llevar a cabo de manera apropiada y eficiente la tarea de planeación, es imprescindible el uso extensivo de estudios de flujos de potencia.

El problema de flujo de carga se puede dividir en los siguientes problemas:

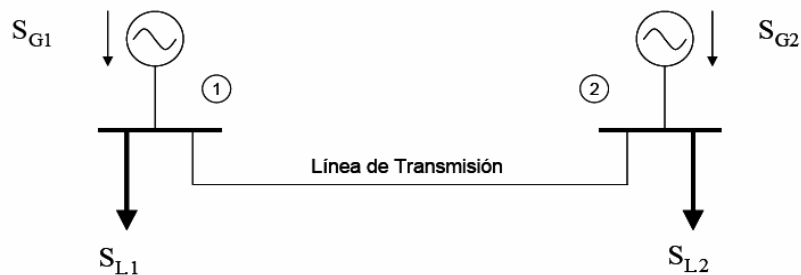
1. Formulación de un modelo matemático adecuado para la red. Debe describir adecuadamente las relaciones entre voltajes y potencias en el sistema interconectado.
2. Especificación de las restricciones de potencia y voltaje que deben aplicarse a todos los buses.
3. Cálculo numérico de las ecuaciones de flujos de potencia sujetas a las restricciones arriba mencionadas. De estas ecuaciones obtenemos todos los voltajes de la red.

4. Cuando todos los voltajes de bus han sido determinados, se podrá finalmente calcular los flujos de potencia en todos los elementos de transmisión, y con esto, las pérdidas de potencia.

3.2.2. Análisis de un sistema de dos buses

Con el fin de plantear el problema básico del análisis de flujo de potencia, hacemos uso del sistema más simple posible, sin perder generalidad, dado que este sistema, consiste en dos buses, contiene los elementos básicos de cualquier sistema eléctrico.

Figura 25. Sistema de dos buses.

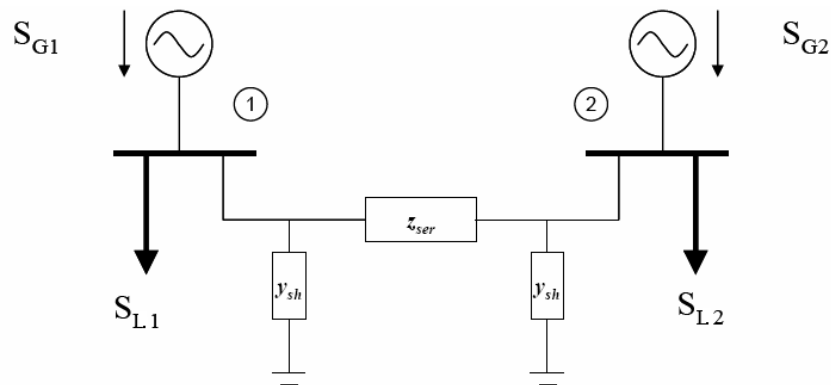


El sistema eléctrico mencionado se muestra en la figura 25, este está formado por un generador en el bus 1 y una carga en el bus 2, y los buses se unen con una línea de transmisión, la cual se modelará a través de un circuito π nominal.

En este sistema, cada bus es alimentado por un generador que inyecta una potencia S_{G1} y S_{G2} , respectivamente. A su vez existen cargas en cada uno, que consumen potencias S_{L1} y S_{L2} , o también podríamos decir que inyectan potencias $-S_{L1}$ y $-S_{L2}$. Además tenemos en cada bus un voltaje V_1 y V_2 respectivamente, claro está que estos son fasores, lo cual se definirá más adelante.

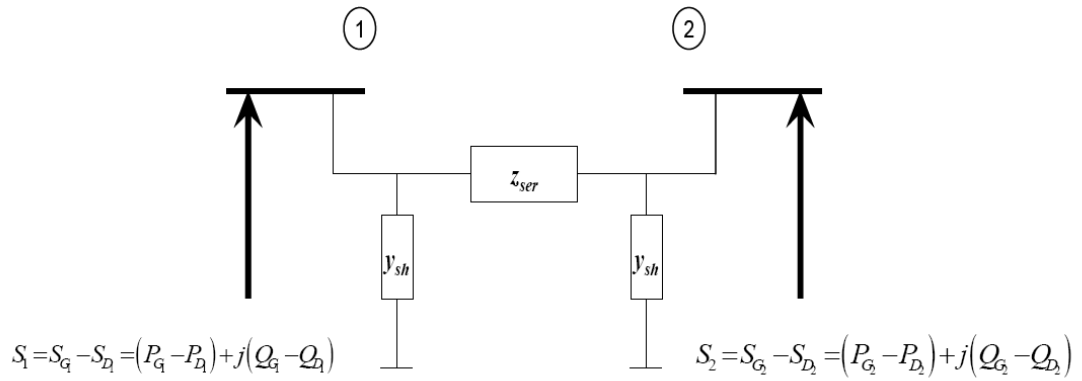
En la figura 26 podemos apreciar la representación de la línea de transmisión por medio del modelo π , esta línea esta caracterizada por las admitancias en derivación a cada uno de los buses, así como la impedancia en serie.

Figura 26. Sistema de dos buses. Representación de la línea de transmisión.



En la siguiente parte del análisis, se encontrará la inyección total en cada bus, es decir la suma de las inyecciones provenientes del generador y las cargas correspondientes, para lo cual usaremos un símbolo adecuado como se muestra en la figura 27, que defina la naturaleza de una “fuente” de inyección de potencia nodal.

Figura 27. Sistema de dos buses. Inyecciones netas de potencias.



Entonces, como se muestra en la figura, la potencia neta inyectada en cada bus esta dada por:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (3.6)$$

Esto en el bus 1, a continuación para el bus 2:

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (3.7)$$

Es importante resaltar que en la figura 26, las flechas de trazo grueso representan las “fuentes” de inyección de potencia en ambos buses.

También se debe hacer hincapié en que la potencia neta inyectada al bus, dada por las ecuaciones anteriores, para los buses 1 y 2 respectivamente, se refiere a la denominada potencia de bus y se define, como puede observarse, como la diferencia entre la potencia de generación y la potencia de carga en dicho bus.

Recordemos que la parte real de la primera (potencia activa del generador), se obtiene de la manipulación automática del par de entrada de la maquina sincronía y su valor en todo momento debe cumplir con el balance de potencia, que implica que su valor debe ser igual a la suma de la demanda más las perdidas. En cuanto a la componente imaginaria de la misma (potencia reactiva), se regula a través de la manipulación de la corriente de campo en el generador, manteniendo el voltaje constante a un nivel predeterminado en cada bus, lo cual constituye el criterio de que el balance en potencia reactiva se mantiene.

3.3. Ecuaciones de flujo de potencia

Véase la figura 26, la potencia que se inyecta al bus 1, S_1 , estará dada por $S_1=V_1 \cdot I_1^*$ en donde I_1 es la corriente neta inyectada al bus 1. Esta corriente se compone de dos términos; una componente circula por la rama de derivación Y_{sh} , mientras que la otra circula por la rama serie Z_{ser} .

En el primer caso, la corriente será igual a $V_1 \cdot Y_{sh}$, mientras que en el segundo caso su valor será $(V_1-V_2) \cdot Y_{ser}$, donde Y_{ser} es el inverso de Z_{ser} .

Entonces podemos definir la corriente para el bus 1:

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} = V_1 Y_{sh} + (V_1 - V_2) Y_{ser} \quad (3.8)$$

Para el bus 2

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2} = V_2 Y_{sh} + (V_2 - V_1) Y_{ser} \quad (3.9)$$

Reescribiendo las ecuaciones

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (3.10)$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2} = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (3.11)$$

Donde

$$Y_{11} = Y_{sh} + Y_{ser}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{ser}$$

$$Y_{22} = Y_{sh} + Y_{ser}$$

Los elementos anteriores son parte lo que se le llama la matriz de admitancias nodales, Y_{bus} . Tomando en cuenta lo anterior, se puede definir las siguientes variables nodales:

$$I_{BUS} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{Vector de corrientes nodales}$$

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad \text{Vector de voltajes de bus}$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de admitancias nodales}$$

Ahora bien, sabemos que

$$V_{BUS} = Z_{BUS} \bullet I_{BUS}$$

O

$$I_{BUS} = \frac{V_{BUS}}{Z_{BUS}}$$

Invertida nos lleva a

$$I_{BUS} = Y_{BUS} \bullet V_{BUS} \quad (3.12)$$

Además sabemos que

$$Z_{BUS} = Y_{BUS}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Que es la matriz de impedancia nodal.

La últimas dos ecuaciones matriciales son lineales, lo cual está acorde con el hecho de que la red eléctrica que estamos modelando es lineal. Sin embargo en realidad, son las potencias y no las corrientes lo que conocemos, por lo cual al escribir estas ecuaciones en función de la potencia, obtenemos

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = Y_{11}V_1V_1^* + Y_{12}V_2V_1^* \quad (3.14)$$

$$S_2^* = P_2 - jQ_2 = Y_{21}V_1V_2^* + Y_{22}V_2V_2^* \quad (3.15)$$

Fundamentalmente, éstas son las ecuaciones de flujos de potencia. Es importante observar que están en función de los voltajes nodales. Las ecuaciones anteriores pueden escribirse en forma más compacta y conveniente de la siguiente forma

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* \sum_{k=1}^2 Y_{1k} V_k \quad (3.16)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* \sum_{k=1}^2 Y_{2k} V_k \quad (3.17)$$

En general, las ecuaciones anteriores pueden escribirse

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad (3.18)$$

Y en forma polar

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| e^{j(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik})} \quad (3.19)$$

Donde para el caso presente del sistema de dos buses, $n = 2$.

Si separamos en parte real e imaginaria la ecuación anterior se convierte en las siguientes ecuaciones:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (3.20)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| \text{sen}(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (3.21)$$

Para simplificar la formulación y evitar complicar el análisis de las ecuaciones generales de orden n , nos enfocáremos nuevamente en el sistema anterior de dos buses.

Desarrollando para el caso donde $n = 2$, (Figura 27), la potencia del nodo 1 debe ser igual a la potencia generada en ese nodo menos la potencia demandada en ese nodo,

$$\begin{aligned}
P_1 &= P_{G1} - P_{D1} = \\
&= |Y_{11}|V_1|^2 \cos \gamma_{11} + |V_1|Y_{12}|V_2| \cos(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12})
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Y en el nodo 2:

$$\begin{aligned}
P_2 &= P_{G2} - P_{D2} = \\
&= |Y_{22}|V_2|^2 \cos \gamma_{22} + |V_2|Y_{21}|V_1| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21})
\end{aligned} \tag{3.23}$$

De igual manera para la potencia reactiva en el nodo 1:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= Q_{G1} - Q_{D1} = \\
&= |Y_{11}|V_1|^2 \text{sen} \gamma_{11} + |V_1|Y_{12}|V_2| \text{sen}(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12})
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Y en el nodo 2:

$$\begin{aligned}
Q_2 &= Q_{G2} - Q_{D2} = \\
&= |Y_{22}|V_2|^2 \text{sen} \gamma_{22} + |V_2|Y_{21}|V_1| \text{sen}(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21})
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Observamos que las características de estas ecuaciones es que son algebraicas, debido a que representan un modelo en estado estable de corriente alterna, lo que las hace además complejas. Por otro lado, son no lineales, lo cual, salvo para los casos más simples, las hace imposibles de resolver analíticamente, por lo que se requiere recurrir a una solución numérica.

3.4. Definición de las incógnitas para la solución de los flujos de potencia

3.4.1. Definición de incógnitas

Si revisamos cuidadosamente las ecuaciones de flujo para el sistema de dos buses, vemos que tenemos 12 incógnitas: P_{G1} , P_{G2} , Q_{G1} , Q_{G2} , P_{D1} , P_{D2} , Q_{D1} , Q_{D2} , $|V_1|$, $|V_2|$, δ_1 , δ_2 , y solamente cuatro ecuaciones. Aunque es importante observar que las últimas dos incógnitas, los ángulos de los voltajes, siempre aparecen en los argumentos de las funciones trigonométricas en forma de diferencias.

Esto nos indica que debemos reducir, de alguna manera, el número de incógnitas con el fin de que sean igual que al de ecuaciones, cuatro incógnitas.

En este punto es muy importante clasificar las variables involucradas en el modelo. Primero se debe dividir en tres grupos las variables del modelo: variables incontrolables o de perturbación, variables de estado y variables de control.

En el primer grupo, representamos las demandas: P_{D1} , P_{D2} , Q_{D1} , Q_{D2} . Mientras que el segundo grupo, variables de estado, están representados los voltajes, tanto en magnitud como en ángulo: $|V_1|$, $|V_2|$, δ_1 , δ_2 . En el tercer grupo, variables de control, naturalmente las generaciones: P_{G1} , P_{G2} , Q_{G1} , Q_{G2} .

Evidentemente debemos conocer las demandas, lo cual elimina cuatro incógnitas. Para encontrar las otras ocho se debería de partir de que se conocen las demandas, lo cual es correcto, suponer las cuatro variables de control, es decir las generaciones y entonces terminar con un modelo matemático consistente, que incluye los voltajes y sus ángulos como incógnitas.

Pareciera que se encontró una solución, sin embargo ésta no es conveniente por distintas razones. Veamos las ecuaciones de flujos de potencia, los ángulos de voltaje aparecen como argumento de funciones trigonométricas en forma de diferencias, $\delta_1 - \delta_2$, nunca en forma individual y por lo tanto no podemos resolver estos valores en forma individual. Otra enorme limitante a nuestra propuesta es que no podemos especificar las cuatro potencias generadas, por la sencilla razón de que no conocemos las pérdidas por anticipado, pues estas son función de los voltajes, es decir de las incógnitas. Lo anterior implica que se puede especificar dos de estas potencias generadas, pero dejar libres las otras dos para que adopten el valor correspondiente en el transcurso del proceso iterativo.

El problema expuesto en el párrafo anterior se puede resolver de la siguiente manera. Primero, el problema de la diferencia angular se puede resolver si fijamos uno de los ángulos, dejando el otro como incógnita; esto es muy conveniente ya que además nos permite disponer de una referencia fasorial, lo cual es necesario para darle sentido al ángulo de un voltaje fasorial. De esta manera si se fija el valor de $\delta_1 = 0$, entonces quedará como referencia el valor de voltaje del bus 1. Con esto, hemos reducido el número de incógnitas a cinco: $|V_1|$, P_{G1} , Q_{G1} , $|V_2|$, δ_2 . De este grupo restante, debemos fijar otra variable más para poder intentar la solución del problema de flujos. La elección estaría entre $|V_1|$ y Q_{G1} , pues una de estas eliminaría a la otra, debido al fuerte acoplamiento que existe entre estas. Hasta este punto, no hemos fijado ninguna magnitud de voltaje y es necesario mantener los voltajes dentro de ciertos límites, por lo que sería conveniente fijar $|V_1|$, aprovechando la presencia de un generador en ese bus, el cual puede, dentro de sus límites de operación, mantener un voltaje de operación constante; además, como no conocemos las pérdidas de potencia, tanto activa como reactiva, se requiere dejar sin especificar en un bus ambas variables, con el fin de que al final de la solución, exista esta "holgura" y pueda cumplir con el balance de potencia.

Por lo tanto al dejar libre las variables P_{G1} y Q_{G1} , deberán quedar definidos $|V_1|$ y δ_1 , lo cual lo convierte en una referencia fasorial, como se discutió previamente.

Lo anterior nos deja con un grupo de cuatro incógnitas, que constituyen un sistema de ecuaciones consistente, cuatro ecuaciones en cuatro incógnitas, que por su naturaleza no lineal, deberán resolverse en forma numérica.

3.4.2. Tipos de buses

Desde el inicio del análisis de flujos de potencia se estableció la manera sistemática que nos conduce a la obtención del modelo de flujos de potencia para cualquier sistema. Al día de hoy fundamentalmente se siguen aplicando las mismas suposiciones. Lo anterior implica la clasificación de los buses del sistema en tres clases, que se describen a continuación.

1. Bus de referencia o compensador (en inglés “*swing*” o “*slack*”), por su naturaleza de que las potencias tomarán los valores requeridos para que se cumpla el balance de potencias en el sistema, aparte de que al fijar el ángulo de voltaje, estamos definiendo una referencia fasorial.
2. Bus PQ o bus de carga. En este tipo de bus se especifican las potencias inyectadas al bus, tanto activa como reactiva, quedando libre la magnitud y el ángulo de voltaje.
3. Bus PV, a veces denominado bus de generación. En este tipo de buses, se especifican la potencia activa inyectada al bus, así como la magnitud del voltaje.

En la figura 28, se resumen los conceptos anteriormente explicados.

Figura 28. Tipos de buses.

Tipo de Bus	Variables conocidas o especificadas						Incógnitas obtenidas en el proceso de solución.			
	P_D	Q_D	P_G	Q_G	$ V $	δ	P_G	Q_G	$ V $	δ
<u>Tipo de Bus</u>										
<u>Referencia</u>	•	•			•	•	•	•		
<u>Bus PQ</u>	•	•	•	•					•	•
<u>Bus PV</u>	•	•	•		•			•		•

3.5. Métodos numéricos para la solución de flujos de potencia

En los estudios de los sistemas eléctricos, tales como el análisis de flujos de potencia, encontramos sistemas de ecuaciones tanto lineales como no lineales. Dado que el orden de dichos sistemas de ecuaciones es alto, debido al gran tamaño de los sistemas reales, es muy importante tener algoritmos numéricos rápidos y eficientes que nos permitan obtener la solución de dichos sistemas de ecuaciones.

Nuestro objetivo es resolver un sistema de ecuaciones cuya forma general es

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 &\bullet \\
 &\bullet \\
 &\bullet \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Este sistema de ecuaciones se resuelve usando técnicas numéricas iterativas. El método que es la base del software utilizado para el presente estudio es el de Newton-Raphson, a continuación se explica detalladamente.

3.5.1. Método de Newton Raphson

El método de Newton-Raphson es aplicado directamente al sistema de ecuaciones (3-25).

Consideremos la ecuación no lineal $f(x) = 0$. Suponiendo un valor de arranque $x^{(0)}$, expandamos en serie de Taylor $f(x)$ alrededor $x^{(0)}$, sea, tomando como punto base $x^{(0)}$. La ecuación resulta entonces

$$f(x^{(0)}) + (x - x^{(0)})f'(x^{(0)}) + \frac{1}{2!}(x - x^{(0)})^2 f''(\dots x^{(0)}) + \dots = 0.$$

Despreciando los términos de segundo orden y orden superior, obtenemos

$$f(x^{(0)}) + (x - x^{(0)})f'(x^{(0)}) = 0.$$

De esta última ecuación despejamos x , con el fin reobtener un estimado más cercano a la solución

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})}$$

en donde a la x la hemos denominado $x^{(1)}$ en la última ecuación. La ecuación anterior puede aplicarse de manera iterativa, hasta alcanzar el valor deseado, mediante la ecuación general

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \quad (3.27)$$

La convergencia puede probarse mediante el criterio $|f| \leq \mathcal{E}$. De hecho si el método iterativo converge, $f \rightarrow 0$. Es importante recordar que la ecuación $f(x) = 0$ puede tener varias soluciones, por lo que en caso de converger, el método probablemente lo hará la valor más cercano al valor de arranque.

Consideremos nuevamente el sistema de las ecuaciones 3.26

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2$$

•

•

•

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n$$

En este sistema mostrado hay una diferencia con respecto al descrito en 3.26, en lugar de estar igualadas a cero las ecuaciones, están igualadas a un valor constante, y_1, y_2, \dots, y_n . Lo anterior no debe representar ningún problema, puesto que es obvio que se trata del mismo sistema de ecuaciones, solamente que la forma de lo expuesto arriba es más apropiado para la formulación de flujos de potencia.

Si denominamos al vector $x^{(0)} = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]^T$, vector de arranque, y suponemos que $\Delta_{x1}, \Delta_{x2}, \dots, \Delta_{xn}$, son las correcciones requeridas para que el vector $x^{(0)}$ sea la solución, tendremos que al sustituir la ecuación anterior

$$\begin{aligned}
f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\
f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\
&\bullet \\
&\bullet \\
&\bullet \\
f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Aplicamos el teorema de Taylor a cada una de las siguientes ecuaciones del conjunto 3-27. Para la primera ecuación obtenemos

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 + \phi$$

En este caso ϕ_1 es una función de potencias $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, de grado mayor a 1, así como derivadas de alto orden de f_1 . Si los estimados iniciales (vector de arranque) están cerca de la solución, los valores de $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, serán muy pequeños y por tanto se podrán despreciar los términos con potencias de grado superior.

De acuerdo a lo anterior, el sistema de ecuaciones tendrá la forma

$$\begin{aligned}
f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 &= y_1 \\
f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 &= y_2 \\
\bullet \\
\bullet \\
\bullet \\
f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 &= y_n \quad (3.29)
\end{aligned}$$

De donde despejando los primeros términos, y usando notación matricial, tendremos

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ y_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \dots \\ y_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

El proceso se trabaja en forma iterativa, en cuyo caso el sistema general sería como

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ y_2 - f_2(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ \dots \\ y_n - f_n(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_k & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_k & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_k \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_k & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_k & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_k & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_k & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_k \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \Delta x_1^k \\ \Delta x_2^k \\ \dots \\ \Delta x_n^k \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

En forma compacta

$$[J]\vec{C} = \vec{D} \quad (3.32)$$

Donde \vec{C} es el vector de correcciones, mientras \vec{D} es el vector de desajustes, o sea de diferencias entre los valores constantes y las funciones evaluadas en el vector obtenido en la iteración correspondiente. El vector izquierdo contiene la diferencia de los términos conocidos menos las funciones evaluadas con los vectores obtenidos en cada iteración. Lo denominamos vector de diferencias. La matriz de primeras derivadas parciales se conoce como Matriz Jacobina, y sus elementos son valores numéricos obtenidos al evaluar las expresiones obtenidas al evaluar las derivadas indicadas con los vectores en cada iteración. Finalmente, el vector de la derecha es el vector de correcciones, pues como se indicó anteriormente, representa el vector requerido para corregir el vector solución de la iteración anterior, rumbo a la solución.

4. ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS PARA ARRANQUES DE MOTORES SÍNCRONOS DE GRAN TAMAÑO, EN EL ÁREA OCCIDENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

4.1. Metodología

4.1.1. Escenarios

- I. **Escenario aislado:** Se simularan los diferentes arranques en un sistema aislado de prueba para determinar las dos mejores opciones.
- II. **Escenario Sistema Nacional Interconectado (SNI):** Cuando se tengan las mejores opciones se simularan en el SNI, con esto se logrará definir cual de los arranques provoca el menor impacto en los parámetros de seguridad establecidos en las normas NCO-2 del Administrador del Mercado Mayorista.

4.1.2. Demandas

Los estudios en el SNI se harán en base a dos casos

2. Demanda Máxima Invierno año 2010.
2. Demanda Máxima Verano ano 2010.

4.1.3. Bases de datos para el análisis

El estudio realizado en el presente trabajo de graduación se basa en la información y en los datos brindados por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) y por la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE) de Guatemala. Los casos base fueron elaborados en base a los casos de flujo de carga para el año estacional Mayo 2007-Abril 2008, con las previsiones de demanda 1999-2010 y con los programas de despacho 2007-2008.

4.1.4. Proceso de datos y software utilizado

Se realizaron los estudios de flujo de carga, arranque de motores y de caída de tensión con el software PSAF Versión 2.71, Revisión 1.6 de CYME Internacional Inc.

4.1.5. Elementos monitoreados en el estudio

4.1.5.1. Sistema aislado:

1. Barras:

Nombre de la barra
BUS-A
BUS-B
BUS-C
BUS-D

2. Líneas:

Nombre de la línea
LINEA-69
LINEA-4.1

Véase la figura 35

4.1.5.2. Sistema Nacional Interconectado:

1. Barras:

Nombre de la barra
MAR-69
TAC-69
TEJ-69
SMR-69

2. Líneas:

Nombre de la línea
TEJMAR69
SMRTEJ69

4.1.6. Criterios aplicados

Fueron aplicados los siguientes criterios en el arranque del motor:

- Niveles operativos de tensión en condiciones normales: 95-105%
- Abatimiento del factor de potencia.
- Tiempo de duración del arranque.

4.1.7. Parámetros del estudio

A continuación se presentan los parámetros usados en el estudio.

4.1.6.1. Motor

Figura 29. Parámetros generales del motor.

Base de datos de la Máquina

Máquina síncrona | Circuito equiv. | Modelo de estabilidad | Modelo armónico M1 | Modelo armónico M2

Nombre BD: MOTOR M1 | Filtro: Lista filtros...

Parámetros generales:

Tensión [kV]	4.100	Factor de potencia [p.u.]	0.900
Potencia nom. [MVA]	3.3155	Rendimiento [%]	99.990
HP nominal	4000.07	Velocidad [RPM]	240
kW nominal	2983.65	Frec. nominal	60

Z subtransitoria [p.u.]: R" = 0.06903, X" = 0.37471

Grupo motor (ANSI): Dejar que el programa decida, Especificar (2,3,4 o 5): 4

Observaciones: []

Rec# / Total: 43 / 43

Buttons: OK, CANCELAR, <<, >>

Figura 30. Circuito equivalente del motor síncrono.

Base de datos de la Máquina síncrona

Máquina síncrona | Circuito equiv. | Modelo de estabilidad | Modelo armónico M1 | Modelo armónico M2

Nombre BD: MOTOR M1

Tipo de rotor: Rotor simple, Rotor doble, Rotor con barras profundas

Parámetros del circuito equivalente:

- Rotor bloqueado / test en vacío
- Rotor bloqueado / test con carga
- Usar curvas existentes (I, FP, Te, Tm, vitesse)
- Condiciones nominales conocidas
- Condiciones de arranque conocidas

Parámetros del circuito equivalente:

Estator: Rs [ohmios] = 0.0502, Xs [ohmios] = 0.9998

Magnetización: Rm [ohmios] = 1000.0000, Xm [ohmios] = 50.0000

Rotor (en relación al estator):

Rotor en jaula ext. (#1): Rr1 [ohmios] = 0.0999, Xr1 [ohmios] = 0.9998

Rotor en jaula interior (#2): Rr2 [ohmios] = 0.1, Xr2 [ohmios] = 1

Factor de jaula: Rjaula = 2.0000, Xjaula = -0.1000

Rec# / Total: 43 / 43

Buttons: OK, CANCELAR, <<, >>

Figura 31. Modelo de estabilidad del motor.

Base de datos de la Máquina síncrona

Máquina síncrona | Circuito equiv. | Modelo de estabilidad | Modelo armónico M1 | Modelo armónico M2

Nombre BD: MOTOR M1 [Recargar]

Especificaciones nominales (p.u.)

Tensión [kV]: 4.100 Potencia nom. [MVA]: 3.3155 [Predeter.]

Impedancia del estator (p.u.)

Resistencia (Rs): 0.0099 Impedancia de magnetización (p.u.)

React. de fuga (Xs): 0.1972 Pérdidas en el hierro (RL): 197.2338

React. de magnetiz. (XM): 3.8617 [Ayuda]

Impedancia del rotor vs. deslizamiento

Multiplicadores (Rr, Xr) vs. deslizamiento

Rr	0.0197	1.5000	2.0000	2.5000	3.0000
Xr	0.1972	0.9750	0.9500	0.9250	0.9000
curva deslizam.	0.0	0.2500	0.5000	0.7500	1.0

Rec# / Total: 43 / 43

[OK] [CANCELAR] [<<] [>>]

4.1.6.2. Carga

Figura 32. Características de la carga.

Motor síncrono

Modelo de estabilidad | Modelo armónico | Coordinación de protecciones

Motor síncrono | Características de la carga | Arranque de motor | Arranque motor2

Nombre EQ: MOTOR [Ayuda]

El par de torsión se expresa en:

pu libras-pies N-m

Ingrese par torsión vs. puntos curva de deslizam.

Torsión

Deslizamiento	0.000	0.13000	[Mostrar curva]
Velocidad [pu]	0.250	0.12000	[Predet.]
Velocidad [rpm]	0.500	0.11000	
	0.750	0.12000	
	1.000	0.13000	

Constante de inercia de la máquina: 0.3432 [MW-sec/MVA]

Momento de inercia J de todas las partes rotativas

85515.5 [lb-pie²]

ó 3600.2 [kg-m²]

Ecuación curva de par de torsión

$T = A0 + A1w + A2w^2 + A3w^3$

A0 = 1 A1 = 0 A2 = 0 A3 = 0

con w = 1, 0.75, 0.5, 0.25, 0

[Actualizar la curva de par de torsión]

[OK] [CANCELAR] [<<] [>>]

4.1.6.3. Dispositivos de arranque

Figura 33. Parámetros para arranques: Por condensador, resistor e inductancia y resistencia en el colector.

Motor asincrono

Modelo de estabilidad | Modelo armónico | Coordinación de protecciones
 Motor asincrono | Características de la carga | Arranque de motor | Arranque motor2

Nombre Eq.: MOTOR 2.9MW Ayuda

Asistencia por condensador

Condens. kVar:

Límite velocidad [%]:

Límite tensión [%]:

Límite tiempo [sec]:

ASISTENCIA POR RESISTOR Y/O POR INDUCTANCIA

Tiempo [sec]	Res. [Ohmios]	Induct. [Ohmios]
4.00	1.30	0.090
6.00	1.10	0.040
8.00	0.95	0.020
10.00	0.85	0.020
17.00	0.70	0.020

Curvas de datos arranque de motor

Modificar...

INYECCION RESISTENCIA ANILLO COLECTOR

Tiempo [sec]	Res. [Ohmios]
T1 5.00	[T=0, T1 2.00
T2 12.00	[T1, T2 1.75
T3 17.00	[T2, T3 1.50
T4 22.00	[T3, T4 1.00

OK CANCELAR << >>

Figura 34. Parámetros para arranques: por auto transformador y estrella-delta

Motor asincrono

Modelo de estabilidad | Modelo armónico | Coordinación de protecciones
 Motor asincrono | Características de la carga | Arranque de motor | Arranque motor2

Nombre Eq.: MOTOR 2.9MW Ayuda

ASISTENCIA AUTOTRANSFORMADOR

MVA nominal: Znom [p.u.]:

kV al primario: relación $\times R$:

Esquema de transición: Abrir Cerrado

Posición de la toma (secundario)	Tiempo de aplicación [sec]	$\%Z_{nom}$	Tiempo transición a la próxima toma [sec]
0.800	4.50	100.000	1.50
0.850	5.50	90.000	1.50
0.880	8.50	70.000	1.50
1.000	4.50	60.000	1.50

ASISTENCIA ESTRELLA-DELTA

T = 0, bobinado del motor = Y

T1 - desconexión del devanado Y [seg]:

Si la transición es abierta, el motor se desenergiza, sino se aplica la resistencia R del ..

R de la resistencia serie [Ohm]:

T2 - Bobinado reconectado en Delta [sec]:

Fin de la operación si la transición es ..

T3 - R está cortocircuitado (plena tensión aplicada) [sec]:

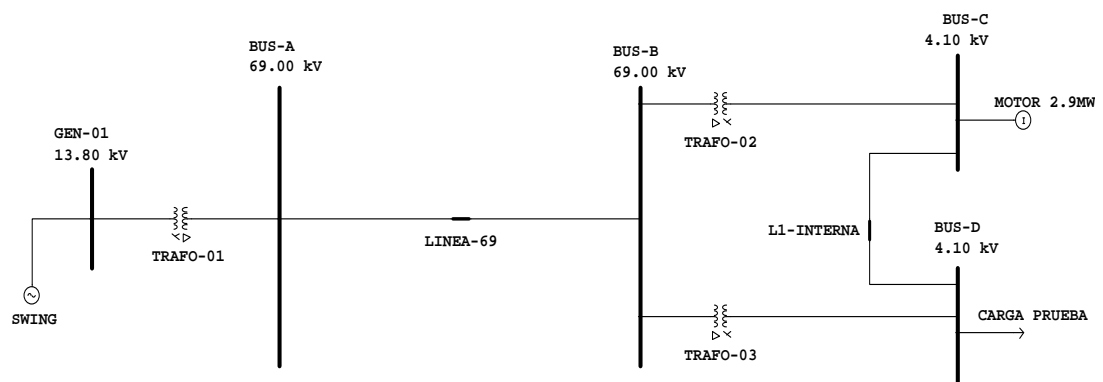
Esquema de transición: Abrir Cerrado

OK CANCELAR << >>

4.2. Estudio de arranque del motor sincrónico en un sistema aislado.

A continuación se muestra el sistema aislado de prueba que se utilizará para el análisis del arranque de motores. Este sistema y los parámetros de los equipos fueron modelados en base a los diagramas unifilares de la Mina de oro Marlin, buscando de esta manera obtener resultados concisos del estudio. La barra o bus GEN-01 funciona, en este diagrama, como un bus infinito con lo cual se modela la conexión a un sistema, en nuestro caso al SNI.

Figura 35. Sistema aislado de prueba.



4.2.1. Arranque directo

Se procederá a arrancar el motor sincrónico, por medio de los devanados de amortiguamiento (arranque asíncrono, como se explicó en el 3er. Capítulo de este trabajo) y sin ninguna asistencia o arrancador. A continuación los resultados.

Figura 36. Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque directo.

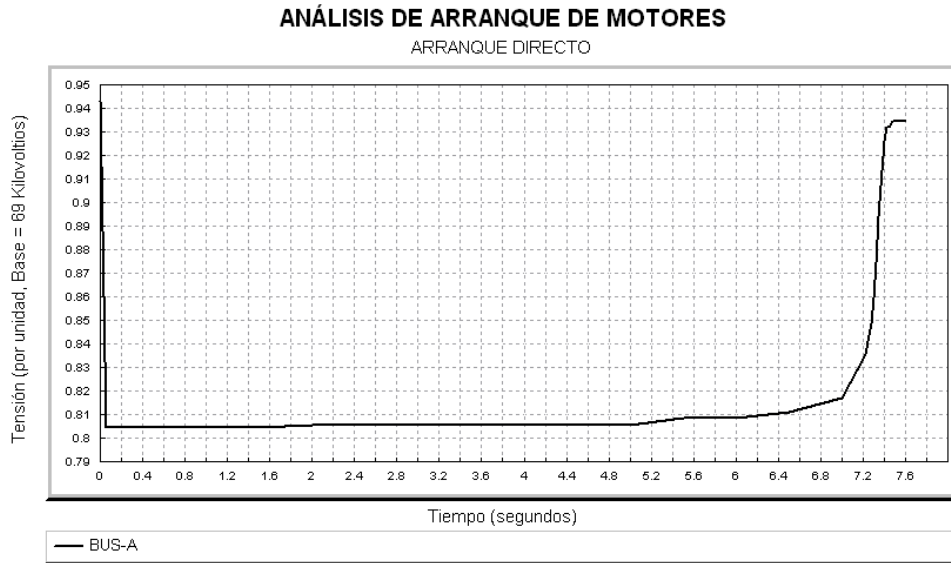


Figura 37. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque directo.

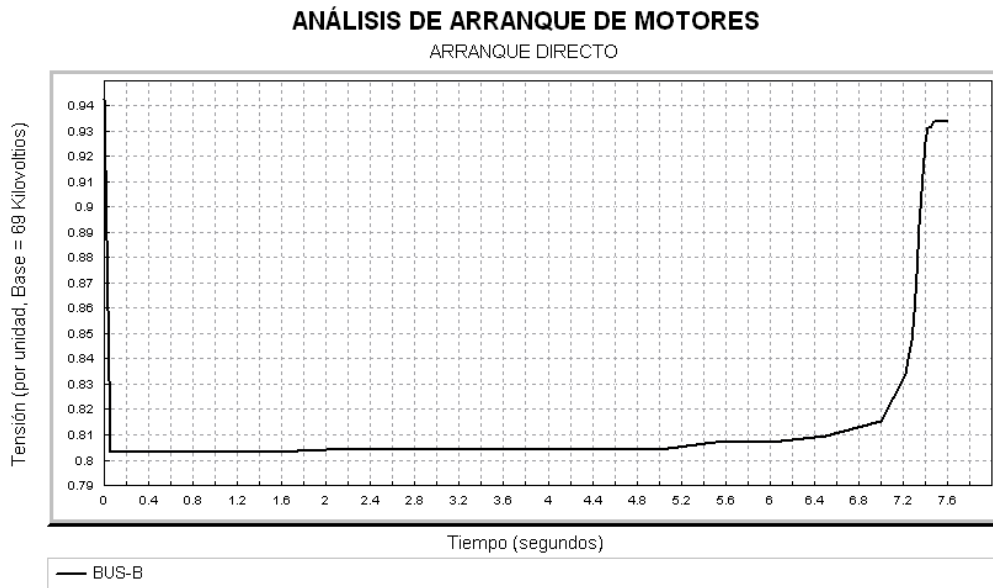


Figura 38. Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor).
Arranque directo.

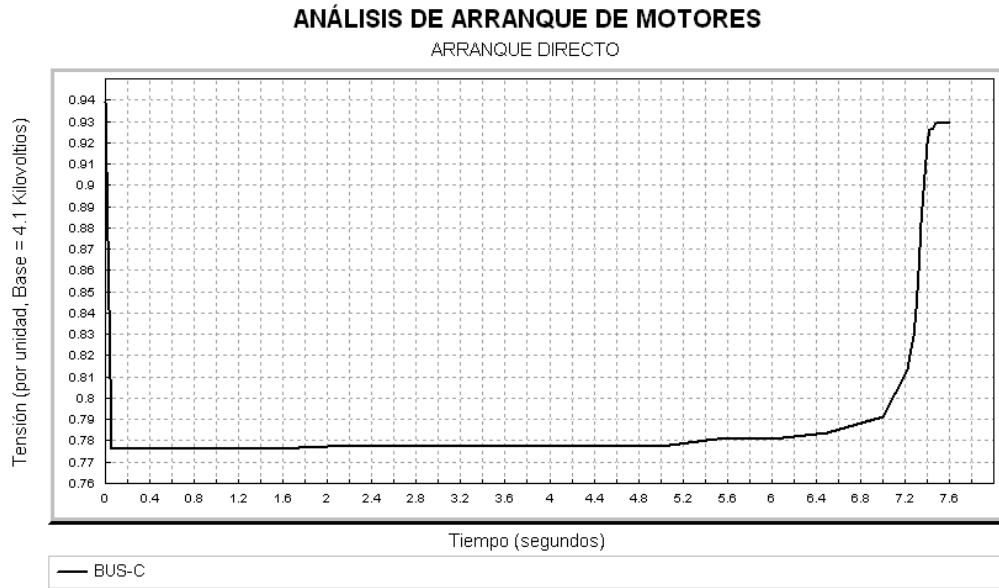


Figura 39. Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque directo.

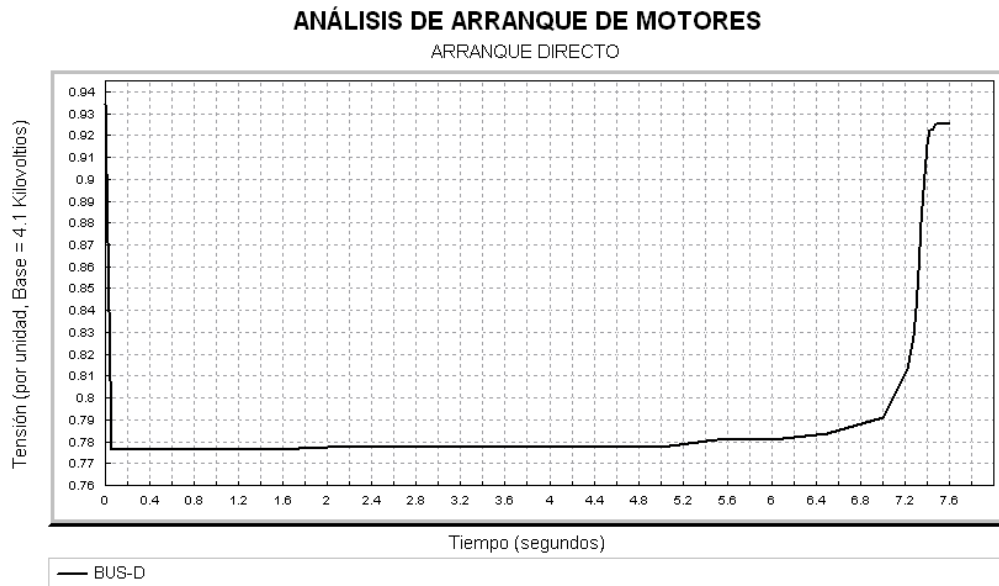


Figura 40. Factor de Potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo.

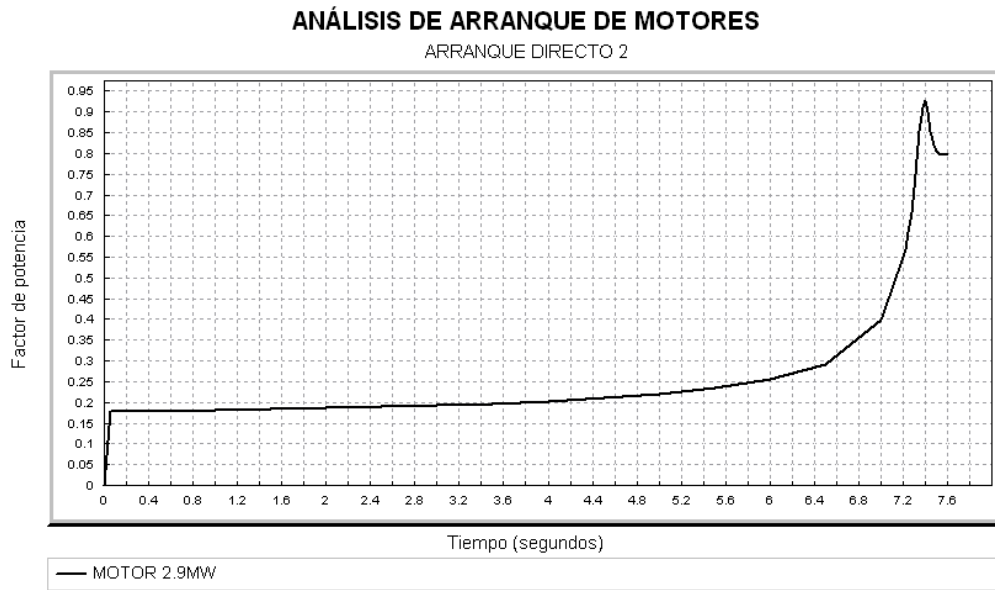


Figura 41. Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo.

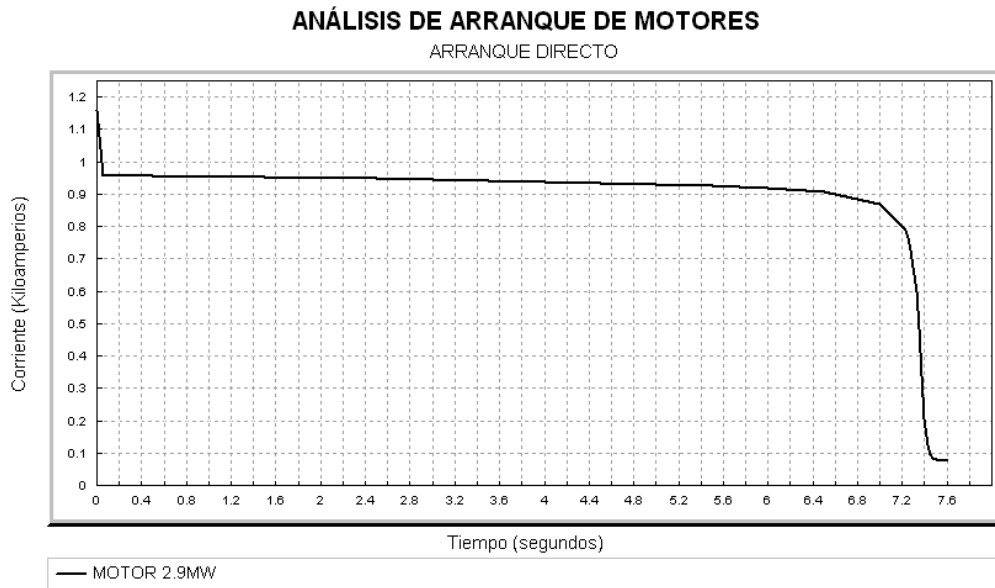
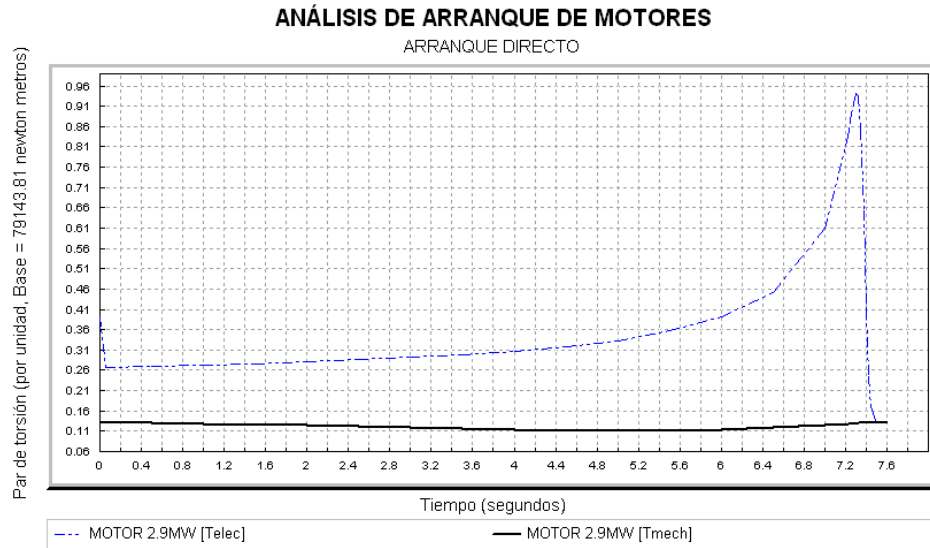


Figura 42. Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque directo.



De lo anterior podemos obtener los valores críticos, lo cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I. Valores críticos en el arranque directo

Valores críticos en el arranque del motor	
Tensión: Valore Mínimos	
Barra	Voltaje (P.U.)
BUS-A	0,80452
BUS-B	0,80298
BUS-C	0,776056
BUS-D	0,776167
Tiempo de Arranque	
Arranque Directo	7,60 segundos
Factor de Potencia Promedio	
Factor de Potencia	0,512629 P.U.
Corriente de Arranque Máxima	
Corriente de Arranque	0,958439 Kiloamperios

4.2.2. Arranque asistido por capacitores

A continuación los resultados:

Figura 43. Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores.

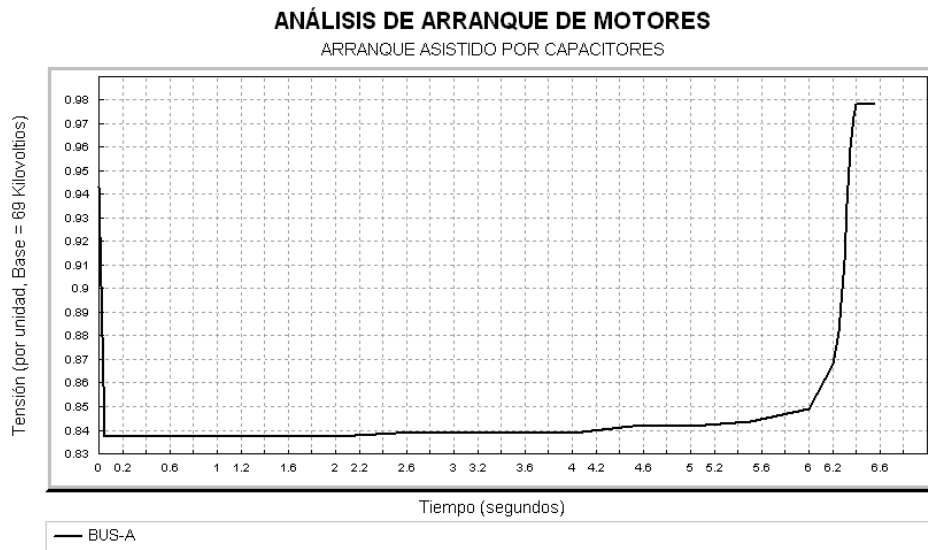


Figura 44. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores.

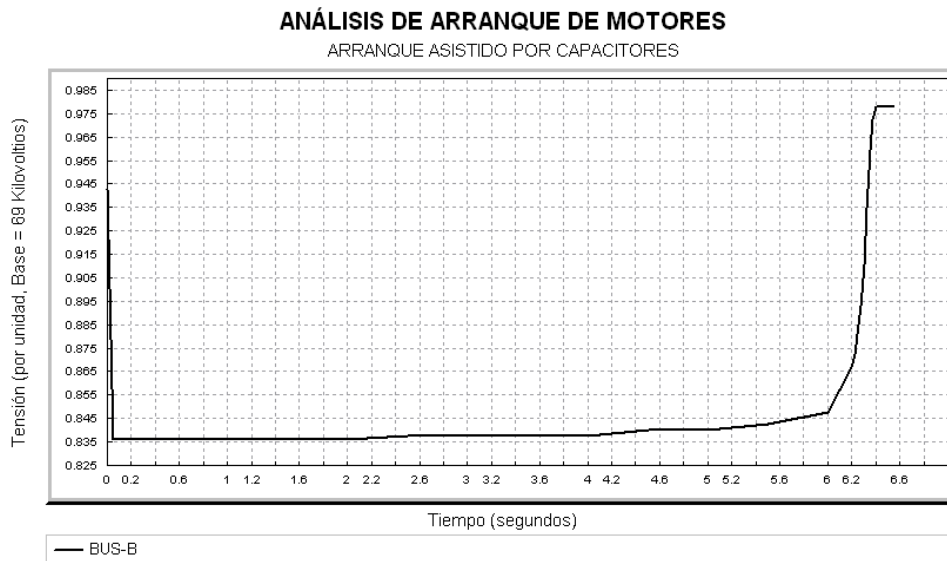


Figura 45. Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor).
Arranque asistido por capacitores.

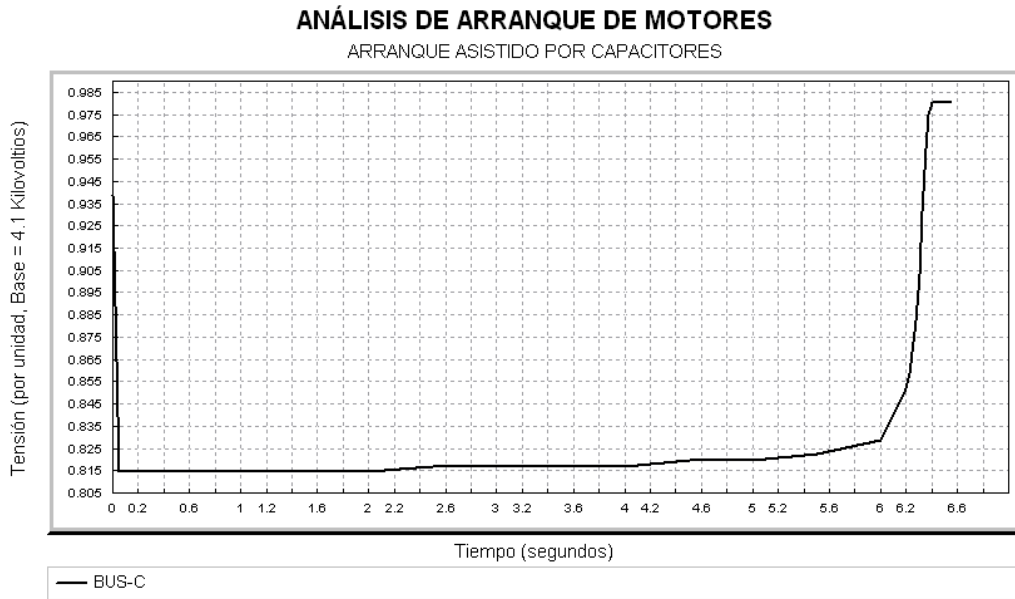


Figura 46. Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque asistido por capacitores.

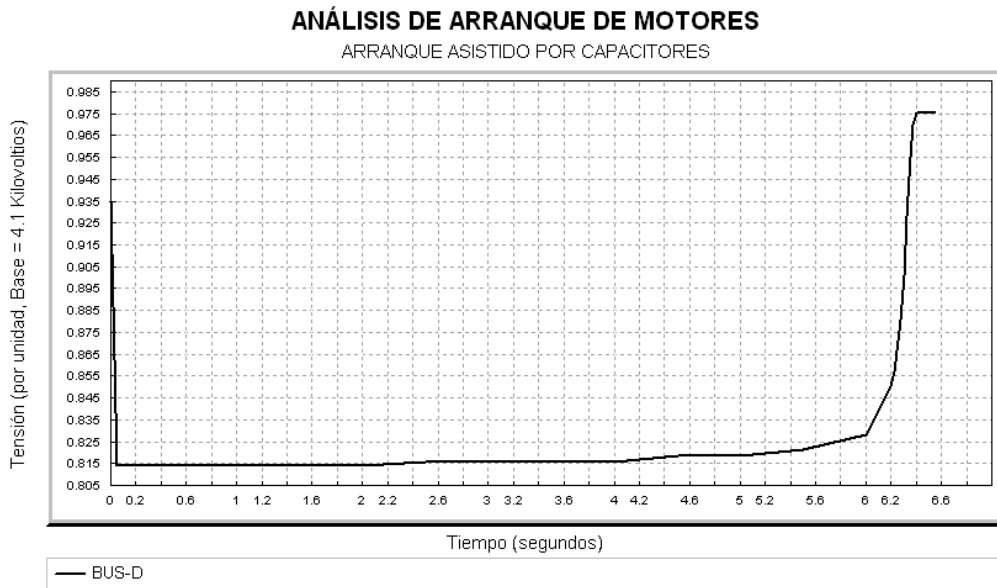


Figura 47. Factor de Potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores.

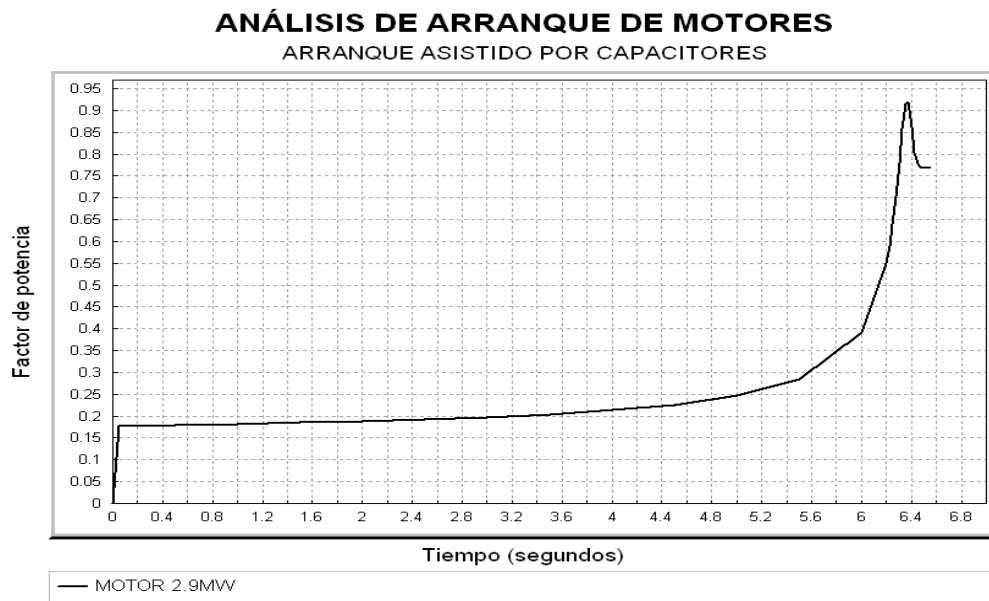


Figura 48. Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores.

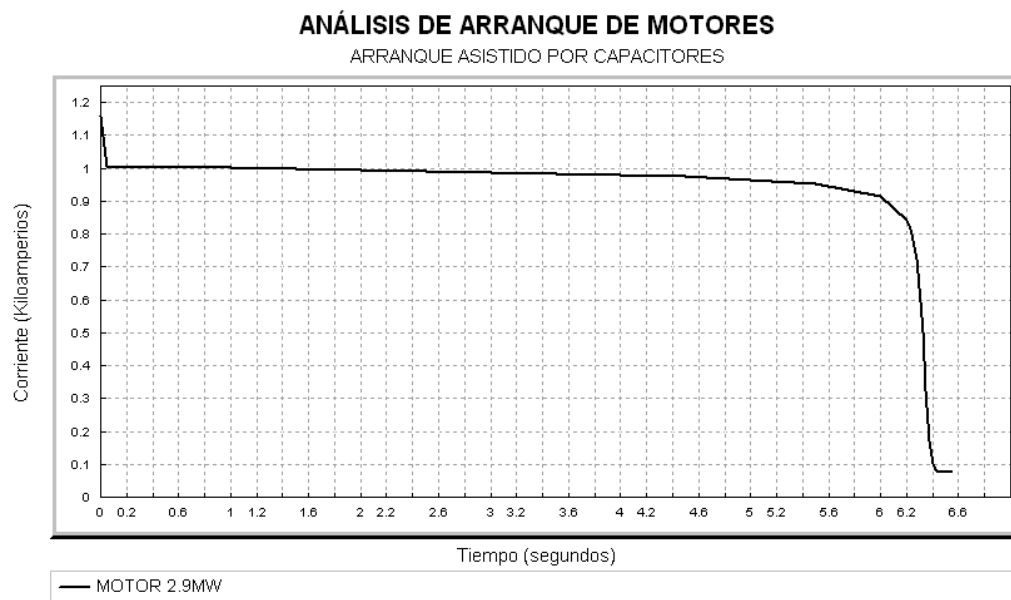
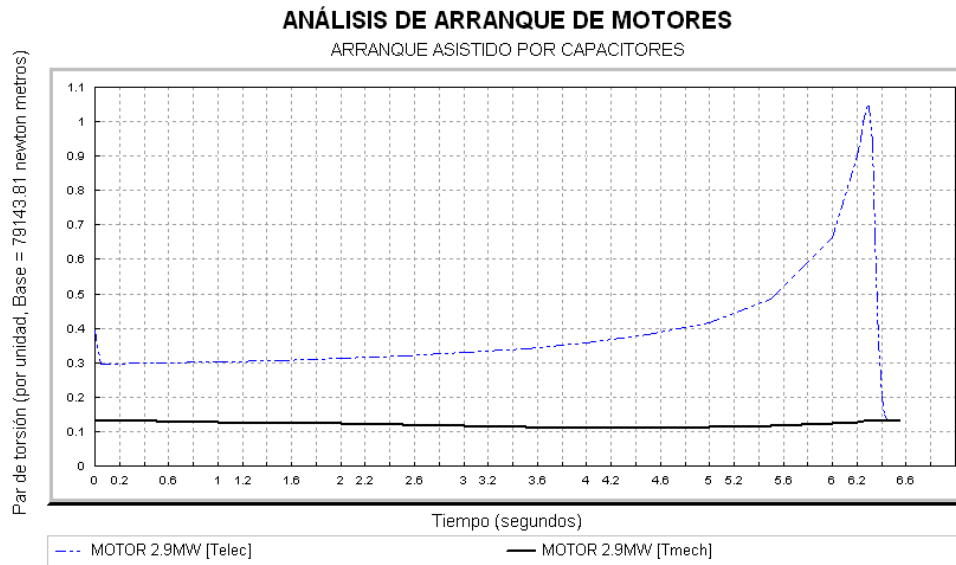


Figura 49. Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por capacitores.



De lo anterior podemos obtener los valores críticos, lo cual se muestra en la siguiente tabla

Tabla II. Valores críticos en el arranque asistido por capacitores.

Valores críticos en el arranque del motor	
Tensión: Valore Mínimos	
Barra	Voltaje (P.U.)
BUS-A	0,837231
BUS-B	0,835896
BUS-C	0,814559
BUS-D	0,813749
Tiempo de Arranque	
Arranque Asistido Por Capacitores	6,55 segundos
Factor de Potencia Promedio	
Factor de Potencia	0,512480 P.U.
Corriente de Arranque Máxima	
Corriente de Arranque	1,006024 Kiloamperios

4.2.3. Arranque por medio de inserción de Impedancias

Se procederá a arrancar el motor por medio de la inserción de impedancias en el inducido. Se usaran resistencias e inductancias según la figura 4-4. A continuación los resultados:

Figura 50. Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias.

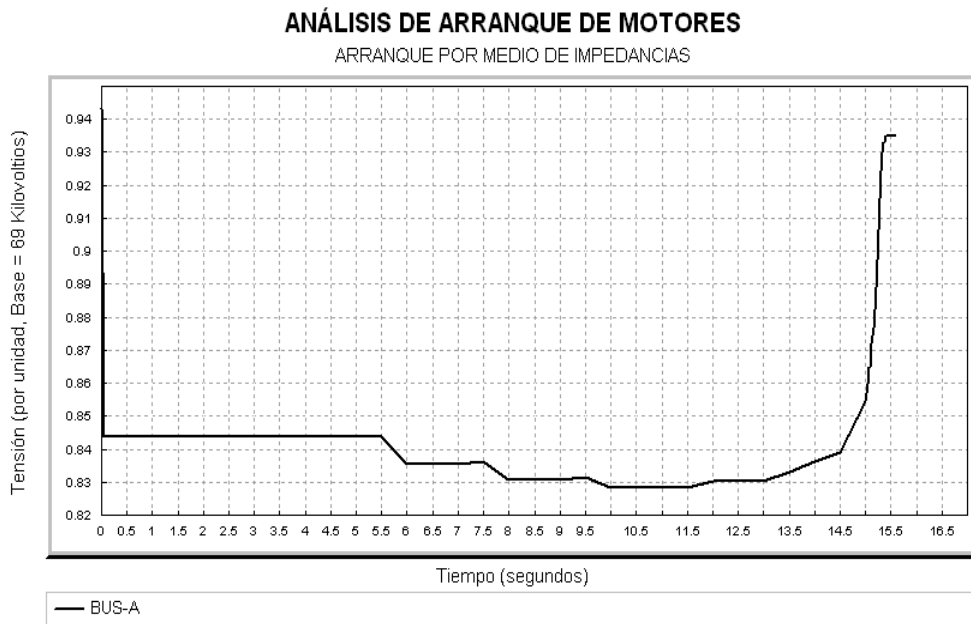


Figura 51. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias.

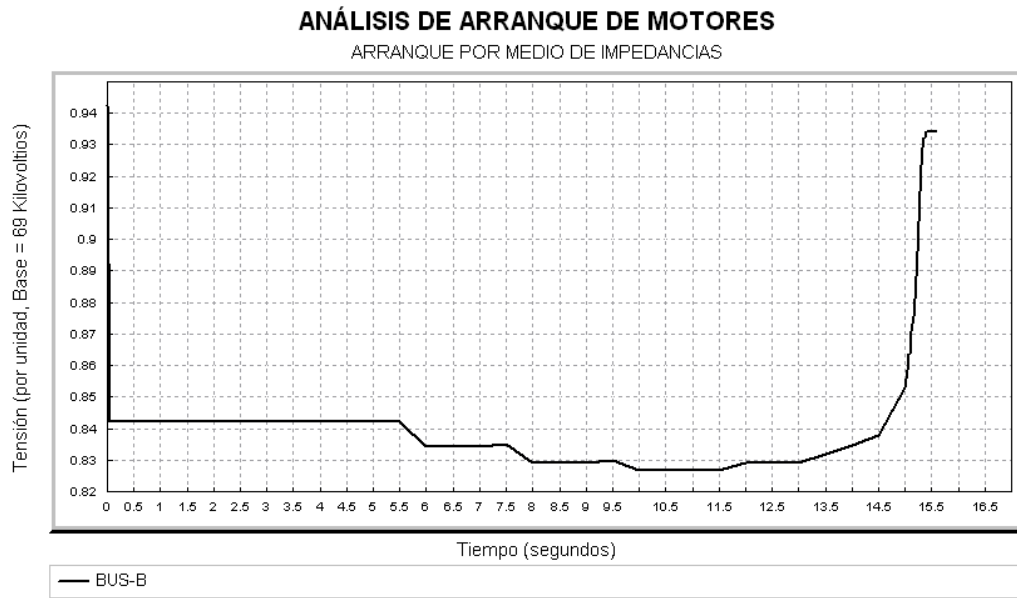


Figura 52. Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor). Arranque por inserción de impedancias.

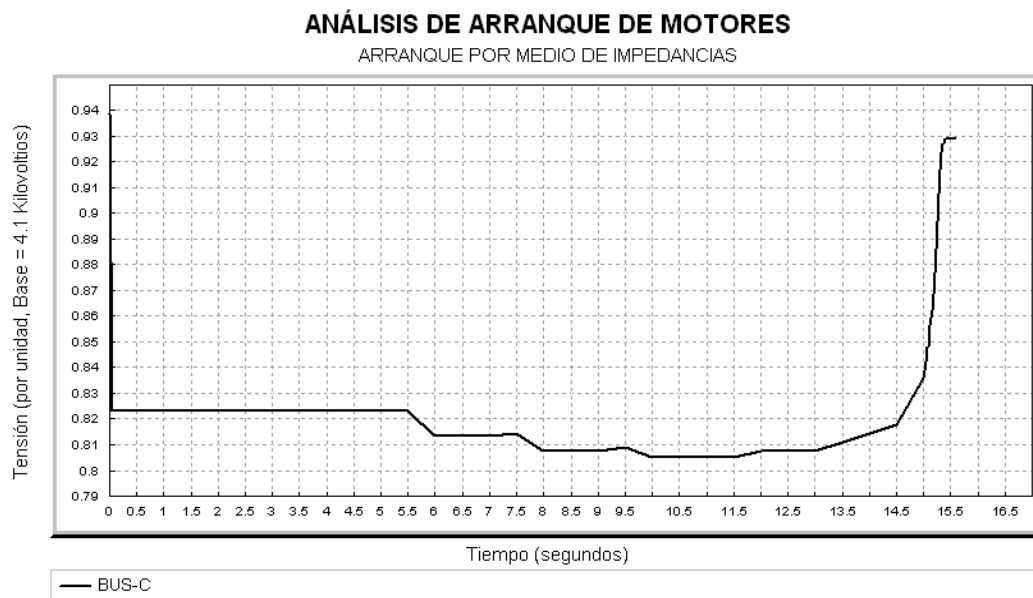


Figura 53 Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque por inserción de impedancias.

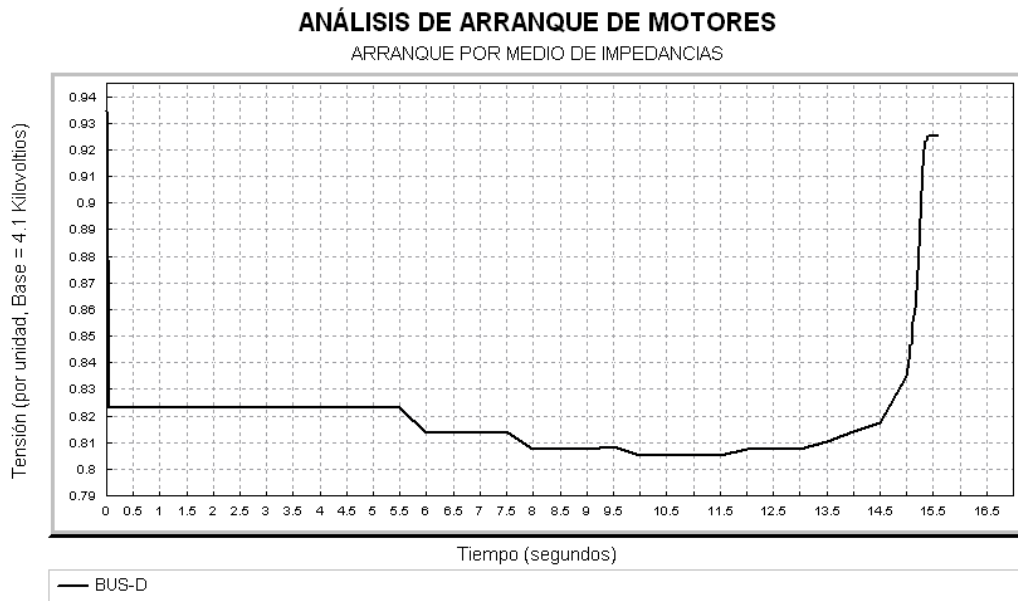


Figura 54 Factor de Potencia en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por inserción de impedancias.

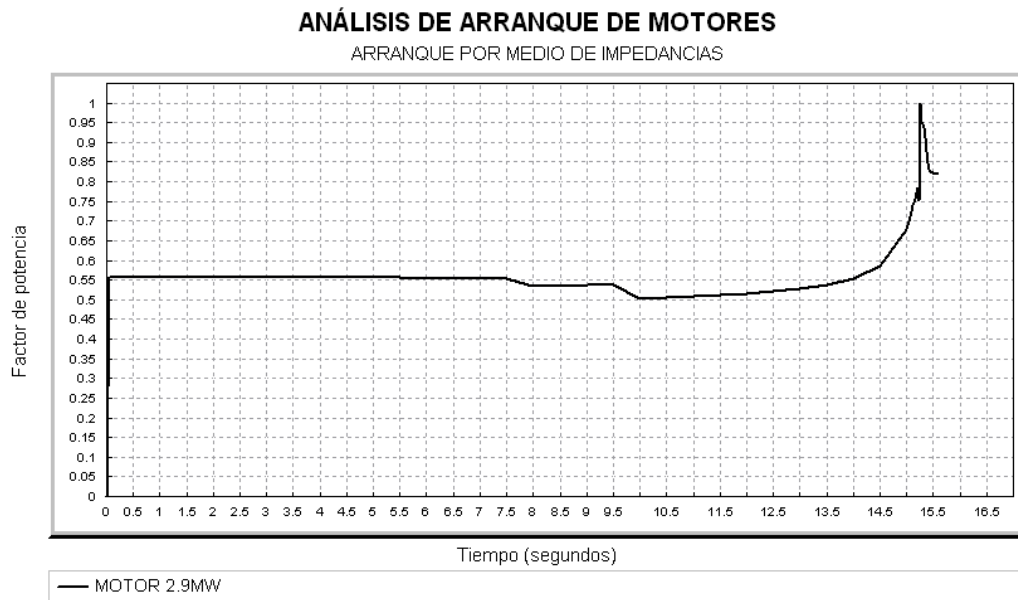


Figura 55 Corriente en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por inserción de impedancias.

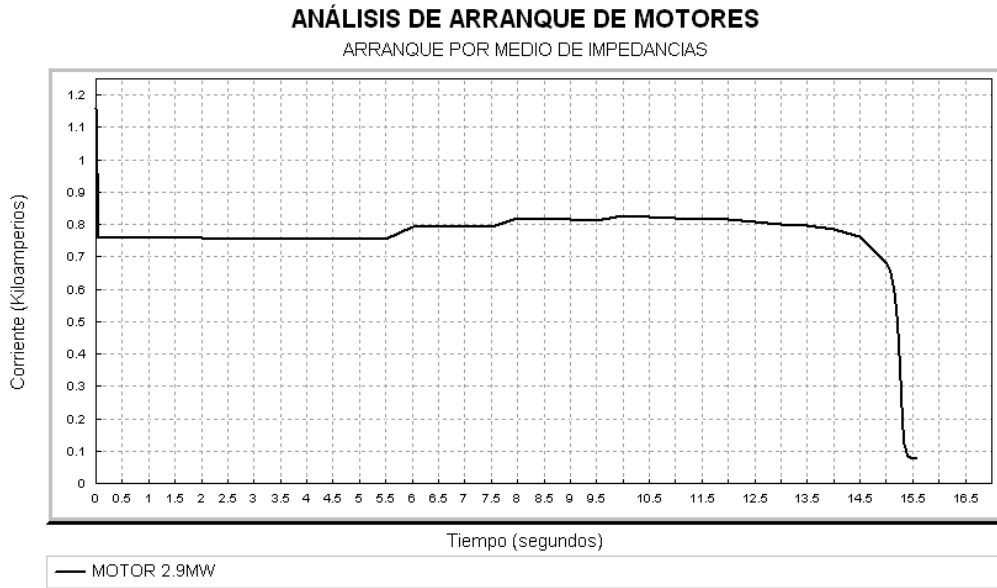
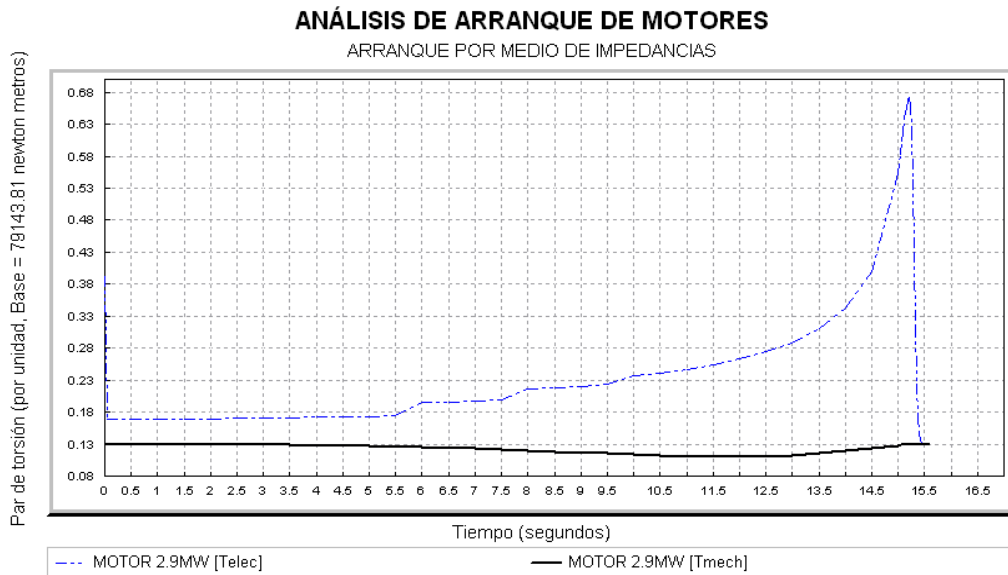


Figura 56 Comportamiento del par eléctrico y mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por inserción de impedancias.



De lo anterior podemos obtener los valores críticos, lo cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III. Valores críticos en el arranque por inserción de impedancias.

Valores críticos en el arranque del motor	
Tensión: Valore Mínimos	
<i>Barra</i>	<i>Voltaje (P.U.)</i>
BUS-A	0,82832
BUS-B	0,82713
BUS-C	0,80512
BUS-D	0,80559
Tiempo de Arranque	
<i>Arranque Por inserción de impedancias</i>	15,5750 segundos
Factor de Potencia Promedio	
<i>Factor de Potencia</i>	0,55432 P.U.
Corriente de Arranque Máxima	
<i>Corriente de Arranque</i>	0,758692 Kiloamperios

4.2.4. Arranque por medio de autotransformador

Se procederá a arrancar el motor por medio de un autotransformador con de la manera que se explico en el capítulo 2. A continuación se presentan los resultados:

Figura 57. Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por inserción autotransformador.

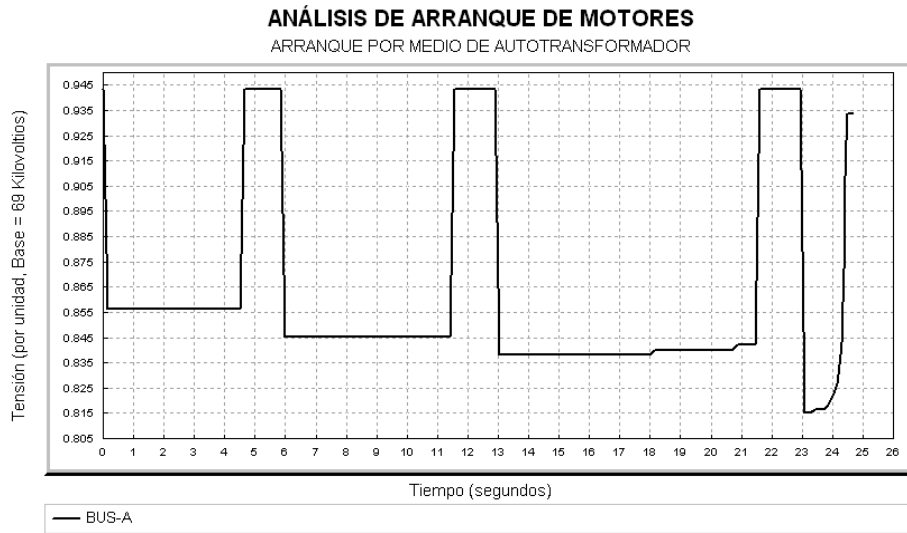


Figura 58. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque asistido por autotransformador.

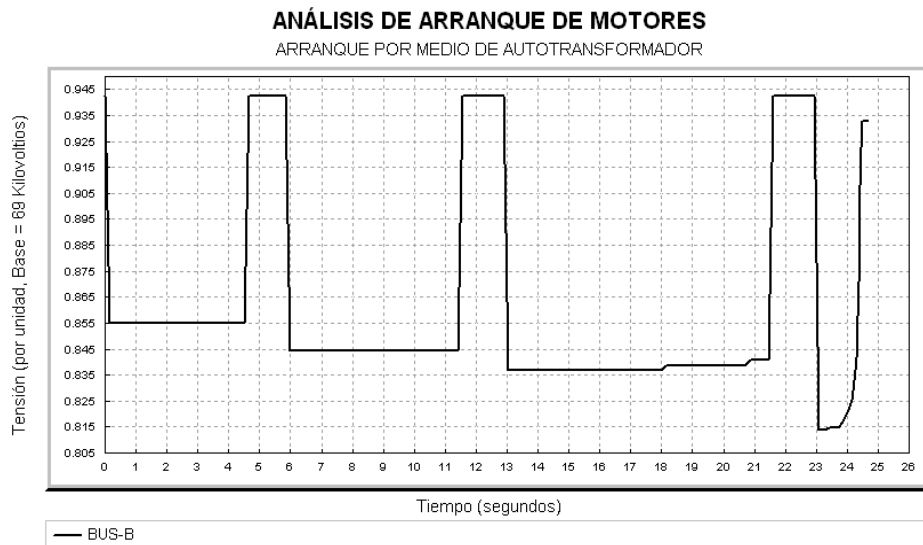


Figura 59. Voltaje en el BUS-C del sistema aislado (Barra donde se conecta el motor).
Arranque asistido por autotransformador.

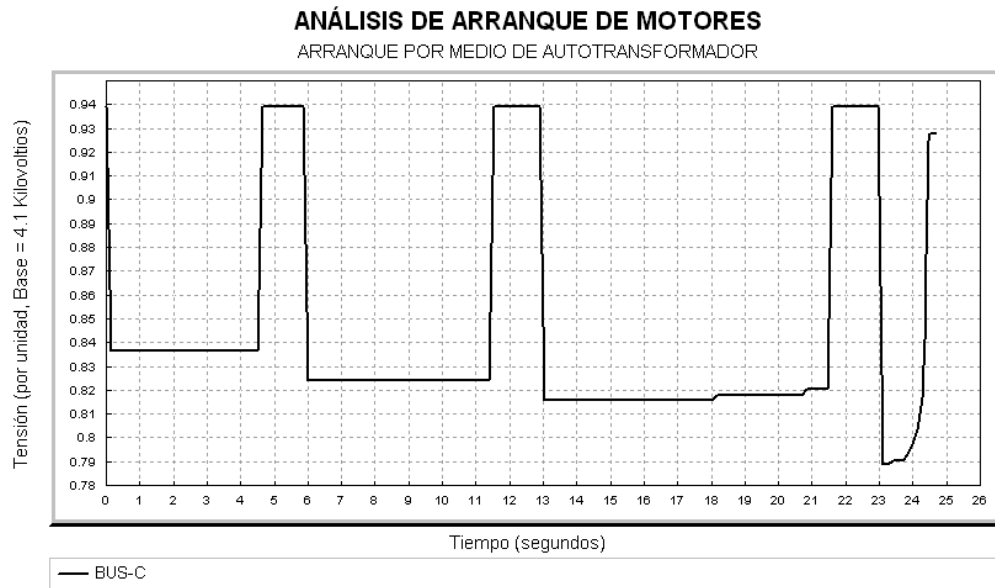


Figura 60. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque asistido por autotransformador.

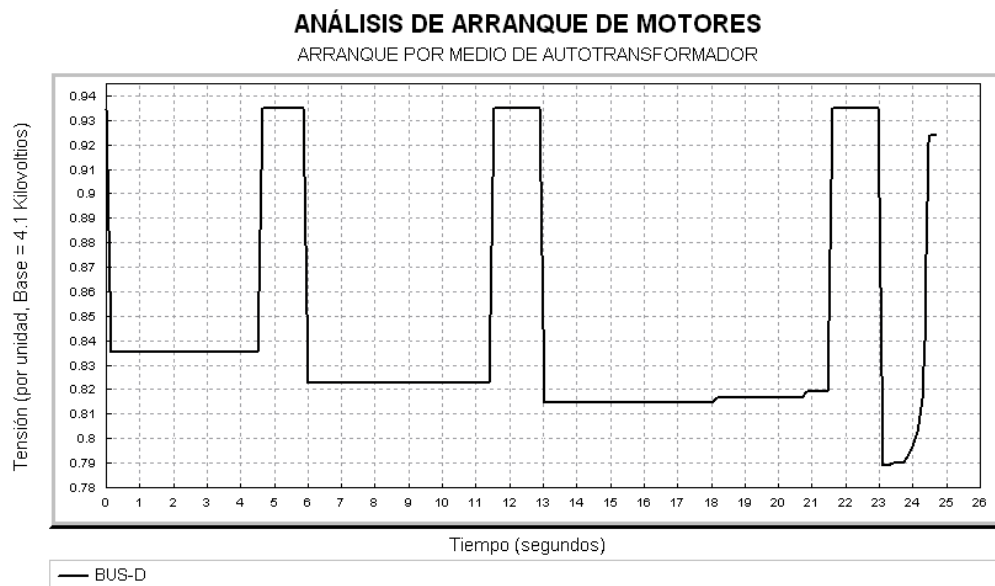


Figura 61. Factor de Potencia en el Motor de 2.9MW. Arranque asistido por autotransformador.

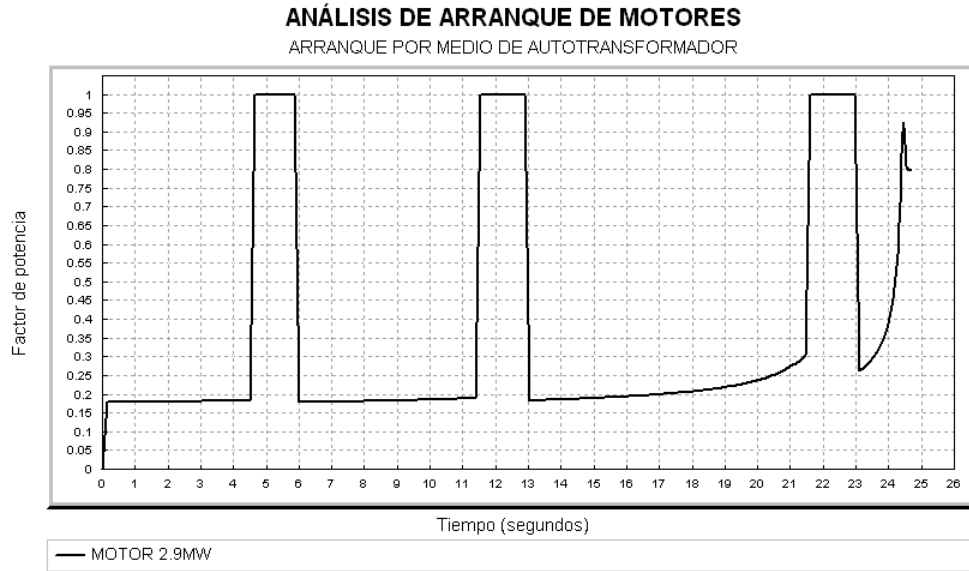


Figura 62. Corriente de Arranque en el Motor de 2.9MW. Arranque asistido por autotransformador.

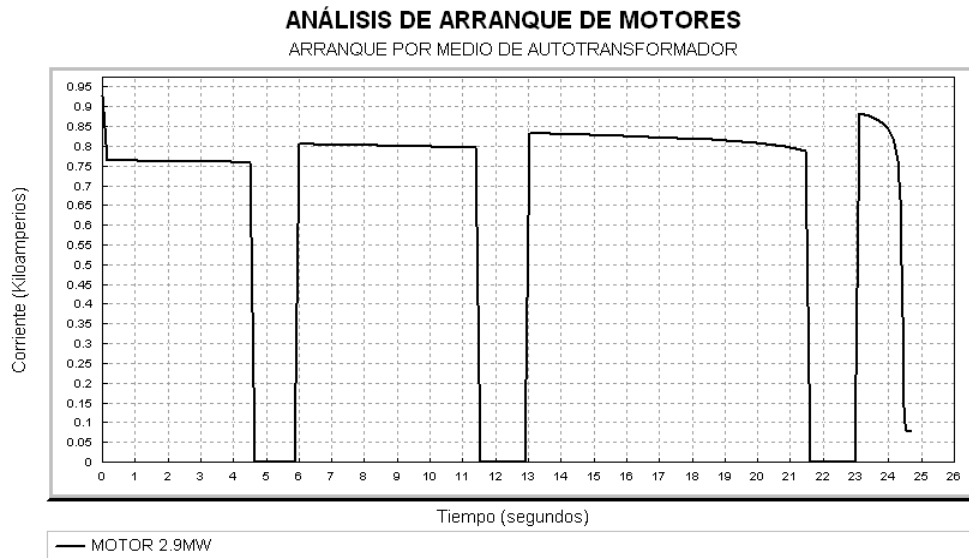
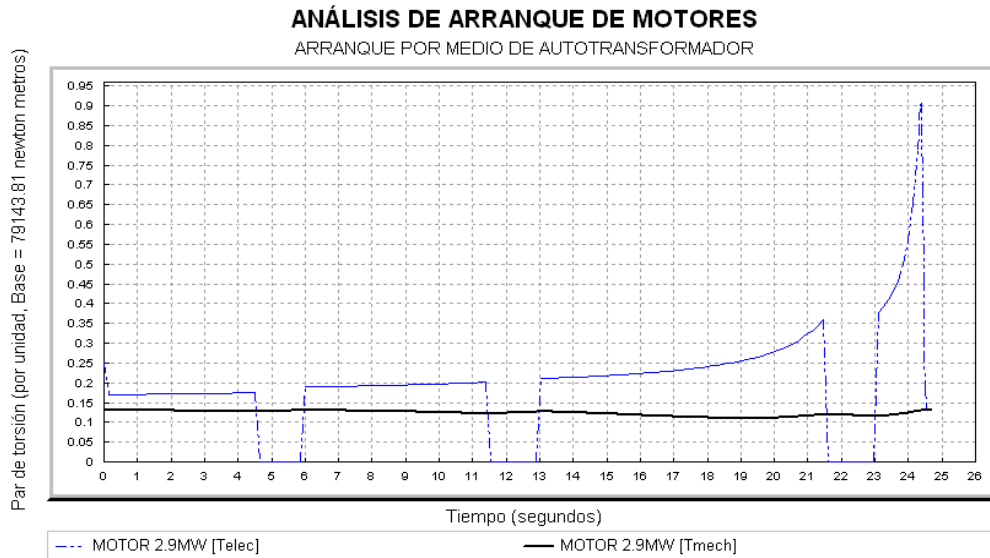


Figura 63. Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque asistido por autotransformador.



De lo anterior podemos obtener los valores críticos, lo cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV. Valores críticos en el arranque por autotransformador.

Valores críticos en el arranque del motor	
Tensión: Tensión: Valores en el instante 0⁺	
<i>Barra</i>	<i>Voltaje (P.U.)</i>
BUS-A	0,856122
BUS-B	0,854924
BUS-C	0,836572
BUS-D	0,835093
Tiempo de Arranque	
<i>Arranque Por inserción de impedancias</i>	24,6749 segundos
Factor de Potencia en el instante 0⁺	
<i>Factor de Potencia</i>	0,177943P.U.
Corriente de Arranque Máxima	

Corriente de Arranque	0,881935 Kiloamperios
------------------------------	-----------------------

4.2.5. Arranque por medio de resistencias rotóricas

A continuación se presentan los resultados:

Figura 64. Voltaje en el BUS-A del sistema aislado. Arranque por resistencias rotóricas.

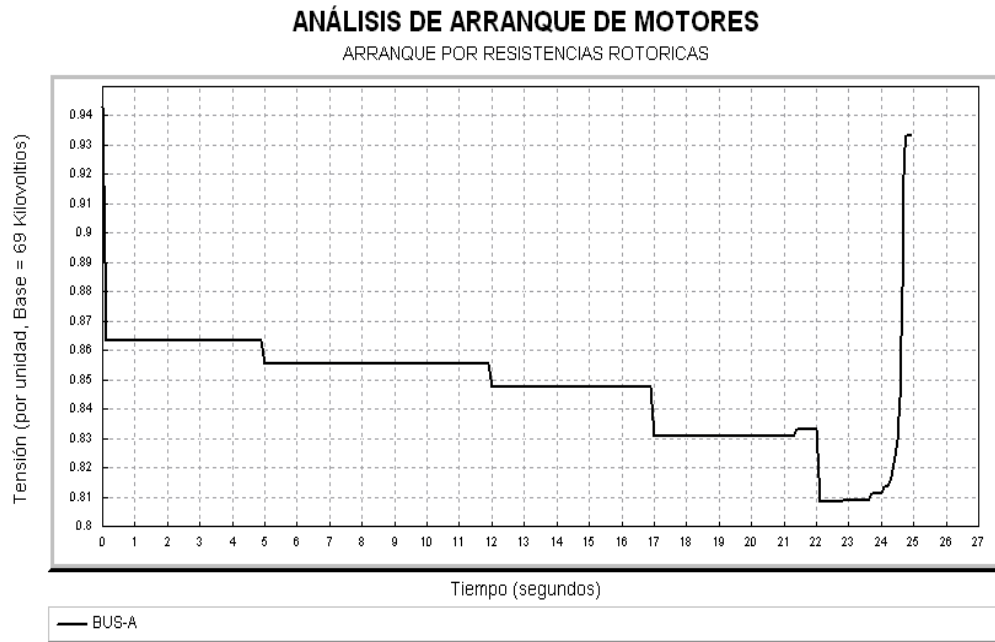


Figura 65. Voltaje en el BUS-B del sistema aislado. Arranque por resistencias rotóricas.

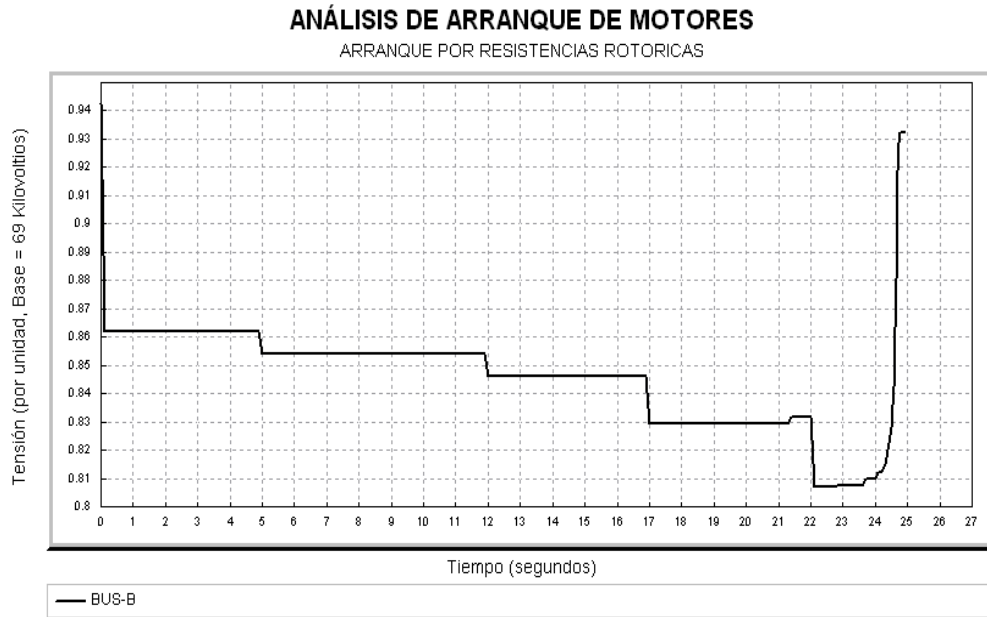


Figura 66. Voltaje en el BUS-C del sistema aislado. (Barra donde se conecta el motor). Arranque por resistencias rotóricas.

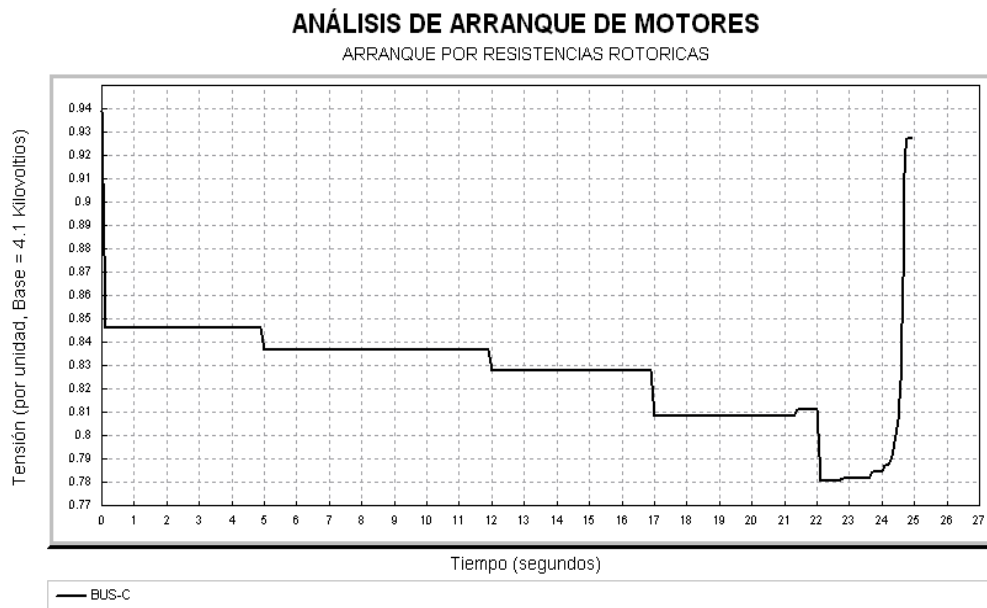


Figura 67. Voltaje en el BUS-D del sistema aislado. Arranque por resistencias rotóricas.

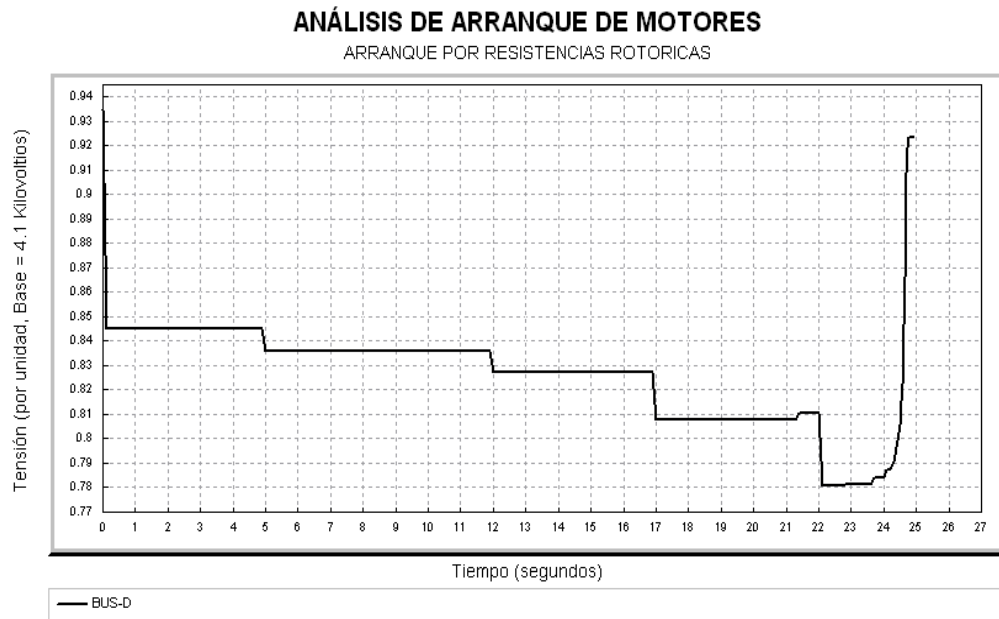


Figura 68. Factor de Potencia en el motor de 2.9MW. Arranque por resistencias rotóricas.

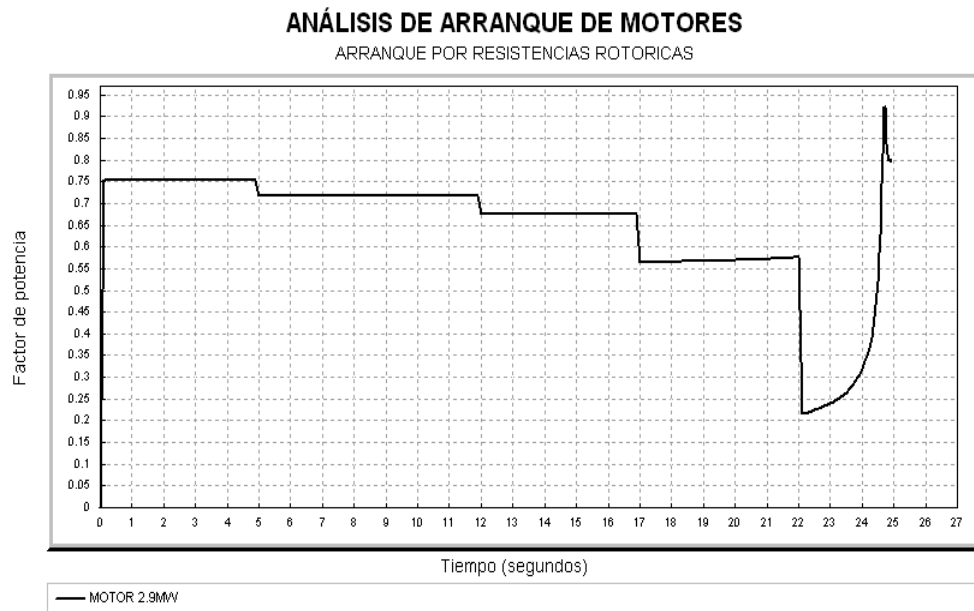


Figura 69. Corriente de Arranque en el motor de 2.9MW. Arranque por resistencias rotóricas.

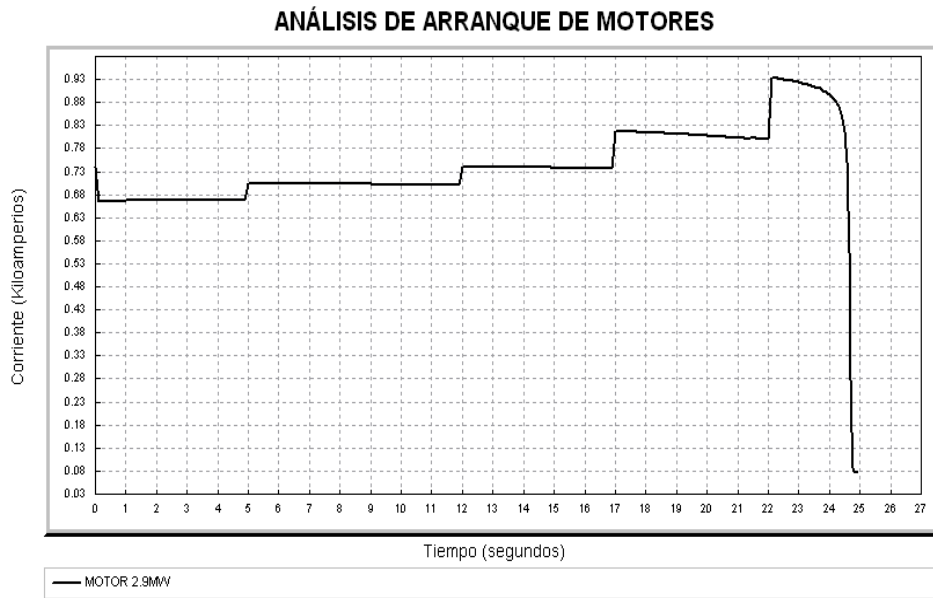
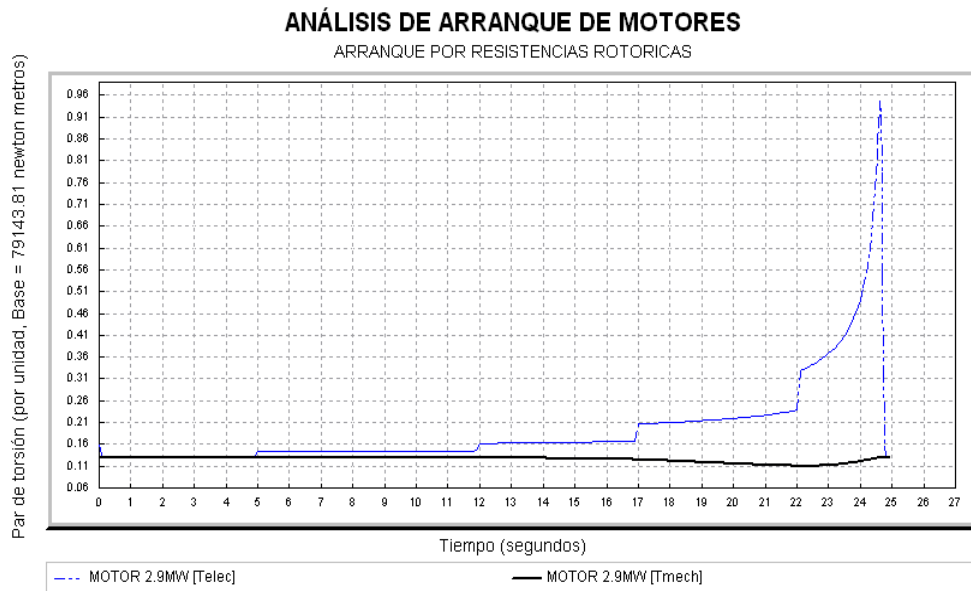


Figura 70. Comportamiento del par eléctrico y el mecánico en el arranque del motor de 2.9 MW. Arranque por resistencias rotóricas.



De lo anterior podemos obtener los valores críticos, lo cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV. Valores críticos en el arranque por autotransformador.

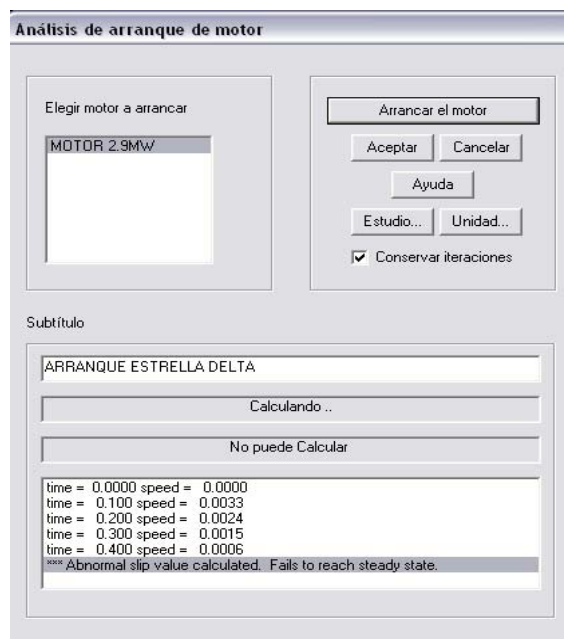
Valores críticos en el arranque del motor	
Tensión: Valores en el instante 0⁺	
<i>Barra</i>	<i>Voltaje (P.U.)</i>
BUS-A	0,865268
BUS-B	0,862020
BUS-C	0,846294
BUS-D	0,845330
Tiempo de Arranque	
<i>Arranque Por inserción de impedancias</i>	24,9249 segundos
Factor de Potencia en el instante 0⁺	
<i>Factor de Potencia</i>	0,752362
Corriente de Arranque Máxima	
<i>Corriente de Arranque</i>	0,739655 Kiloamperios

4.2.6. Arranque estrella-delta

En el capítulo 2, sección 2.6.3 se explicó lo siguiente: “la desventaja de este arranque (Estrella-Delta) estriba en su bajo par de arranque (3 veces menor al nominal), por tal razón no se garantiza que el motor pueda arrancar si en su eje tiene conectada una carga con un elevado par constante. Este método se utiliza con cargas donde el par inicial es bajo y varía con el cuadrado de la velocidad rotación. Ejemplo: ventiladores, mezcladoras, centrifugadoras, bombas centrifugas, bombas de vacío, compresores.”

En este estudio se está arrancando un motor cuya carga es constante y de un alto par de arranque. Por tal razón cuando se intenta simular el arranque del motor por medio de la configuración Estrella-Delta el software no encuentra solución ya que la velocidad del motor en unos instantes después del inicio del arranque llega a cero. A continuación se muestra la ventana desplegada por el software.

Figura 71. Iteraciones del arranque Estrella-Delta.



Por tal razón se concluye que para este tipo de motores el arranque Estrella-Delta no puede aplicarse.

4.2.7. Comparación y conclusiones de los arranques en el sistema aislado

A continuación se muestra la tabla comparativa de los valores obtenidos en cada uno de los arranques de este estudio.

Tabla V. **Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque.**

Tipo de Arranque	Tensión BUS-C (P.U.)	Corriente de Arranque (KA)	Factor de Potencia BUS-C (P.U.)	Par Eléctrico en el Arranque (P.U.)	Tiempo de Arranque
Directo	0,776056	1,160434	0,178015	0,2669750	7,6
Asistido Por Capacitores	0,814559	1,160434	0,178015	0,2952330	6,55
Inserción de Impedancias	0,82329	0,758692	0,556197	0,1679110	15,575
Autotransformador	0,836572	0,881935	0,177943	0,1699040	24,6749
Resistencias Rotoricas	0,846294	0,739655	0,752362	0,1580590	24,9249
Estrella-Delta	---	---	---	---	---

Con base a esta tabla y a los gráficos obtenidos podemos concluir cuales serán los dos arranques utilizados para la simulación el SNI.

Tanto el arranque directo como el arranque por capacitores provocan la mayor caída de tensión y la corriente de arranque mas elevada. A su favor podemos decir que presentan el mayor par eléctrico y el menor tiempo de arranque, sin embargo los valores de tensión están por debajo de los niveles de calidad de energía contemplados en las normas NCO-2 del Administrador del Mercado Mayorista.

El arranque directo lleva el voltaje hasta un critico 0.8 p.u. y por ende el factor de potencia cae también hasta 0.1780 en la barra llamada BUS-A, que es una barra de 69KV. Es decir que el voltaje caería hasta 55.2KV por un tiempo aproximado de 7 segundos, lo cual en un sistema real no puede permitirse.

El arranque asistido por capacitores presenta una mejora relativa con respecto al arranque directo. El voltaje cae hasta 0.837 p.u. en el BUS-A, lo cual representa un 57.75KV por un lapso de aproximadamente 5 segundos. De igual manera es un valor de tensión demasiado bajo.

Entonces, tanto el arranque directo como el arranque asistido por capacitores no son recomendados para el tipo de motores analizado en este trabajo, debido a que provocan una caída de tensión que puede atentar contra la seguridad del SNI.

El arranque por inserción de impedancias en el inducido muestra una mejoría, un factor de potencia en el BUS-A de 0.843 p.u. y un factor de potencia de 0.55, sin embargo cuenta con un bajo par de arranque. Esta sería una buena opción, sin embargo en la práctica es demasiado difícil obtener las impedancias con la capacidad de disipar la potencia que se debe consumir en el momento del arranque para el tipo de motores que estamos analizando.

En la tabla VI se observa que hay dos arranques que presentan la mejor respuesta con respecto a la caída de tensión, estos arranques son el arranque por medio de resistencias rotoricas con voltaje en el BUS-A de 0.87 p.u. (60 KV) y por medio de autotransformador con un voltaje en el BUS-A de 0.86 p.u. (59.34 KV). Tampoco se cumplen con las normas NCO-2, sin embargo es una mejora representativa con respecto a los otros arranques. Además, si observamos el comportamiento del arranque en las gráficas vemos que el voltaje va cayendo de una forma escalonada, con lo cual se provocan menos perturbaciones en la red.

Entonces se concluye que para el análisis en el SNI se utilizarán los arranques que mostraron la menor caída de tensión con un buen par de arranque, estos son:

- Arranque por autotransformador
- Arranque por resistencias rotóricas

4.3. Estudio de arranque de motor sincrónico en Sistema Nacional Interconectado

Se procederá entonces a arrancar el motor de 4000HP en el SNI, tanto con arranque por medio de autotransformador y como por resistencias rotóricas, demanda máxima invierno 2010 y demanda máxima verano 2010.

4.3.1. Arranques por autotransformador y resistencias rotóricas

Los resultados se presentan a continuación.

4.3.1.1. Máxima Invierno 2010

Figura 72. Voltaje en la barra MAR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

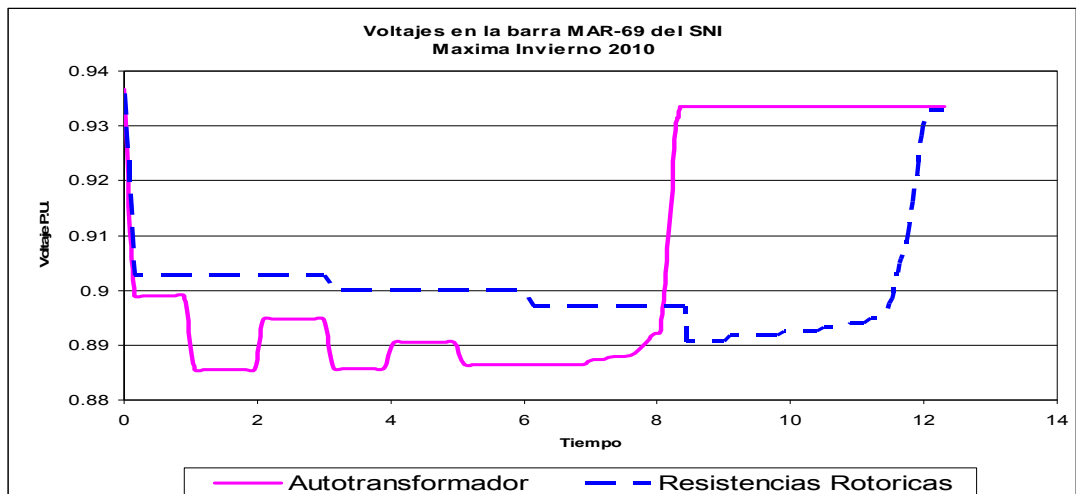


Figura 73. Voltaje en la barra TEJ-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotoricas.

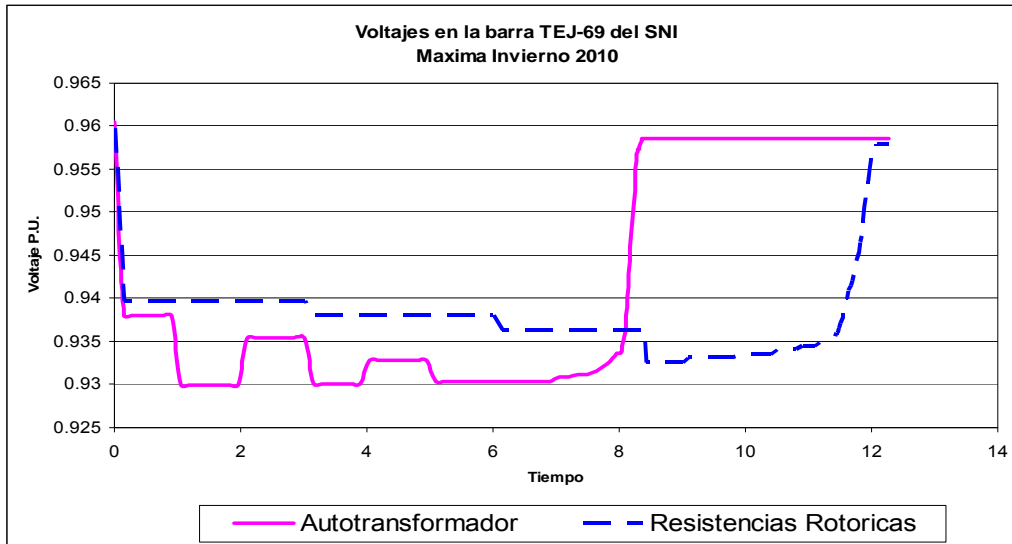


Figura 74. Voltaje en la barra TAC-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

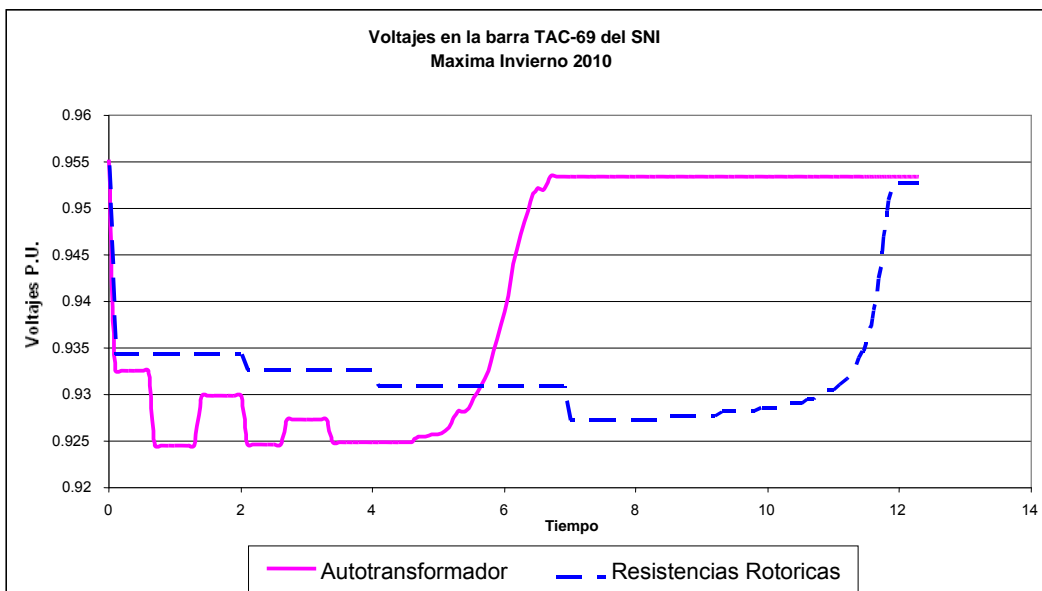


Figura 75. Voltaje en la barra SMR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

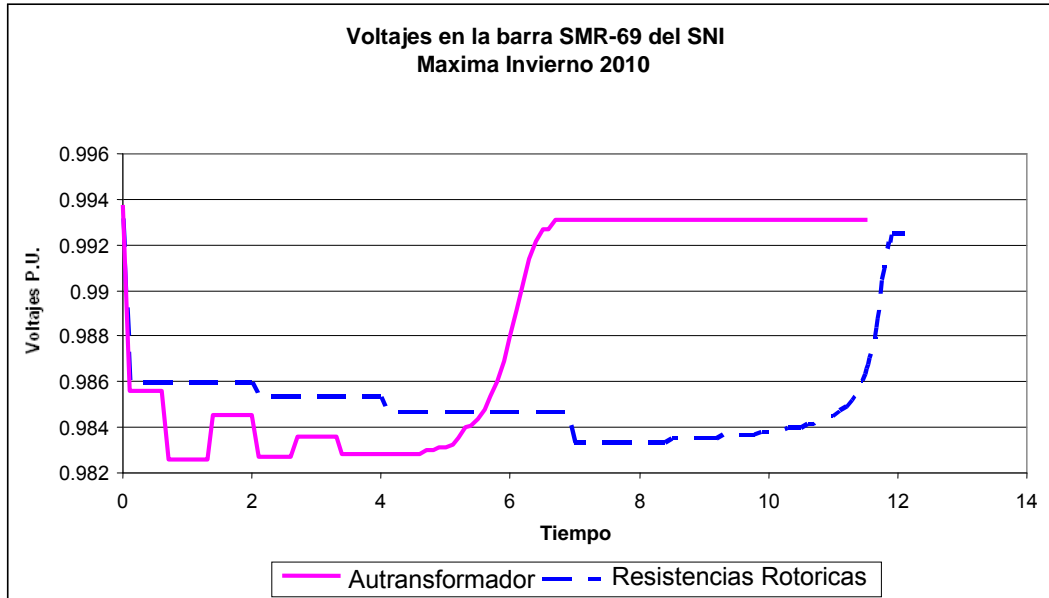


Tabla VI. Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque en el SIN, Máxima invierno 2010.

	MAR-69 (Tensión (por unidad))		TEJ-69 (Tensión (por unidad))		TAC-69 (Tensión (por unidad))		SMR-69 (Tensión (por unidad))	
	Resistencias Rotóricas	Auto transformador	Resistencias Rotóricas	Auto transformador	Resistencias Rotóricas	Auto transformador	Resistencias Rotóricas	Auto transformador
Voltajes en el instante 0⁺	0.902744	0.899009	0.939662	0.937978	0.934313	0.932614	0.985942	0.985605
Voltajes Mínimos	0.890737	0.885626	0.932538	0.92991	0.927142	0.924469	0.983329	0.982619

4.3.1.2. Máxima verano 2010

Figura 76. Voltaje en la barra MAR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

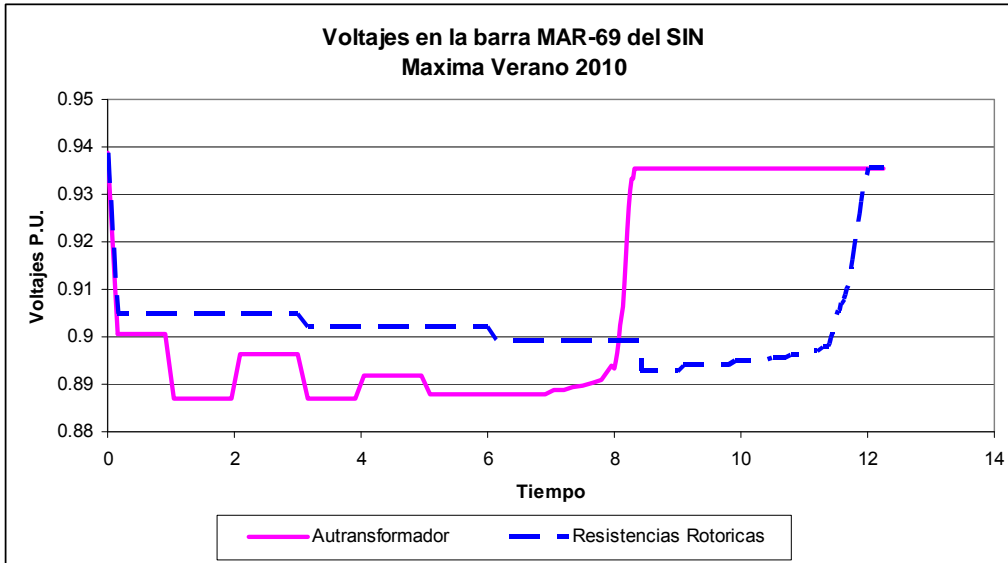


Figura 77. Voltaje en la barra TEJ-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

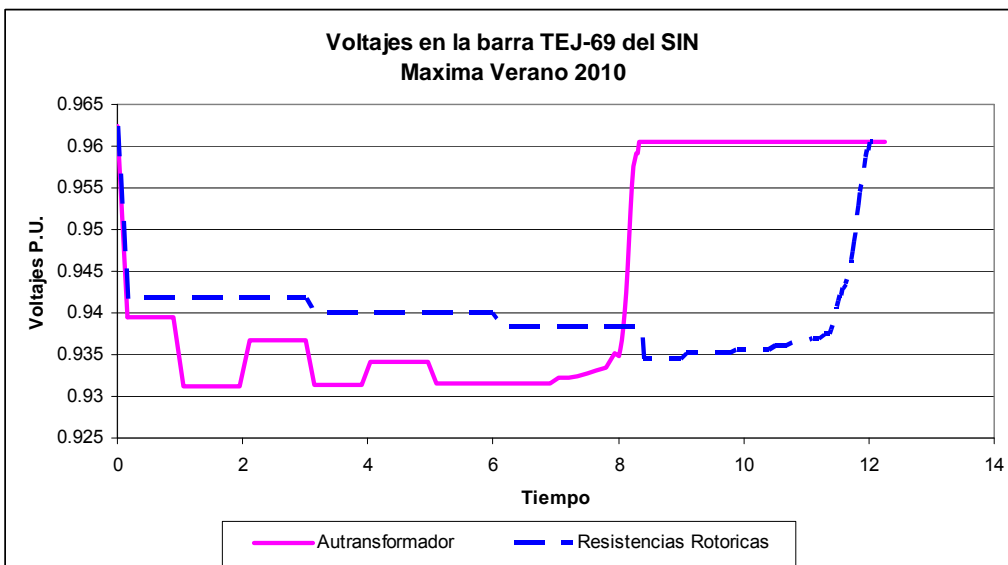


Figura 78. Voltaje en la barra TAC-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

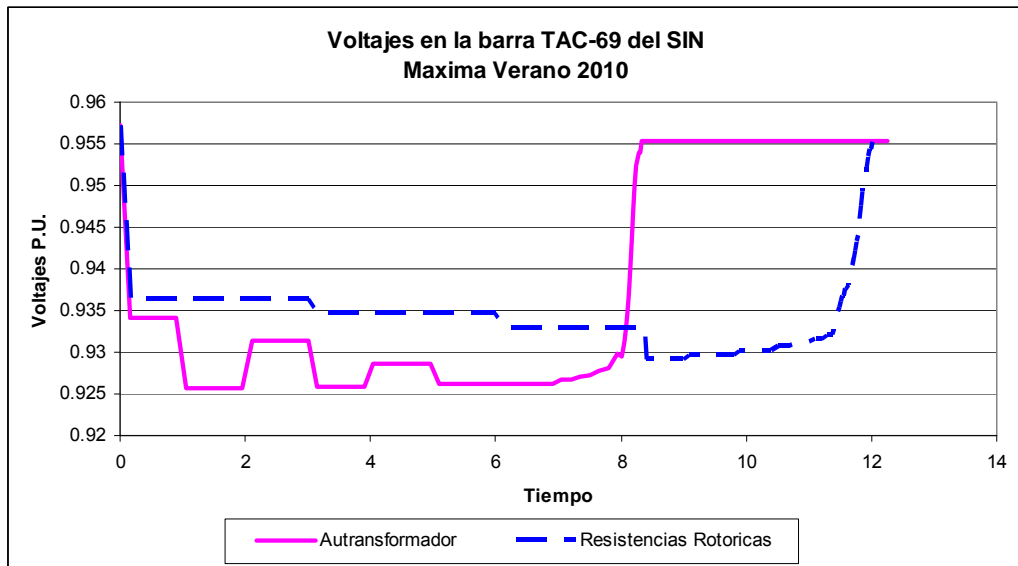


Figura 79. Voltaje en la barra SMR-69 del SNI, arranque por autotransformador y por resistencias rotóricas.

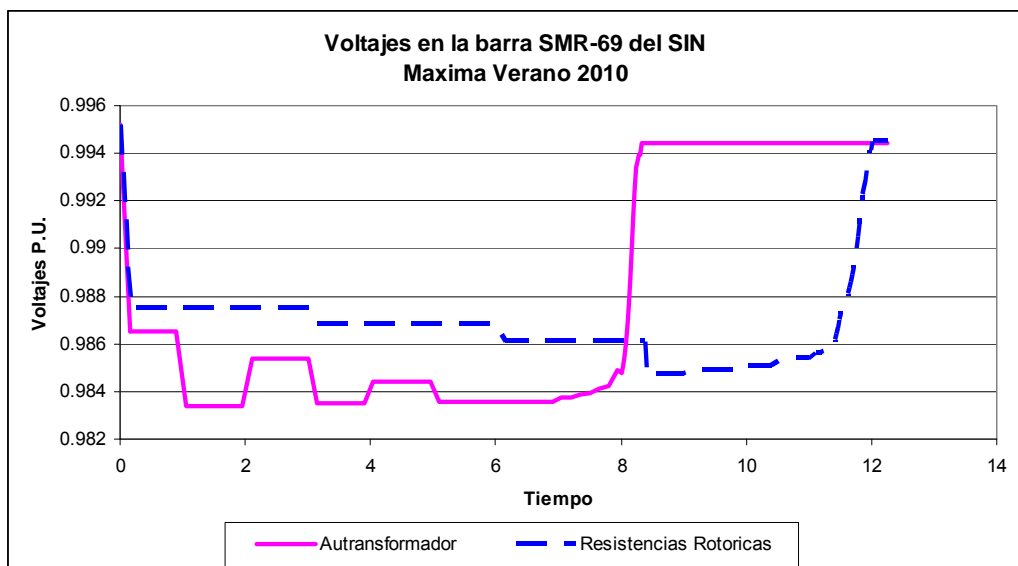


Tabla VII. **Tabla comparativa de los valores obtenidos para cada arranque en el SIN, máxima verano 2010.**

	MAR-69 (Tensión (por unidad))		TEJ-69 (Tensión (por unidad))		TAC-69 (Tensión (por unidad))		SMR-69 (Tensión (por unidad))	
	Resistencias Rotoricas	Auto transformador	Resistencias Rotoricas	Auto transformador	Resistencias Rotoricas	Auto transformador	Resistencias Rotoricas	Auto transformador
Voltajes en el instante 0⁺	0.904968	0.900566	0.941758	0.939427	0.936449	0.934098	0.986534	0.987483
Voltajes Mínimos	0.892814	0.886991	0.934493	0.931175	0.929137	0.925768	0.984738	0.983371

4.3.2. Comparación y conclusiones de los arranques en el SNI

Según los resultados mostrados podemos observar que en las barras MAR-69, TEJ-69 y TAC-69, tanto el arranque por resistencias rotoricas como el arranque por autotransformador provocan una caída de tensión fuera de los límites de seguridad establecidos en las NCO-2 por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica –CNEE-, donde como ya se ha mencionado, el voltaje no debería caer por debajo del 5% del valor nominal, esto es 65.55KV.

El objetivo de este trabajo es determinar cuál de los métodos de arranque provoca el menor impacto en el SNI. Entonces, si observamos el comportamiento de los dos arranques en cada una de las barras analizadas, tanto en demanda máxima invierno 2010 y demanda mínima verano 2010, podemos ver claramente que el método de arranque que provoca menos perturbaciones en el sistema es el arranque por resistencias rotóricas.

Primero veamos que el voltaje mínimo, para este arranque, se da en la barra MAR-69 (Esto es lógico ya que esta es la barra mas cercana a donde se conecta el motor) en demanda máxima invierno 2010 con 0.8907 p.u. (61.458 KV), mientras que en el arranque por autotransformador el mínimo se da también en la barra MAR-69 para demanda máxima invierno 2010 con 0.8856 p.u. (61.10 KV). Se nota una menor caída de tensión de aproximadamente 0.358KV en el arranque por resistencias rotoricas.

Otro parámetro importante es el valor al que cae el voltaje en el instante que inicia el arranque. Para el arranque por resistencias rotoricas el valor mínimo justo después del arranque se da en la barra MAR-69 en demanda máxima invierno 2010 con 0.9027 p.u. (62.286 KV) y para el arranque por autotransformador se da también en la barra MAR-69 en demanda máxima invierno 2010 con 0.8990 p.u. (62.03KV). Una vez mas se puede ver una menor caída de tensión en arranque por resistencias rotoricas en 0.283KV.

En el tiempo de arranque la ventaja es para el autotransformador, ya que llega a la velocidad nominal de 240 rpm en aproximadamente 8.15 segundos, mientras que en el arranque por resistencias rotoricas esto dura 12.1 segundos.

Hasta el momento se podría decir que las diferencias en las caídas de tensión no son suficientes como para concluir que la mejor opción sería el arranque por resistencia rotoricas. Sin embargo, el punto de inflexión que hace inclinarse por dicho método, es la forma en la cual el voltaje va descendiendo hasta un voltaje mínimo. Como se puede observar en la figura 72, el voltaje desciende en forma escalonada hasta un voltaje mínimo, dicho voltaje se mantiene por un pequeño lapso de tiempo (aproximadamente 1 segundo) y luego sube hasta llegar al voltaje nominal de operación. Este comportamiento no provoca perturbaciones que puedan afectar al sistema.

Por el contrario si observamos el comportamiento del arranque por autotransformador, véase también en la figura 72, vemos que provoca variaciones fuertes en el voltaje. Este comportamiento puede atentar contra la seguridad del Sistema Nacional Interconectado.

Entonces tomando como base la anterior explicación y la diferencia entre los voltajes mínimos en el momento del arranque, se puede decir que para el arranque de un motor de gran potencia y con un alto par de arranque en la parte occidental y en general en el Sistema Nacional Interconectado la mejor opción es el método por inserción de resistencias rotoricas.

Ahora bien, el problema que presenta este arranque es que, para llevarlo a cabo en la práctica, es necesario tener acceso a las bobinas de campo y esto solo se cumple en los motores de rotor devanado. Si el caso fuera que nos topamos con un motor que su rotor no es devanado, sino jaula de ardilla, entonces no se tendría otra opción más que optar por el arranque por autotransformador.

CONCLUSIONES

1. La mejor alternativa, la que causa el menor abatimiento del voltaje en el arranque de un motor síncrono de gran tamaño en el Sistema Nacional Interconectado, tanto en los escenarios de demanda máxima invierno 2010 y demanda máxima verano 2010, es el método de arranque por resistencias rotóricas.
2. Si no esta dentro de las posibilidades realizar el método de arranque por resistencias rotoricas debido a que el motor no es de rotor devanado, la mejor alternativa para el arranque de un motor síncrono de gran tamaño en el Sistema Nacional Interconectado, tanto en los escenarios de demanda máxima invierno 2010 y demanda máxima verano 2010, es el método de arranque por autotransformador.
3. El método de arranque Estrella-Delta no puede ser utilizado para el tipo de motores analizados en este estudio, ya que por su misma naturaleza, el arranque estrella delta reduce el par de arranque 3 veces su valor nominal, con lo cual el motor no puede mover la carga conectada a su rotor.
4. En cualquiera de los dos métodos, tanto resistencias rotóricas como auoransformador, hay una caída de tensión abajo del 5% de regulación de voltaje establecido en las normas NCO-2 del Administrador del Mercado Mayorista.

5. Para el arranque de un motor de gran tamaño es necesario estar conectado a un sistema eléctrico de un tamaño considerablemente grande, ya que de lo contrario, como se apreció en los arranques en el sistema aislado, el voltaje se reprime hasta voltajes debajo de los 59KV, lo cual podría provocar un colapso por bajo voltaje.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar que el voltaje se reprima por debajo de los valores normados, tanto en el arranque por resistencias rotóricas, como en el arranque por autotransformador, es necesario realizar compensación de potencia reactiva, por medio de bancos de capacitores conectados por etapas en función del arranque.
2. En el presente estudio se tomó en cuenta la transformación de la línea La Esperanza – San Marcos de 69KV en la actualidad, a 138KV en el futuro, por lo cual es de suma importancia que los trabajos de ampliación se ejecuten, ya que esta modificación contribuye a evitar que la caída de tensión en el momento del arranque de motores sea más severa, beneficiando de esta manera el desarrollo de la industria minera en Guatemala.
3. Con el incremento futuro de la demanda de potencia de la zona occidental, será necesaria la consideración de la reconversión de las principales líneas del área, de 69 a 138 kV incluyendo las líneas de La Esperanza – San Marcos, San Marcos – Tejutla y Tejutla - Tacana, para satisfacer la demanda del sistema eléctrico, cumpliendo con los niveles mínimos de calidad de energía.

4. En la medida en que se incremente la industria minera y en general la demanda de potencia en el área occidental del sistema eléctrico de Guatemala, será necesario incentivar la inversión para la instalación de nuevas plantas generadoras en el área, a fin de contar con generación suficiente en el área que pueda ser convocada para mantener los niveles mínimos de calidad de energía.

5. Utilizar la metodología dada a conocer en este trabajo para elaborar estudios constantes sobre el análisis de arranques de motores grandes en el SNI para proyectos futuros y así evitar caídas de tensión que pongan en riesgo la seguridad del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chapman, Stephen J. ***Electric machinery and power system fundamentals***. E.E.U.U.: McGraw-Hill, 2002.
2. Echavarren Cerezo, Francisco Miguel y otros. “El colapso de tensión: causas y soluciones I”. **Anales de mecánica y electricidad**. (España): 54.2006.
3. Echavarren Cerezo, Francisco Miguel y otros. “El colapso de tensión: causas y soluciones II”. **Anales de mecánica y electricidad**. (España): 17.2006.
4. Enriquez Harper, Gilberto. **Elementos de diseño de las instalaciones eléctricas industriales**. 2ª ed. México: Limusa, 2004.
5. Grainger, John J., William D. Stevenson Jr. **Análisis de sistemas de potencia**. México: McGraw-Hill / Interamericana de México, 1996.
6. Saadat, Hadi. **Power System Analysis**. 2ª ed. E.E.U.U.: McGraw-Hill Higher Education, 2002.
7. Fitzgerald, A. E. **Máquinas eléctricas**. 6ª edición México: Mc Graw Hill, 2004.
8. Siskid, Charles, **Electrical Control Sistem in Industry**, 2ª edition New York: Mc Graw Hill, 1963.

9. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas de estudios para acceso a la red de transporte.** Guatemala. 1998. Disponible en <http://www.cnee.gob.gt>

10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones.** Guatemala. 1998. Disponible en <http://www.cnee.gob.gt>

11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas del servicio de distribución.** Guatemala. 1998. Disponible en <http://www.cnee.gob.gt>