



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado de Ingeniería Eléctrica

**CORTOCIRCUITOS EN EL
GENERADOR SÍNCRONO
TRIFÁSICO**

Autor:

Martínez Ferrán, Daniel

Tutor:

**Serrano Sanz, José
Andrés Departamento de
Ingeniería Eléctrica.**

**Valladolid, Julio
2017**





RESUMEN

Este trabajo versa fundamentalmente sobre el estudio de los cortocircuitos en máquinas síncronas, y ha sido enfocado en la determinación de las reactancias síncronas (homopolar, directa e inversa) asociadas a la máquina mediante una serie de métodos.

Los ensayos realizados, son los siguientes:

- Ensayo de vacío.
- Ensayo de cortocircuito.
- Ensayo con de cortocircuito fase-fase.
- Ensayo homopolar.
- Ensayo de cortocircuito trifásico brusco.
- Ensayo de cortocircuito fase-neutro.
- Ensayo de cortocircuito de dos fases y neutro.

Los ensayos se realizaron según la norma EN 60034-4:2008, fundamental para dar luz a ciertos aspectos de los ensayos, de los que no encontrábamos demasiadas referencias.

A través de las reactancias síncronas. calculadas a partir de los cortocircuitos, estudiaremos el comportamiento genérico de la máquina en las diferentes situaciones.

PALABRAS CLAVE

Máquina síncrona, ensayo, cortocircuito, reactancia, norma EN 60034-4:2008.





ÍNDICE

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	13
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS.....	17
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. INTRODUCCIÓN SOBRE MÁQUINAS SÍNCRONAS	20
1.2. INTRODUCCIÓN SOBRE CORTOCIRCUITOS	24
2. CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.....	37
2.1 MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES	37
2.2 MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO	38
3. HERRAMIENTAS PARA LA RECOGIDA DE DATOS	40
4. ENSAYOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.....	43
4.1 ENSAYO DE VACÍO.....	43
4.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	46
4.3 ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DE REACTANCIAS SÍNCRONAS.....	50
4.3.1 ENSAYOS PARA DETERMINAR REACTANCIA SÍNCRONA HOMOPOLAR	53
4.3.2 ENSAYOS PARA DETERMINAR REACTANCIA SÍNCRONA INVERSA.....	57
4.4 RESULTADOS ENSAYOS	60
4.4.1 MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES	64
4.4.2 MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO.....	77
5. RESULTADOS EN VALORES POR UNIDAD (p.u).....	86
6. COMPROBACIÓN RESULTADOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CORTOCIRCUITOS.....	91
7. PROTECCION FRENTE A CORTOCIRCUITOS.....	107
8. NORMALIZACIÓN.....	116
9. CONCLUSIONES	118
10. BIBLIOGRAFÍA.....	120



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de una máquina síncrona	20
Figura 2. Relación nº de polos - velocidad(rpm) ^[2]	21
Figura 3. Rotor y estátor en los dos tipos de máquinas síncronas. ^[2]	21
Figura 4. Excitación mediante excitatrices de corriente continua. ^[2]	23
Figura 5. Esquema de un cortocircuito trifásico. ^[4]	24
Figura 6. Circuito equivalente de una máquina síncrona durante un cortocircuito trifásico permanente. ^[4]	25
Figura 7. Característica de vacío y recta de entrehierro de una máquina síncrona. ^[4]	25
Figura 8. Onda de la corriente de un cortocircuito brusco. ^[4]	26
Figura 9. Corriente de cortocircuito (i_{cc}) de una fase del inducido y sus	27
Figura 10. Componente unidireccional de la corriente de cortocircuito en una fase del inducido. ^[3]	28
Figura 11. Componente alterna simétrica de la corriente de	29
Figura 12. Componentes de la corriente alterna simétrica i_{as} :	30
Figura 13. Corriente alterna simétrica i_{as} y su valor eficaz I_{cca} . ^[4]	31
Figura 14. Circuito eléctrico equivalente con todas las reactancias (período subtransitorio). ^[5]	33
Figura 15. Circuito eléctrico equivalente para estado transitorio. ^[5]	33
Figura 16. Circuito eléctrico equivalente para régimen permanente. ^[5]	34
Figura 17. Cortocircuitos asimétricos. ^[4]	35
Figura 18. Bornes de la máquina síncrona de polos salientes. ^[3]	37
Figura 19. Máquina síncrona de rotor cilíndrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas. ^[3]	38
Figura 20. Bornes de la máquina síncrona de rotor cilíndrico. ^[3]	39
Figura 21. Plataforma CompactRIO. ^[3]	40
Figura 22. Transductores utilizados para la adquisición de las señales. ^[3]	40
Figura 23. Imagen del software "Gestión de ensayos eléctricos" de las prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas. ^[6]	41
Figura 24. Imagen del software "Lectura de datos de las prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas". ^[6]	42



Figura 25. Esquema de montaje del ensayo de vacío. ^[7] 43

Figura 26. Ensayo de vacío - Máquina de polos salientes. ^[3]..... 44

Figura 27. Esquema de montaje del ensayo de cortocircuito. ^[5] 46

Figura 28. Ensayo de cortocircuito - Máquina de polos salientes. ^[3]..... 47

Figura 29. Ensayo de cortocircuito - Máquina de rotor cilíndrico. ^[3]..... 48

Figura 30. Montaje en la máquina síncrona de polos salientes. ^[3] 50

Figura 31. Montaje en la máquina síncrona de rotor cilíndrico. ^[3] 51

Figura 32. Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. ^[3] 53

Figura 33. 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. ^[3] 54

Figura 34. 2ª parte del 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. ^[3] 55

Figura 35. 3º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. ^[3] 56

Figura 36. 3º Procedimiento - reactancia síncrona homopolar con vatímetro y voltiamperímetro. ^[1]..... 56

Figura 37. 1º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona inversa. ^[3] 57

Figura 38. 1º Procedimiento - reactancia síncrona inversa con vatímetro y voltiamperímetro. ^[1]..... 58

Figura 39. 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona inversa. ^[1] 59

Figura 40. Cortocircuito trifásico brusco. ^[3]..... 60

Figura 41. Corriente de cortocircuito por la fase 1 (I_{F1}) : Componente simétrica (azul) y componente unidireccional(verde). ^[3]..... 60

Figura 42. Corriente transitoria (verde) y subtransitoria (azul). ^[3] 61

Figura 43. Representación de la ecuación (31) ,(32) y la suma de ambas. ^[3] 63

Figura 44. 1º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3]..... 64

Figura 45. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3] 65

Figura 46. 2ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3] 66

Figura 47. 3º procedimiento R.S. Homopolar (1) ^[3] 68

Figura 48. 3º procedimiento R.S. Homopolar (2) ^[3] 69



Figura 49. Disposición en el laboratorio con herramienta "Fluke" ^[3]	70
Figura 50. Captura obtenida mediante herramienta "Fluke" (1) ^[3]	71
Figura 51. 1º procedimiento R.S. Inversa (1) ^[3]	72
Figura 52. 1º procedimiento R.S. Inversa (2). ^[3]	73
Figura 53. Captura "Fluke" (2). ^[3]	74
Figura 54. Captura "Fluke" (3). ^[3]	74
Figura 55. 2º procedimiento R.S. Inversa. ^[3]	75
Figura 56. 1º Procedimiento para R.S. Homopolar. ^[3]	77
Figura 57. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3]	78
Figura 58. 2ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. ^[3]	79
Figura 59. 3º procedimiento R.S. homopolar. ^[3]	81
Figura 60. 1º procedimiento R.S. Inversa. ^[3]	83
Figura 61. 2º procedimiento R.S. Inversa. ^[3]	84
Figura 62. Componentes equilibrados a partir de teorema de Fortescue. ^[9] ...	91
Figura 63. Cortocircuito trifásico a tierra. ^[9]	93
Figura 64. Cortocircuito trifásico aislado de tierra. ^[9]	94
Figura 65. Cortocircuito fase-tierra. ^[9]	95
Figura 66. Cortocircuito bifásico aislado de tierra. ^[9]	96
Figura 67. Cortocircuito bifásico a tierra. ^[9]	99
Figura 68. Protección contra cortocircuitos entre espiras. ^[12]	109





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de ocurrencia de cada tipo de cortocircuito ^[3]	24
Tabla 2. Simbología bornes de la máquina síncrona. ^[3]	37
Tabla 3. Características técnicas máquina de polos salientes. ^[3]	38
Tabla 4. Características técnicas máquina de rotor cilíndrico. ^[3]	39
Tabla 5. Ensayo de vacío - Máquina de polos salientes. ^[7]	44
Tabla 6. Ensayo de cortocircuito - Máquina de polos salientes. ^[3]	47
Tabla 7. Ensayo de cortocircuito - Máquina de rotor cilíndrico. ^[3]	48
Tabla 8. 1º procedimiento R.S. homopolar. ^[3]	64
Tabla 9. 1ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. ^[3]	65
Tabla 10. 2ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. ^[3]	66
Tabla 11. 3º procedimiento R.S. homopolar(1) ^[3]	67
Tabla 12. 3º procedimiento R.S. homopolar(2) ^[3]	69
Tabla 13. 1º procedimiento R.S. inversa (2). ^[3]	73
Tabla 14. 2º procedimiento R.S. Inversa. ^[3]	75
Tabla 15. 1º Procedimiento para R.S. Homopolar. ^[3]	77
Tabla 16. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3]	78
Tabla 17. 2ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3]	79
Tabla 18. 3º procedimiento R.S. Homopolar. ^[3]	81
Tabla 19. 2º procedimiento R.S. Inversa. ^[3]	84
Tabla 20. Resultados reactancias síncronas ambas máquinas. ^[3]	85
Tabla 21. Comparativa reactancias máquina síncrona de polos salientes. ^[3]	89
Tabla 22. Resultados reactancias síncronas en valores p.u. ^[3]	90





ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Relación de las máquinas síncronas.	20
Fórmula 2. Relación corriente de cortocircuito permanente (1)	25
Fórmula 3. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona	25
Fórmula 4. Relación corriente de cortocircuito permanente (2)	26
Fórmula 5. Corriente de cortocircuito como suma de dos componentes	27
Fórmula 6. Componente unidireccional de la corriente de cortocircuito	28
Fórmula 7. Valor eficaz de la comp. permanente, transitoria y subtransitoria	32
Fórmula 8. Corriente total de cortocircuito de una fase del inducido	32
Fórmula 9. Reactancia subtransitoria	33
Fórmula 10. Valor eficaz de la corriente en el período subtransitoria	33
Fórmula 11. Reactancia transitoria	34
Fórmula 12. Valor eficaz de la corriente en el período transitoria	34
Fórmula 13. Reactancia síncrona	34
Fórmula 14. Corriente permanente de cortocircuito	34
Fórmula 15. Reactancia síncrona homopolar (1º procedimiento)	53
Fórmula 16. Relación cortocircuito fase-neutro	54
Fórmula 17. Relación cortocircuito fase-fase	55
Fórmula 18. Reactancia síncrona homopolar (2º procedimiento)	55
Fórmula 19. Reactancia síncrona homopolar (3º procedimiento)	



..... 55

Fórmula 20. Reactancia síncrona homopolar, con P y Q (3º procedimiento)(2)
..... 56

Fórmula 21. Reactancia síncrona inversa (1º procedimiento)
..... 57

Fórmula 22. Reactancia síncrona inversa (1º procedimiento) (2)
..... 57

Fórmula 23. Relación reactancia síncrona directa en cortocircuito trifásico.
..... 59

Fórmula 24. Relación cortocircuito entre dos fases
..... 59

Fórmula 25. Reactancia síncrona inversa (2º procedimiento)
..... 59

Fórmula 26. Valor eficaz corriente en régimen subtransitorio (M.P.S)
..... 61

Fórmula 27. Reactancia subtransitoria (M.P.S)
..... 61

Fórmula 28. Constante de tiempo subtransitoria (M.P.S)
..... 61

Fórmula 29. Valor eficaz corriente en régimen transitorio (M.P.S)
..... 62

Fórmula 30. Reactancia transitoria (M.P.S)
..... 62

Fórmula 31. Constante de tiempo transitoria (M.P.S)
..... 62

Fórmula 32. Comportamiento del transitorio simétrico en el tiempo
..... 62

Fórmula 33. Componente unidireccional en forma exponencial
..... 63

Fórmula 34. Comportamiento de la corriente de cortocircuito por la fase 1 durante el transitorio
..... 63

Fórmula 35. Relación corriente base
..... 86

Fórmula 36. Relación impedancia base
..... 86

Fórmula 37. Resultado en valores p.u.
..... 87

Fórmula 38. Reactancia síncrona en valores (p.u)



..... 89

Fórmula 39. Reactancia subtransitoria en valores (p.u)
..... 89

Fórmula 40. Reactancia transitoria en valores (p.u)
..... 89

Fórmula 41. Relación tensiones en componentes equilibradas
..... 92

Fórmula 42. Relación corrientes en componentes equilibradas
..... 92

Fórmula 43. Relación tensiones para cortocircuito trifásico (con tierra)
..... 93

Fórmula 44. Relación corrientes para cortocircuito trifásico (con tierra)
..... 94

Fórmula 45. Relación corrientes para cortocircuito trifásico (sin tierra)
..... 94

Fórmula 46. Relación tensiones para cortocircuito trifásico (sin tierra)
..... 94

Fórmula 47. Relación corrientes para cortocircuito monofásico
..... 95

Fórmula 48. Relación corrientes para cortocircuito monofásico y resultado
..... 95

Fórmula 49. Relación tensiones para cortocircuito monofásico y resultado
..... 96

Fórmula 50. Relación tensiones para cortocircuito bifásico y resultado
..... 97

Fórmula 51. Relación corrientes para cortocircuito bifásico y resultado
..... 97

Fórmula 52. Relación tensiones para cortocircuito bifásico a tierra y resultado
..... 100

Fórmula 53. Relación corrientes para cortocircuito bifásico a tierra
..... 100

Fórmula 54. Resultado de corriente para cortocircuito bifásico a tierra
..... 100

Fórmula 55. Relación corrientes para cortocircuito trifásico (con tierra)
..... 101



Fórmula 56. Relación corrientes para cortocircuito trifásico (sin tierra)
 102

Fórmula 57. Relación tensiones para cortocircuito trifásico (sin tierra)
 102

Fórmula 58. Relación corrientes para cortocircuito monofásico y resultado
 102

Fórmula 59. Relación tensiones para cortocircuito monofásico y resultado
 103

Fórmula 60. Relación tensiones para cortocircuito bifásico y resultado
 104

Fórmula 61. Relación corrientes para cortocircuito bifásico y resultado
 104

Fórmula 62. Relación tensiones para cortocircuito bifásico a tierra y resultado
 105

Fórmula 63. Relación corrientes para cortocircuito bifásico a tierra
 105

Fórmula 64. Resultado de corriente para cortocircuito bifásico a tierra
 105

Fórmula 65. Resistencia de falta a tierra
 113

Fórmula 66. Corrientes máxima de falta a tierra
 113

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

CEI	→	Comité Electrotécnico Internacional.
EII	→	Escuela de Ingenierías Industriales.
f.e.m.	→	Fuerza electromotriz.
f	→	frecuencia
p	→	nº pares de polos
n	→	Velocidad de giro.
I_{ccp}	→	Corriente de cortocircuito permanente
E_0	→	Fuente de tensión.
I_u	→	Componente unidireccional
I_{cc}	→	Corriente de cortocircuito
I_e	→	Corriente de excitación.
I_f	→	Corriente de fase.
I_L	→	Corriente de línea.
I_{as}	→	Componente alterna simétrica
I_{u0}	→	Valor inicial componente unidireccional
T_i	→	Constante de tiempo para la comp. Unidireccional
T_d'	→	Constante de tiempo transitoria
T_d''	→	Constante de tiempo subtransitoria
TFG	→	Trabajo Fin de Grado.
V	→	Tensión.
V_f	→	Tensión de fase.
V_L	→	Tensión de línea.
p.u.	→	Valores Por Unidad.
X_a	→	Reactancia de amortiguación.
X_e	→	Reactancia de excitación.
X_d	→	Reactancia de eje directo.
X_p	→	Reactancia de reacción de inducido.
X_s	→	Reactancia síncrona.
X_σ	→	Reactancia de dispersión.
X_0	→	Reactancia homopolar.
X_1	→	Reactancia directa.
X_2	→	Reactancia inversa.
X'	→	Reactancia subtransitoria.
X''	→	Reactancia transitoria.
Z_s	→	Impedancia síncrona.
I'	→	Corriente en régimen transitorio
I''	→	Corriente en régimen subtransitorio
I_{cca}	→	Valor eficaz de la componente alterna simétrica
ω	→	Frecuencia angular
U_n	→	Tensión nominal
I_n	→	Intensidad nominal
Z_n	→	Impedancia nominal
R_{PT}	→	Impedancia de puesta a tierra
a	→	Operador que representa desfase de 120° : $1_{<120^\circ}$





1. INTRODUCCIÓN

Me ha parecido conveniente comenzar con una introducción sobre los principales protagonistas: las máquinas síncronas y los cortocircuitos. También creo necesario dar un repaso a las características técnicas de las máquinas síncronas empleadas en los sucesivos ensayos

Luego, pasaré a describir las herramientas utilizadas para la adquisición de datos, para finalmente tratar el tema central, la determinación mediante ensayos de las reactancias síncronas de las máquinas para posteriormente poder analizar en detalle los diferentes tipos de cortocircuito.

A lo largo del TFG y para la realización de los diferentes ensayos he seguido la norma EN 60034-4:2008 con título “Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos” del CEI adoptada como norma UNE.

1.1. INTRODUCCIÓN SOBRE MÁQUINAS SÍNCRONAS

La máquina síncrona es un convertidor electromecánico de energía, que puede funcionar tanto como generador como motor, con una parte giratoria denominada rotor, cuyas bobinas se excitan mediante corriente continua, y una pieza fija denominada estator por cuyas bobinas circula corriente alterna. Las corrientes alternas que circulan por los bobinados del estator dan lugar a un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura. El rotor debe girar a igual velocidad que el campo magnético rotatorio obtenido en el estator para que el par eléctrico medio pueda ser diferente de cero. Por esta razón a esta máquina se la denomina síncrona o sincrónica; el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia del campo magnético rotatorio del estator durante la operación en régimen permanente.

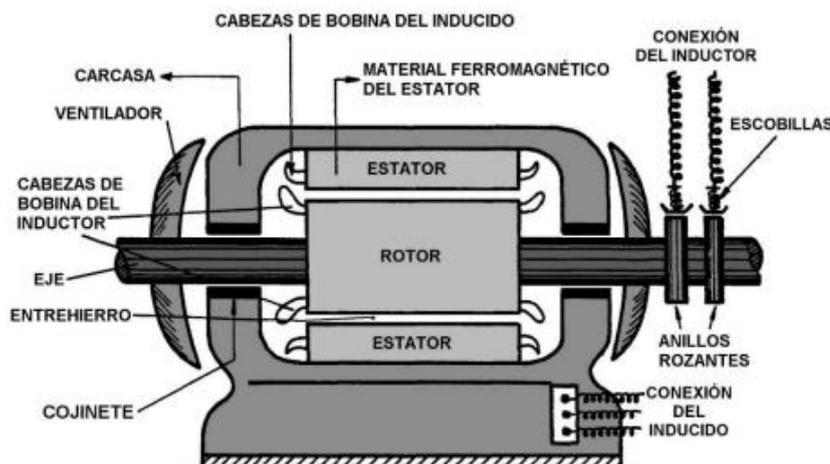


Figura 1. Partes de una máquina síncrona

Su usan fundamentalmente como generadores , ya que no presentan par de arranque y también pueden ser empleadas para controlar la potencia reactiva de la red por su capacidad para, manteniendo la potencia activa constante, variar la reactiva que absorbe o cede a la red.

Una máquina síncrona es una maquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de giro en régimen permanente está relacionada con la frecuencia de la tensión en bornes y el número de pares de polos.

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

(1)

Nº de polos (2p)	Velocidad (n) (r.p.m.)	Nº de polos (2p)	Velocidad (n) (r.p.m.)
2	3000	20	300
4	1500	24	250
6	1000	28	214
8	750	32	188
10	600	36	167
12	500	40	150
16	375	50	120

Figura 2. Relación nº de polos - velocidad(rpm)^[2]

Esta tabla nos indica las velocidades de giro de un alternador para obtener una frecuencia de 50 Hz en función de su número de polos (2p). Podemos observar que a mayor número de polos necesitaremos una menor velocidad (r.p.m) para alcanzarla.

Las máquinas síncronas que van acopladas a motores rápidos deben tener pocos polos mientras que las que se acoplen a motores lentos han de tener muchos. Esto hace que haya dos diseños básicos para las máquinas síncronas, en las que más adelante profundizaremos realizando una serie de ensayos a cada tipo. Estas son *la máquina de polos salientes* y *la de rotor cilíndrico*.

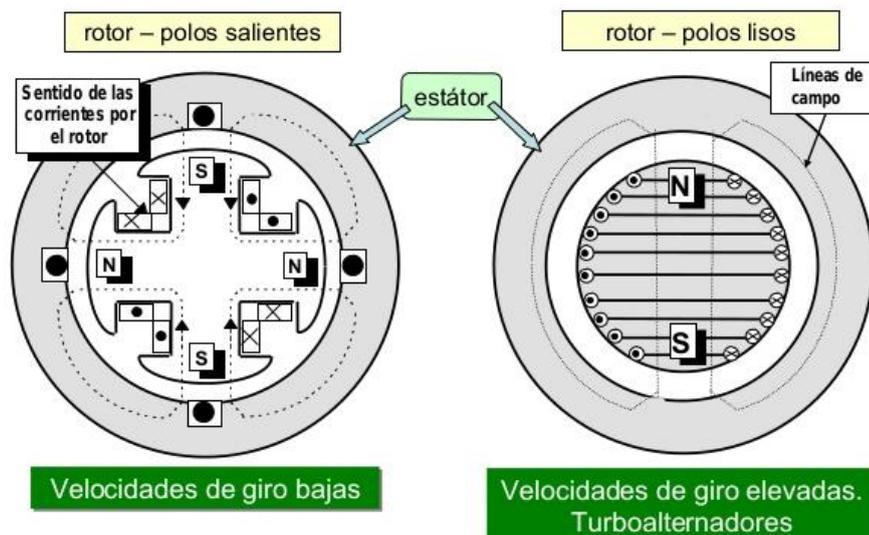


Figura 3. Rotor y estátor en los dos tipos de máquinas síncronas.^[2]



Las *máquinas de polos salientes* poseen muchos polos (más de 4) y baja velocidad. Tienen estator cilíndrico y rotor de polos salientes. Como alternadores se utilizan acopladas a turbinas hidráulicas.

En estas máquinas el entrehierro es variable para conseguir que el campo magnético se distribuya sinusoidalmente a lo largo del entrehierro.

Las *máquinas de rotor cilíndrico* tienen pocos polos (2 o 4) y alta velocidad. En este tipo tanto el estator como el rotor son cilíndricos, por lo que su entrehierro es uniforme. Como alternadores se usan acopladas a turbinas térmicas (turboalternadores). Se trata de máquinas de pequeño diámetro y gran longitud axial.

Además del devanado inductor, en el rotor se aloja otro devanado: el *devanado amortiguador*. Este consiste en un devanado de jaula de ardilla o de trozos de jaula.

Se podría pensar que el devanado amortiguador no tendría que provocar ningún efecto, ya que, al formar parte del rotor, se debería ver sometido a un campo magnético constante que no tendría que inducir f.e.m.s sobre él y, en por tanto, tampoco deberían circular corrientes por él. El objetivo principal de este devanado es, precisamente, el conseguir que la máquina funcione en esta situación ideal en la que el campo magnético tiene una amplitud y una velocidad constantes y el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético.

Por lo tanto, este devanado sirve para:

- Disminuir los armónicos de la f.e.m. inducida.
- Ayudar a la máquina a conservar la velocidad de sincronismo.
- Amortiguar las variaciones bruscas del campo magnético.
- Arrancar los motores síncronos.

SISTEMA DE EXCITACIÓN

El sistema de excitación es el que aporta la corriente continua que la máquina síncrona requiere para funcionar, ya que su inductor es un devanado de corriente continua.

El sistema de excitación no sólo debe suministrar corriente continua al inductor sino que también debe poder regular dicha corriente. Un alternador síncrono requiere de un sistema de control de la excitación que le posibilite ajustar la tensión alterna a los valores deseados.

El procedimiento clásico de excitación de una máquina síncrona está ilustrado en la figura 4. La fuente de corriente continua es una excitatriz, esto es un generador acoplado al mismo eje que la máquina síncrona y que el motor de accionamiento.

Para este caso, la excitatriz consiste en una máquina de corriente continua de excitación independiente cuyo inductor (alimentado con corriente continua) está en el estator y cuyo inducido está en el rotor, y se conecta eléctricamente con el exterior mediante un colector de delgas.

Esta excitatriz necesita además que su inductor esté alimentado con corriente continua por una segunda excitatriz. De esta forma, tenemos la excitatriz principal y la auxiliar o piloto. Ambas acopladas al mismo eje de la máquina. La excitatriz piloto es una máquina de corriente continua shunt (cuyo inductor está conectado en paralelo con su inducido). Por lo tanto, se trata de una máquina autoexcitada, ya que su inductor está alimentado por la tensión que se genera en su propio inducido y no necesita de ningún generador externo.

En este tipo de excitación, se puede controlar la tensión que proporciona su inducido, controlando la corriente de excitación de la excitatriz principal. A su vez, permite controlar la corriente de excitación de la máquina síncrona (más grande), a partir de la del inductor de la excitatriz principal (más pequeña).

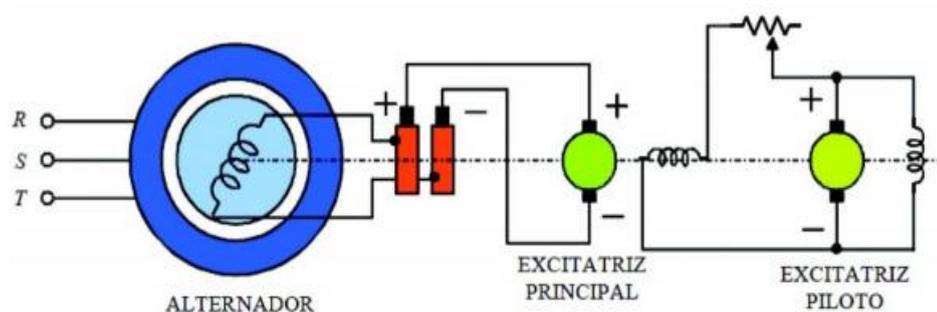


Figura 4. Excitación mediante excitatrices de corriente continua.^[2]

1.2. INTRODUCCIÓN SOBRE CORTOCIRCUITOS

La situación transitoria más grave en la que se puede ver involucrada una máquina síncrona es el cortocircuito trifásico.

El análisis de los cortocircuitos es complejo y nos centraremos en la definición de las reactancias síncronas nuevas que tiene importancia en el comportamiento transitorio de estas máquinas.

Antes de tratar los diferentes tipos de cortocircuito, es interesante indicar que el porcentaje promedio de ocurrencia de cada uno de ellos en las máquinas síncronas, es del orden de:

Tipo de cortocircuito	Incidencia (%)
Monofásicos	80 %
Bifásicos	15 %
Trifásicos	5 %

Tabla 1. Porcentajes de ocurrencia de cada tipo de cortocircuito^[3]

a) Cortocircuito permanente trifásico

Se produce cuando los tres conductores de fase se ponen simultáneamente en contacto, justo en los bornes del inducido de la máquina. Este cortocircuito es simétrico y será suficiente con analizar lo que ocurre en una de las fases.

La corriente de cortocircuito de cada fase del inducido transcurrirá por un período transitorio y, posteriormente, alcanzará un régimen permanente cuyo valor eficaz se va a denominar I_{ccp} .

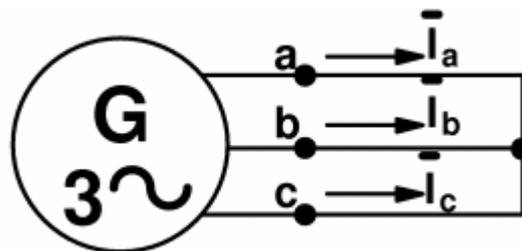


Figura 5. Esquema de un cortocircuito trifásico.^[4]

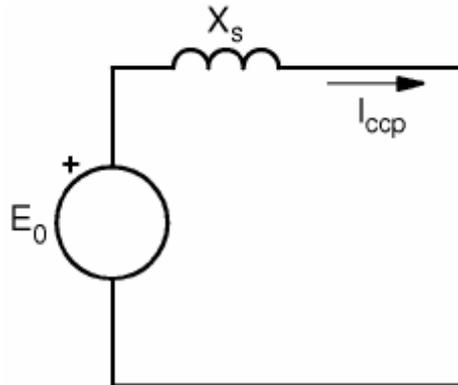


Figura 6. Circuito equivalente de una máquina síncrona durante un cortocircuito trifásico permanente. [4]

El valor eficaz E_{0c} de la f.e.m de vacío se obtiene sobre la recta de entrehierro y el valor E_0 de la característica de vacío.

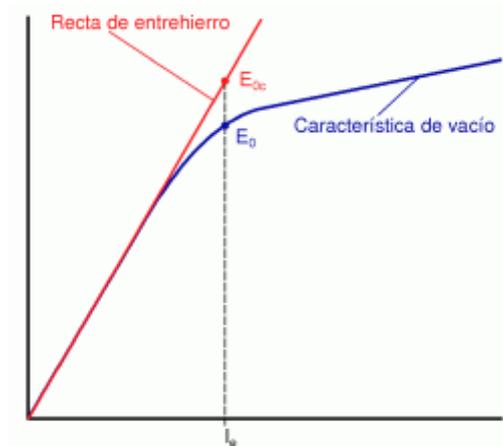


Figura 7. Característica de vacío y recta de entrehierro de una máquina síncrona. [4]

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{X_s(\text{no sat})} = \frac{E_0}{X_s(\text{sat})} \quad (2)$$

E_0 se puede obtener de la siguiente fórmula, siendo V el fasor de la tensión en bornes antes del cortocircuito e I el fasor de la corriente :

$$E_0 = \bar{V} + jX_s \bar{I} \quad (3)$$

La I_{ccp} está desfasada 90° con respecto a la f.e.m. de vacío. Se puede deducir de ahí que la corriente sólo tiene componente en el eje directo y la componente en el eje transversal se puede despreciar.

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{X_s(\text{no sat})} = \frac{E_0}{X_s(\text{sat})} = \frac{E_0}{X_d} \text{ (Válido para máq. de polos salientes)} \quad (4)$$

La corriente permanente de cortocircuito no es demasiado elevada, pudiendo ser menor a la corriente nominal.

Transitorio del cortocircuito trifásico

Cuando en esta máquina se produce este cortocircuito simultáneo en las tres fases de forma brusca aparece un transitorio en las corrientes del inducido. Durante el transitorio intervienen todos los devanados de la máquina: inducido en el estator, inductor y amortiguador en el rotor.

Para una máquina síncrona con conexión en estrella, si previamente estaba en vacío antes del cortocircuito, tendrá una tensión en bornes de la máquina de valor eficaz V , su f.e.m de vacío tiene un valor eficaz E_0 .

$$E_0 = V$$

Ante la situación antes descrita el comportamiento de la corriente en bornes será el siguiente :

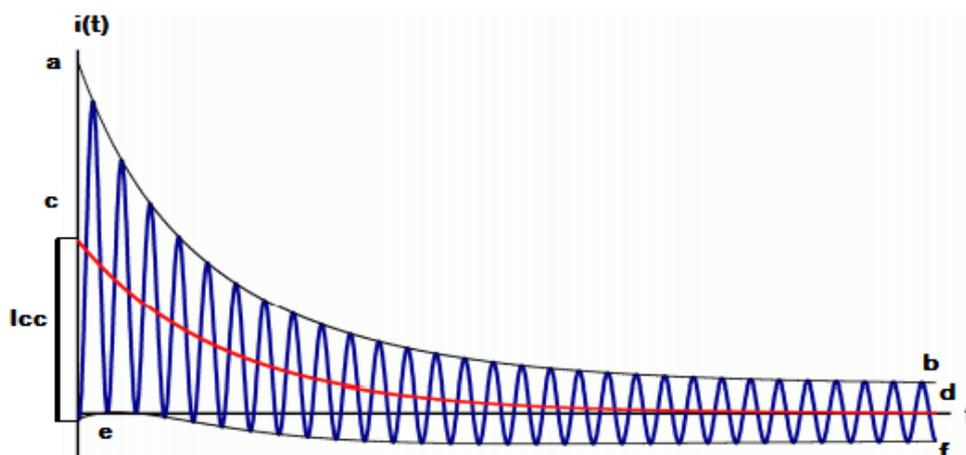


Figura 8. Onda de la corriente de un cortocircuito brusco. [4]

Durante el régimen transitorio de cortocircuito, la amplitud del campo magnético en el entrehierro variará en función del tiempo, por lo que los

devanados del rotor "verán" un campo magnético variable y se inducirán f.e.m.s en ellos. En consecuencia, durante este transitorio, a diferencia de lo que sucede en los regímenes permanentes, aparecerán f.e.m.s inducidas en los devanados inductor y amortiguador que originarán corrientes transitorias en ellos. Estas corrientes, según la Ley de Lenz, se intentan oponer a las variaciones de flujo; lo que a su vez afectará también a las corrientes en las fases del inducido.

Se puede decir que durante el transitorio de cortocircuito la intensidad en una fase del inducido, i_{cc} , será la suma de la de régimen permanente mas las debidas a los efectos de los devanados inducido, inductor y amortiguador.

En la Fig. 8 se representa la evolución de la corrientes de una de las tres fases del inducido durante un cortocircuito trifásico brusco. Podemos observar que es equivalente a la suma de una componente alterna simétrica, i_{as} , cuya amplitud va decayendo hasta llegar a la del régimen permanente, y una componente unidireccional, i_u , que disminuye exponencialmente hasta anularse. La expresión sería :

$$I_{cc} = I_u + I_{as} \quad (5)$$

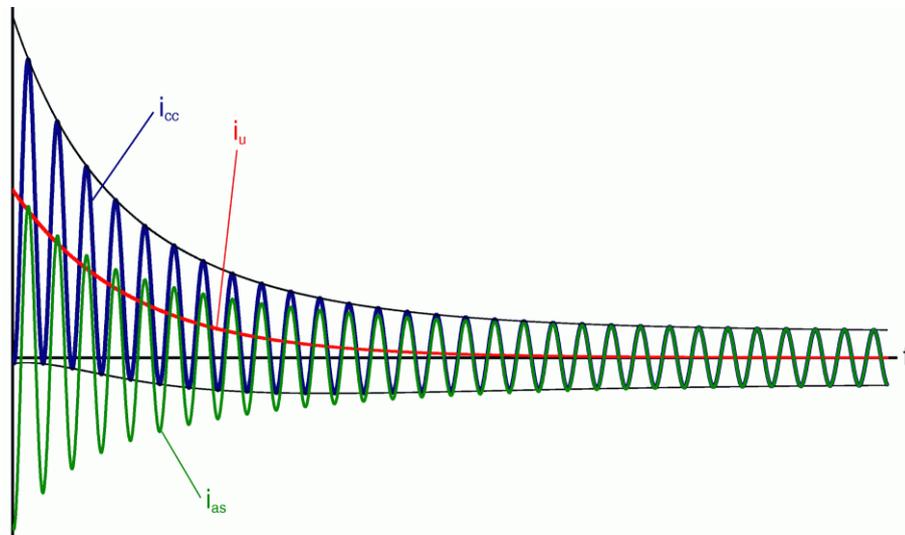


Figura 9. Corriente de cortocircuito (i_{cc}) de una fase del inducido y sus componentes unidireccional (i_u) y alterna simétrica (i_{as}). [4]

Las componentes alternas simétricas de las corrientes de las tres fases del inducido tienen la misma frecuencia y las mismas envolventes, estando desfasadas 120° entre ellas. Como consecuencia de este desfase, sus valores iniciales son distintos en las tres fases. Dado que antes del cortocircuito las corrientes en las fases del inducido eran nulas (marcha en vacío), el valor inicial de la corriente i_{cc} debe ser también nulo en las tres

fases. De forma que en cada fase del inducido los valores iniciales de las componentes unidireccional y alterna simétrica sean iguales, pero de signos opuestos. Por lo tanto, los valores iniciales de la componente unidireccional también son diferentes en las tres fases, aunque la constante de tiempo T_i de esta componente sea igual en todas las ellas.

La componente alterna simétrica se produce debido al efecto de los devanados del rotor y la componente unidireccional es ocasionada por el devanado inducido. La componente unidireccional (Fig. 10) tiene una constante de tiempo T_i cuyo valor es del orden de las décimas de segundo. A su valor inicial en una fase se le denominara I_{u0} . La componente unidireccional se puede interpretar como una curva equidistante entre las dos envolventes que definen el transitorio.

La expresión de la componente unidireccional en forma exponencial será :

$$I_u = I_{u0} \cdot e^{\frac{-t}{T_i}} \quad (6)$$

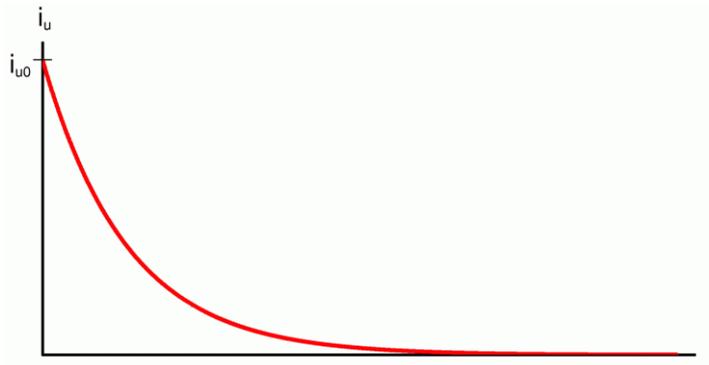


Figura 10. Componente unidireccional de la corriente de cortocircuito en una fase del inducido. [3]

Si además situamos en un nuevo gráfico como eje de abscisas a la corriente unidireccional \overline{cd} (Fig. 8), tenemos que la componente alterna de la misma queda como muestra la figura.

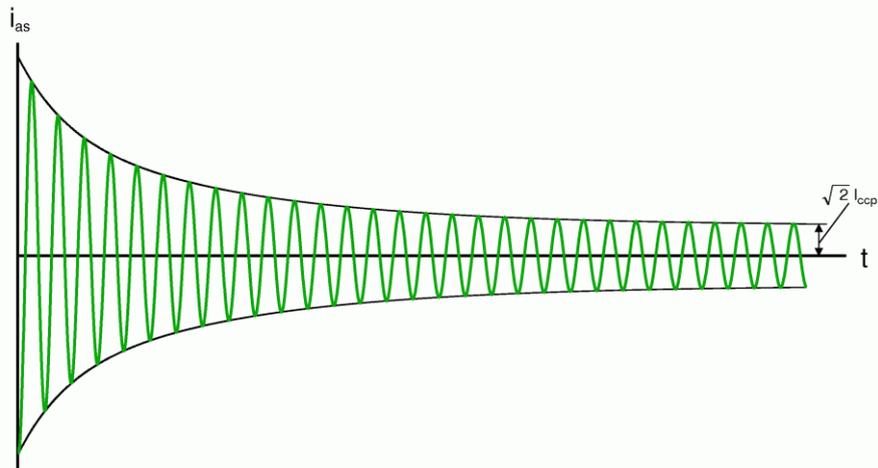
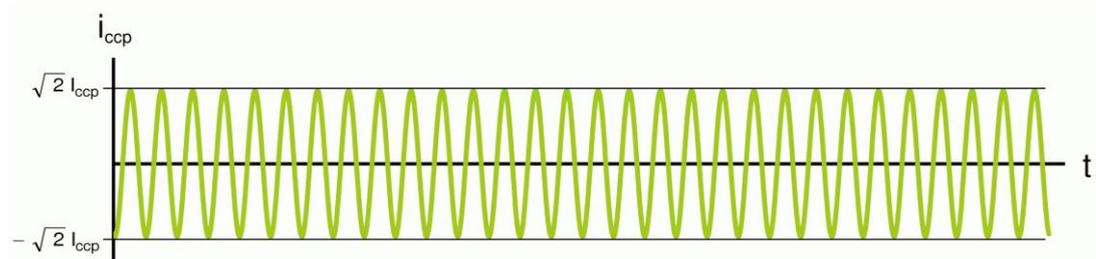
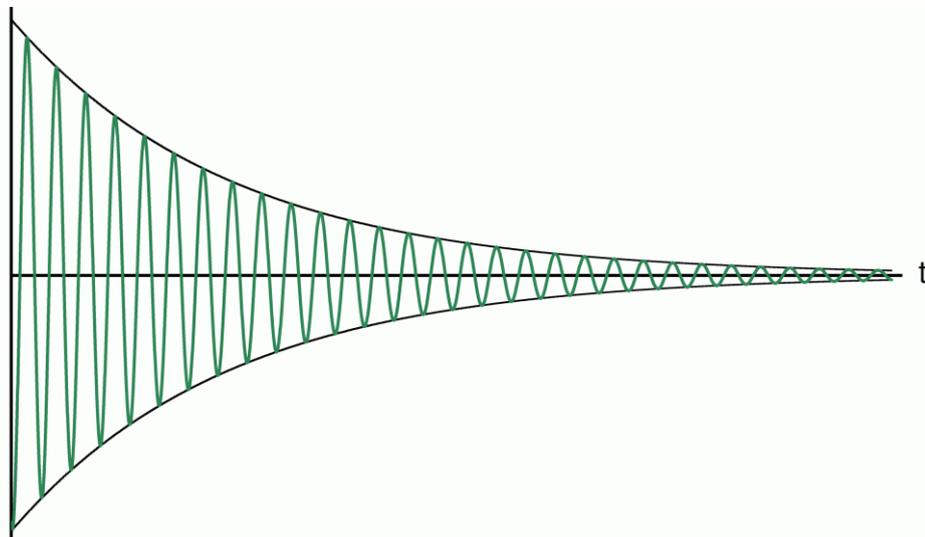


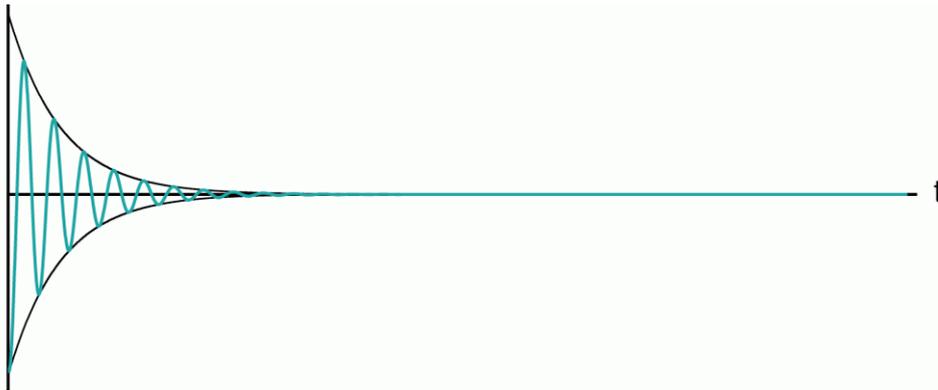
Figura 11. Componente alterna simétrica de la corriente de cortocircuito en una fase del inducido.[4]



a)



b) (Constante de tiempo = T'_d)



c) (Constante de tiempo = T''_d)

Figura 12. Componentes de la corriente alterna simétrica i_{as} :
a) Corriente permanente de cortocircuito.
b) Componente transitoria.
c) Componente subtransitoria. [4]

La componente alterna simétrica de la corriente de una fase del inducido tiene la forma mostrada en la Fig. 11 y se puede considerar como la suma de tres corrientes: la de régimen permanente, la componente transitoria y la componente subtransitoria (Fig. 8).

- La corriente permanente de cortocircuito (Fig. 12a) es una corriente sinusoidal cuyo valor eficaz es I_{ccp} y que está desfasada 90° con respecto a la f.e.m. de vacío (cuyo valor eficaz es E_0).
- La componente transitoria (Fig. 12b) es originada por la acción del devanado inductor y se trata de una corriente alterna que se amortigua hasta anularse. Su amplitud disminuye exponencialmente con una constante de tiempo T'_d cuyo valor es del orden de los segundos.
- La componente subtransitoria (Fig. 12c) es originada por la acción del devanado amortiguador y, al igual que la transitoria, se trata de una corriente alterna que se va amortiguando hasta anularse. Su amplitud disminuye exponencialmente con una constante de tiempo T''_d cuyo valor es del orden de las centésimas de segundo.

Valor eficaz de la corriente alterna simétrica

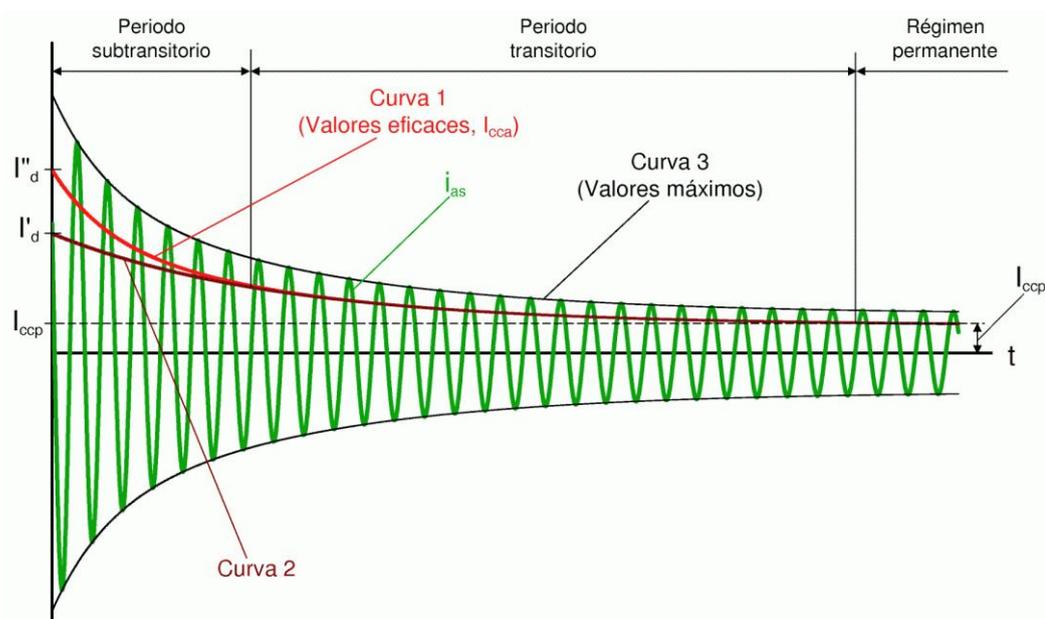


Figura 13. Corriente alterna simétrica i_{as} y su valor eficaz I_{cca} . [4]

En este transitorio se distinguen 3 períodos: subtransitorio, transitorio y régimen permanente.

- Período subtransitorio:

El principal responsable de este período es el arrollamiento amortiguador que se instala en la cabeza de los polos del rotor de la máquina síncrona.

En régimen permanente el generador gira a la velocidad de sincronismo y no existe inducción sobre este arrollamiento, pero en el cortocircuito debido a las variaciones entre el campo rotor y el del estator, se inducen corrientes sobre este arrollamiento, generándose un campo que actúa como freno dando mayor estabilidad al generador y como contrapartida produce el incremento de la corriente de cortocircuito.

- Período transitorio:

Este período se caracteriza por un decrecimiento más lento de la corriente y durante un intervalo mayor.

El principal responsable de este período es el campo del rotor. Durante el cortocircuito se induce en el bobinado de campo una corriente alterna comportándose como un arrollamiento en cortocircuito. De esta manera, estas corrientes inducidas son las que provocan el período transitorio.

- Régimen permanente:

Por último el régimen permanente se prolonga hasta que las protecciones despejen el cortocircuito. En el caso del generador el transitorio de la corriente es más lento y existe una corriente de régimen permanente

mantenida por la máquina motriz y la fuente de excitación del campo. Mientras que en el caso del motor el transitorio es rápido debido a que el eje sólo es mantenido en movimiento por la inercia de la carga y la corriente de régimen será nula.

En la Fig. 13 se han representado también las envolventes de la corriente I_{as} . La envolvente superior (curva 3) muestra la evolución temporal de los valores máximos de I_{as} . Dividiendo esta curva de valores máximos por $\sqrt{2}$ se obtiene la curva 1 que muestra la variación en el tiempo del valor eficaz I_{cca} de la corriente I_{as} .

I_{cca} será la suma de los valores eficaces de las componentes permanente, transitoria y subtransitoria y vendrá expresado de la forma :

$$I_{cca} = I_{ccp} + (I'_d - I_{ccp}) \cdot e^{\frac{-t}{T'_d}} + (I''_d - I'_d) \cdot e^{\frac{-t}{T''_d}} \quad (7)$$

Podemos deducir que la corriente total de cortocircuito de una fase del inducido, viene representada por la siguiente expresión :

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I_{cca} \cdot \cos(\omega t + \gamma) + I_{u0} \cdot e^{\frac{-t}{T_i}} \quad (8)$$

Debido a la presencia de las corrientes descritas anteriormente, deberemos tener en consideración las reactancias de dichos bobinados, que pasaremos a denominar reactancia de excitación X_e , reactancia de amortiguación X_a y reactancia de reacción de inducido X_p , además de la reactancia de dispersión X_σ que limita la corriente de cortocircuito en el estator durante el período subtransitorio.

En la figura 14 se puede apreciar el diagrama del circuito eléctrico equivalente con la disposición de dichas reactancias en la que podemos ver la asociación en paralelo de las reactancias de excitación, de amortiguación y de reacción de inducido, y en serie estas últimas con la de dispersión.

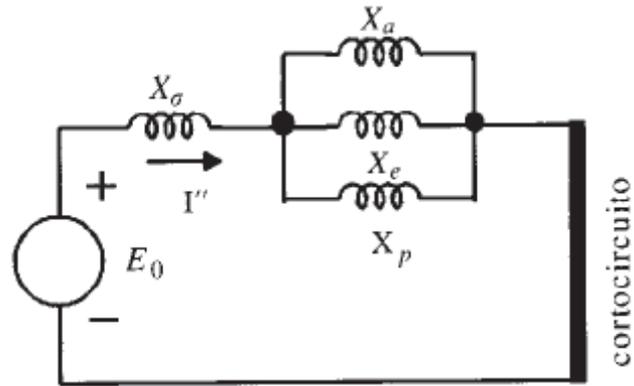


Figura 14. Circuito eléctrico equivalente con todas las reactancias (período subtransitorio).^[5]

Finalmente, la asociación de estas reactancias nos da como resultado la reactancia subtransitoria:

$$X_S'' = X_\theta + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_p}} \quad (9)$$

Así que para obtener el valor eficaz de la corriente :

$$I'' = \frac{E_0}{X_S''} \quad (10)$$

Para obtener el valor eficaz de la corriente atendiendo a la figura 13 tenemos que:

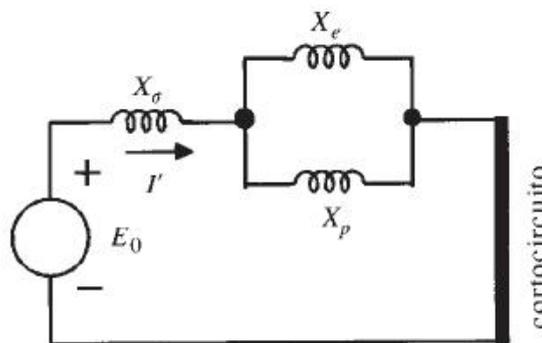


Figura 15. Circuito eléctrico equivalente para estado transitorio.^[5]

En esta situación tenemos que el valor de la reactancia síncrona transitoria es:

$$X'_S = X_\theta + \frac{1}{\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_p}} \quad (11)$$

Entonces , el valor eficaz de la corriente transitoria es:

$$I' = \frac{E_0}{X'_S} \quad (12)$$

Por último durante el período transitorio desaparecerá la reactancia de excitación dando lugar al régimen permanente, en el que se tiene la reactancia síncrona normal X_S como podemos ver en la siguiente figura :

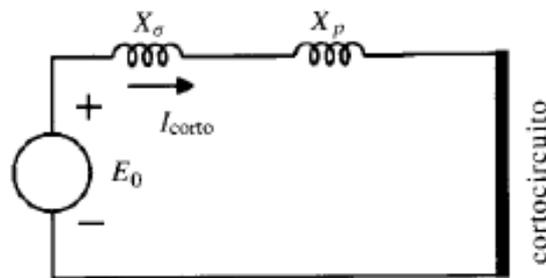


Figura 16. Circuito eléctrico equivalente para régimen permanente. [5]

$$X_S = X_\theta + X_p \quad (13)$$

que corresponde a una corriente de cortocircuito permanente :

$$I_{ccp} = \frac{E_0}{X_S} \quad (14)$$

b) Cortocircuitos permanentes asimétricos en bornes del inducido

Este estudio requiere el uso del método de las componentes simétricas.

En estos cortocircuitos asimétricos basaremos la gran parte de nuestro estudio, y serán descritos con mayor profundidad en apartados siguientes.

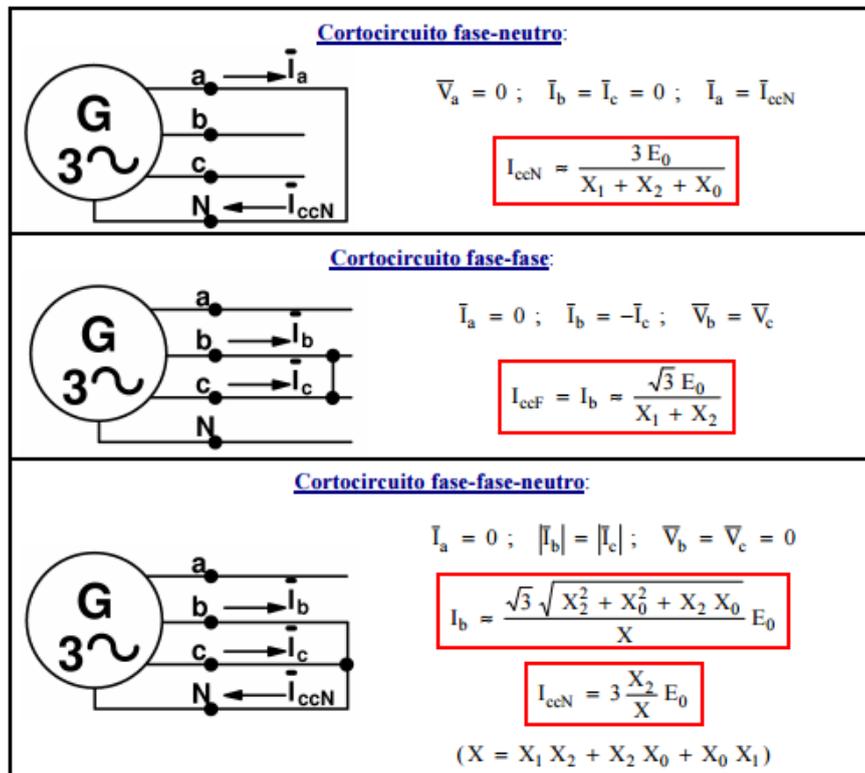


Figura 17. Cortocircuitos asimétricos. [4]

X_1 es la reactancia que presenta la maquina frente a las corrientes de secuencia directa.

X_2 es la reactancia que presenta la maquina frente a las corrientes de secuencia inversa.

X_0 es la reactancia que presenta la maquina frente a las corrientes de secuencia homopolar.



2. CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

A continuación detallaremos las características técnicas de ambas máquinas síncronas con las que hemos trabajado en el laboratorio del departamento de Máquinas Eléctricas de la escuela de Ingenierías Industriales (sede Francisco Mendizábal). En las siguientes tablas mostramos todas y cada una de ellas, pero las que realmente nos importarán para posteriores cálculos serán los datos sobre potencia, corriente y tensión.

También mostraremos en detalle una imagen de los bornes que hemos usado para ambas máquinas, y es necesario apuntar que no están nombrados según la nomenclatura actual :

	ENTRADA			SALIDA		
MÁQUINA SÍNCRONA	U	V	W	X	Y	Z
NOMENCLATURA ACTUAL	U1	V1	W1	U2	V2	W2

Tabla 2. Simbología bornes de la máquina síncrona. [3]

2.1 MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

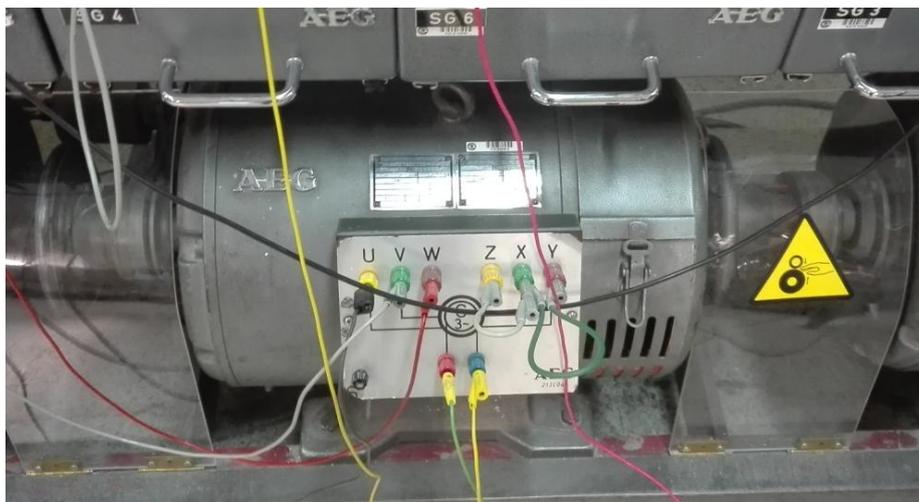


Figura 18. Bornes de la máquina síncrona de polos salientes. [3]

	GENERADOR	MOTOR
Tipo	Gd Sy 150/150-4	Gd Sy 150/150-4
Potencia	3 kVA, $\cos \varphi=1$	3 kW, $\cos \varphi=1$
Revoluciones	1500 rev/min	1500 rev/min
Tensión	380/660 V ΔY	380/660 V ΔY
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Corriente	5,8/3,35 A	5,8/3,35 A
Clase aislamiento	E	E
Clase protección	P 22	P 22
Excitación	220 V	220 V
Número de polos	4	4
Resistencia estator	2,8 Ω en frío (<70°C)	2,8 Ω en frío (<70°C)

Tabla 3. Características técnicas máquina de polos salientes. [3]

2.2 MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO

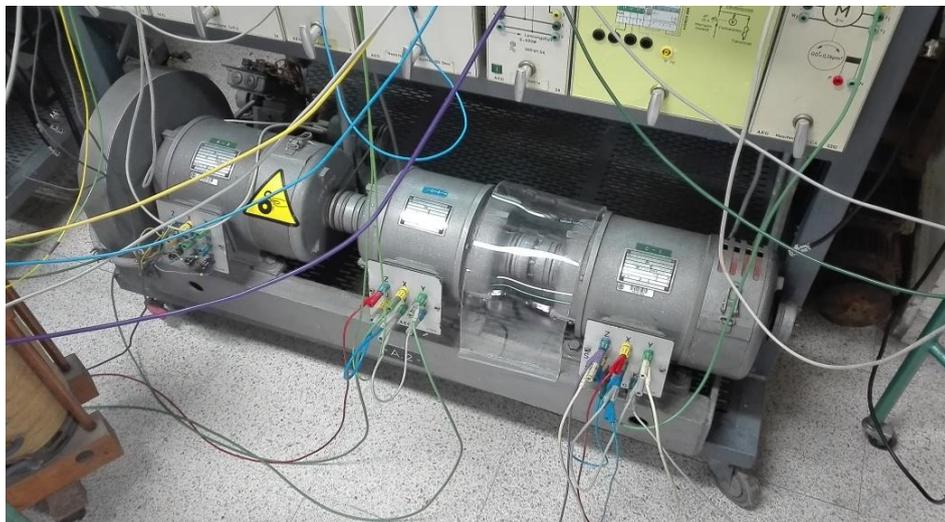


Figura 19. Máquina síncrona de rotor cilíndrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas. [3]

Tipo	DdSy 103/60-4	DdSy 103/60-4
Potencia	0.3 kVA, $\cos \varphi=0.8$	0.3 kW, $\cos \varphi=0.82$
Revoluciones	1500 rev/min	1450 rev/min
Tensión	220/380 V ΔY	380/660 V ΔY
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Corriente	0.8/0.46 A	1.65/0.95 A
Clase aislamiento	E	E
Clase protección	P 22	P 22
Excitación	220 V	220 V
Número de polos	4	4
Resistencia estator	2,8 Ω en frío (<70°C)	2,8 Ω en frío (<70°C)

Tabla 4. Características técnicas máquina de rotor cilíndrico. ^[3]

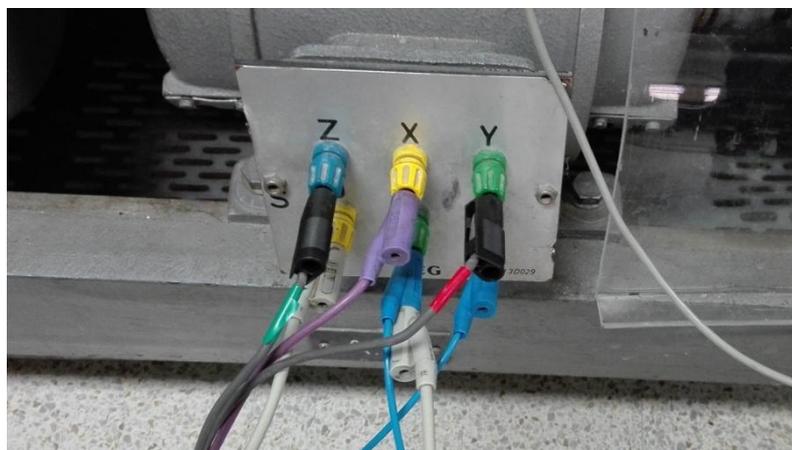


Figura 20. Borne de la máquina síncrona de rotor cilíndrico. ^[3]

3. HERRAMIENTAS PARA LA RECOGIDA DE DATOS

Durante la realización de los ensayos, para la toma de los diferentes datos en los que se fundamenta nuestro estudio (tales como tensiones, corrientes, velocidad de giro) se han utilizado una serie de dispositivos de medida.

El dispositivo fundamental en el que nos apoyamos es la plataforma CompactRIO de National Instruments mostrado en la figura 21. CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición de datos que puede ser programado con el software LabVIEW de la misma compañía.



Figura 21. Plataforma CompactRIO. [3]

La plataforma descrita anteriormente recibe los datos a través de unos transductores constituidos con una escala reducida para no dañar el dispositivo. Esta escala es tenida en cuenta en el programa realizado previamente para la toma de datos.

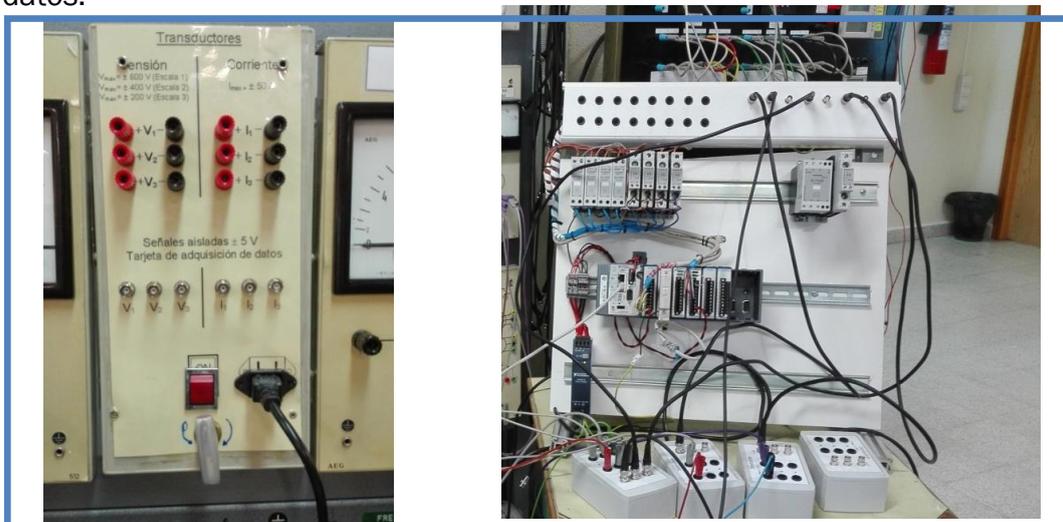


Figura 22. Transductores utilizados para la adquisición de las señales. [3]

Hemos utilizado dos tipos de transductores, esto fue debido a que en algunos ensayos se rebasaba el límite de la corriente con los de la figura 22 (derecha) y tuvimos que usar los otros con un mayor rango para la corriente.

Como dispositivo principal para el control de todos los dispositivos y la visualización de los resultados instantáneamente hicimos uso de un software informático desarrollado en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica.

Este software tiene el nombre de “Gestión de Ensayos Eléctricos”, y recibe los datos de tensión y corriente tomados por medio de los transductores anteriormente descritos. Todo esto fue programado previamente para que la visualización fuera la adecuada y además poder ver el valor eficaz de las diferentes variables.

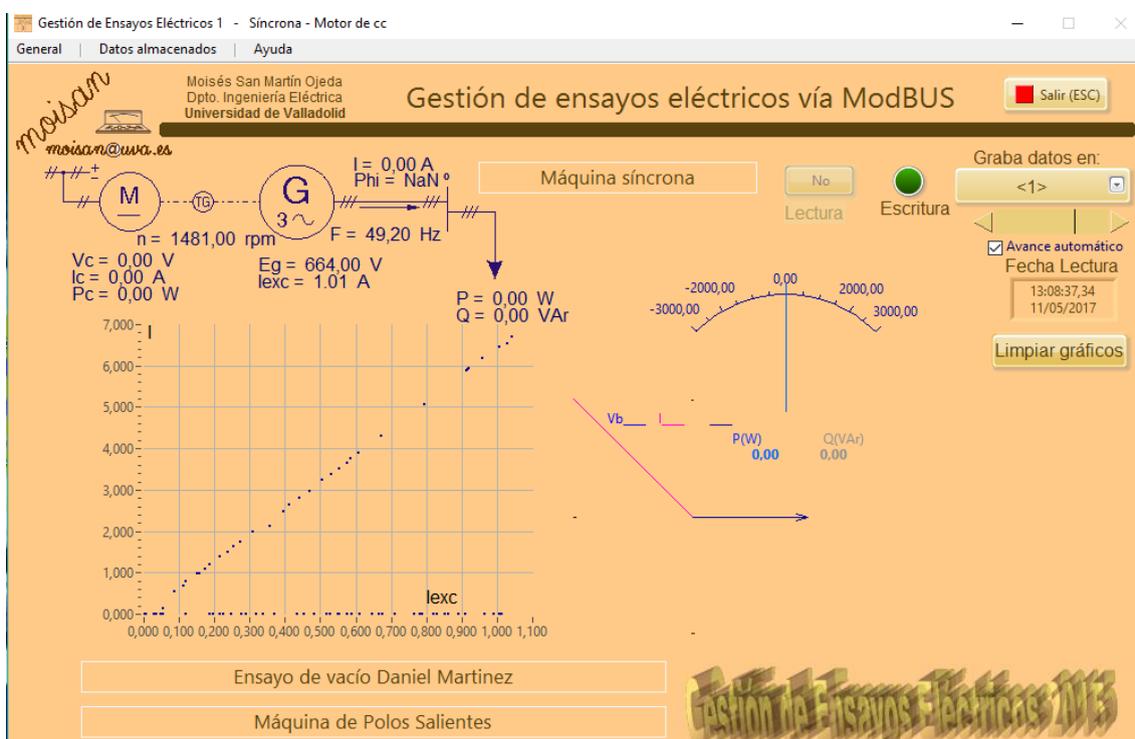


Figura 23. Imagen del software "Gestión de ensayos eléctricos" de las prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas. [6]

Otro software fundamental en nuestro trabajo fue el de “Leer Datos Laboratorio Máquinas Eléctricas”. Por medio de este software teníamos acceso a los datos obtenidos en los diferentes ensayos desde casa. A la hora de trabajar con él había que tener cuidado con las escalas de las diferentes variables, ya que por defecto vienen mal. Este programa también nos permitía exportar el conjunto de los datos a Excel para seguir trabajando con ellos.

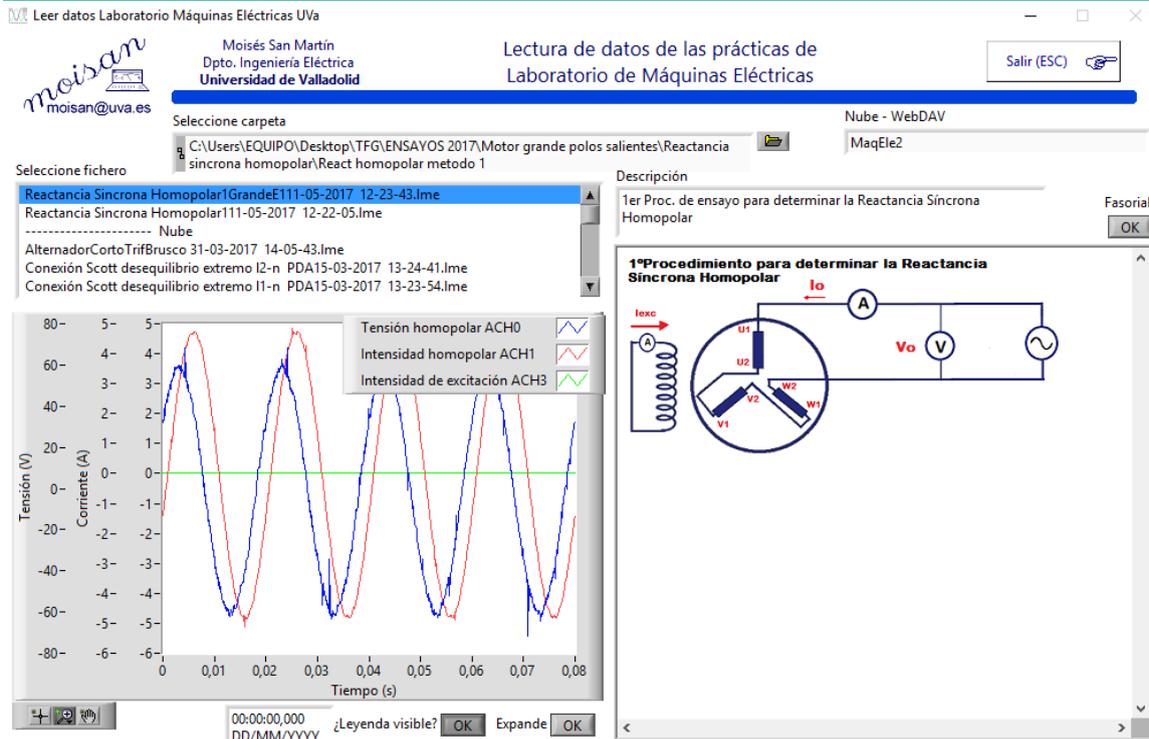


Figura 24. Imagen del software "Lectura de datos de las prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas". [6]

4. ENSAYOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

Previamente a la realización de los ensayos en los que se fundamenta nuestro estudio conviene explicar y analizar los resultados que vamos a extraer de los ensayos de vacío y cortocircuito; estos serán de vital importancia para posteriores cálculos.

4.1 ENSAYO DE VACÍO

Este ensayo consiste en hacer girar el rotor de la máquina a la velocidad síncrona sin conectar ningún tipo de carga a la salida, y a continuación, alimentar al inductor con una corriente de excitación I_e proveniente de una fuente de corriente continua regulable. Durante el ensayo en vacío, deben medirse simultáneamente la intensidad de excitación, la tensión en los bornes y la frecuencia (o la velocidad de giro). Para realizar el ensayo en vacío, la variación de la intensidad de excitación debe efectuarse por escalones progresivos partiendo de las tensiones más elevadas hacia las más bajas, con puntos uniformemente repartidos

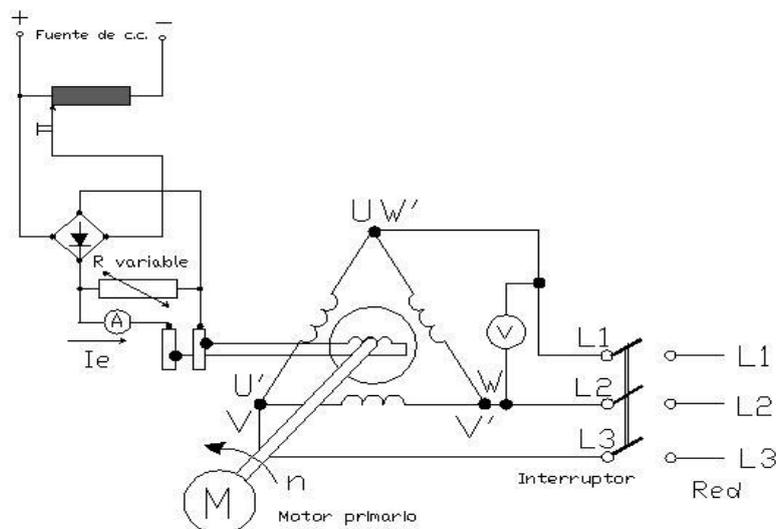


Figura 25. Esquema de montaje del ensayo de vacío. [7]

La curva característica de saturación en vacío-relación entre la tensión en bornes del devanado del inducido en circuito abierto y la intensidad de excitación a la velocidad (frecuencia) asignada- se traza con los datos del ensayo en vacío.

Si por causa de una tensión residual elevada, la característica de saturación en vacío corta al eje de ordenadas por encima del origen, es necesario introducir una corrección. A este efecto, la parte recta de la curva de vacío, denominada usualmente como recta del entrehierro, se prolonga hasta su punto de intersección con el eje de abscisas. La longitud del eje de abscisas limitada por la prolongación de la curva, representa el valor de la corrección que deberá añadirse a todos los

valores medidos de la intensidad de excitación.

Si durante el ensayo, la frecuencia difiere de su valor asignado, todos los valores de la tensión medidos deberán referirse a la frecuencia asignada.

Máquina de polos salientes

I_e (A)	V_b
0,054	0
0,119	30
0,187	105
0,195	140
0,215	154
0,225	166
0,247	180
.....
1,04	676
1,039	675
1,043	676
1,05	676
1,06	678
1,062	681
1,064	682

Tabla 5. Ensayo de vacío - Máquina de polos salientes. [7]

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 1 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 1.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

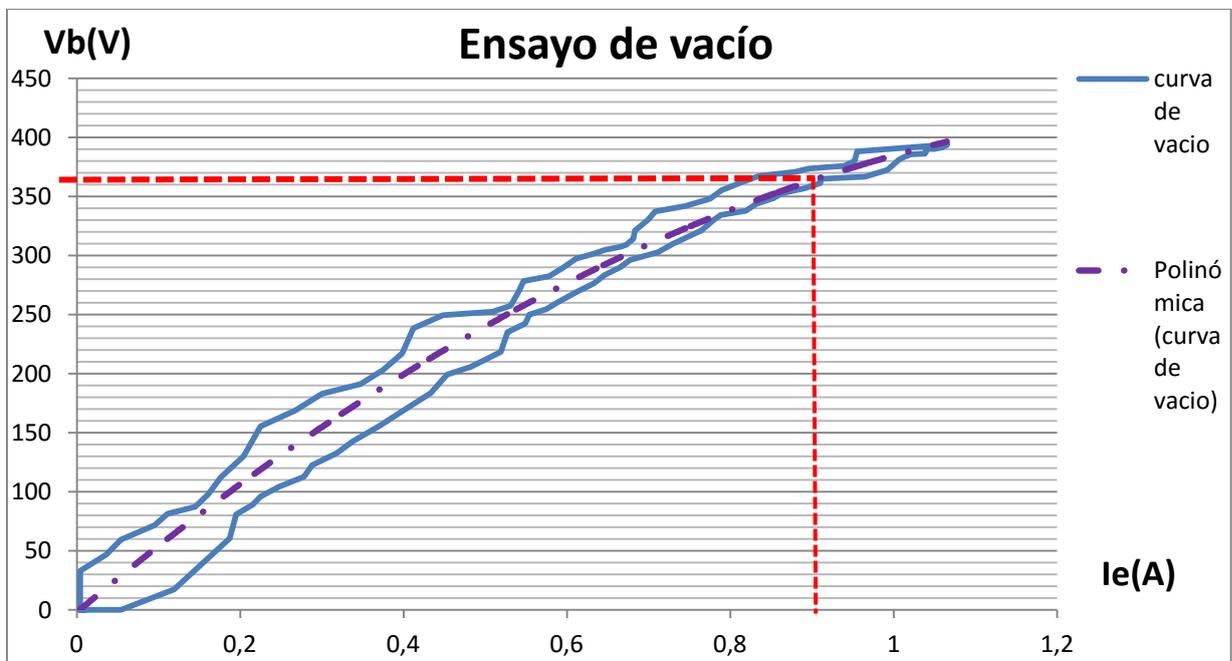


Figura 26. Ensayo de vacío - Máquina de polos salientes. [3]



Podemos observar que en la anterior figura aparecen dos curvas diferentes, una es la ascendente y otra la descendente, es decir, aplicando una corriente de excitación creciente hasta la saturación, y desde esta hasta que la corriente de excitación es nula.

La divergencia entre ambas depende de la influencia de la histéresis en los polos y en el yugo de la máquina.

Previamente a la realización de los ensayos de cortocircuito en los que nos basamos procedemos a realizar el de vacío, con el fin de averiguar la corriente (I_e) con la que hemos de excitar la máquina. Este valor se corresponde con la corriente que en este ensayo de vacío nos permite alcanzar la tensión nominal.

En nuestro caso, dispusimos la conexión en estrella por lo que tal tensión nominal U_n será 660 V. Se puede ver claramente que esta excitación será : $I_e \approx 1$ A.

4.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Para la realización de este ensayo se debe hacer girar el rotor a la velocidad de sincronismo al mismo tiempo que cortocircuitamos la salida de la máquina. A continuación, procedemos a aplicar gradualmente una corriente de excitación ascendente hasta que llegamos a valores cercanos a la corriente nominal a la salida.

El cortocircuito debe realizarse lo más cerca posible de los bornes de la máquina, aplicando la intensidad de excitación después de establecer el cortocircuito. Durante el ensayo de cortocircuito trifásico permanente, la intensidad de excitación y la línea del inducido se deben medir simultáneamente. Una de las lecturas se efectúa a una intensidad próxima a la corriente asignada del inducido.

La característica de cortocircuito trifásico permanente -relación entre la intensidad del inducido cortocircuitado y la intensidad de excitación- se traza con los datos del ensayo de cortocircuito trifásico permanente.

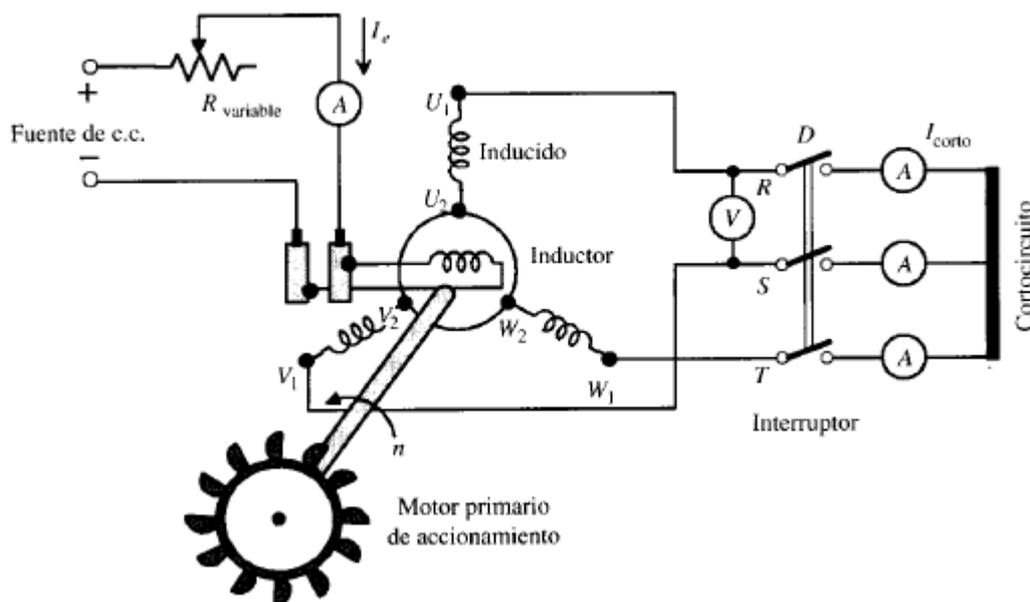


Figura 27. Esquema de montaje del ensayo de cortocircuito. [5]

Máquina de polos salientes

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 2 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 2.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

$I_{exc}(A)$	$I_L(A)$	$I_F(A)$
0,004	0	0
0,047	0	0
0,054	0,133	0,07678759
0,07	0,46	0,26558112
0,113	0,67	0,38682468
0,119	0,778	0,44917851
0,148	0,935	0,5398225
....
0,964	6,189	3,57322082
0,964	6,221	3,59169602
0,975	6,256	3,61190328
0,985	6,351	3,66675156
0,995	6,4	3,69504172
1,008	6,458	3,72852804
1,012	6,517	3,7625917

Tabla 6. Ensayo de cortocircuito - Máquina de polos salientes. [3]

Representamos la corriente por fase para cada corriente de excitación y vemos que es una recta :

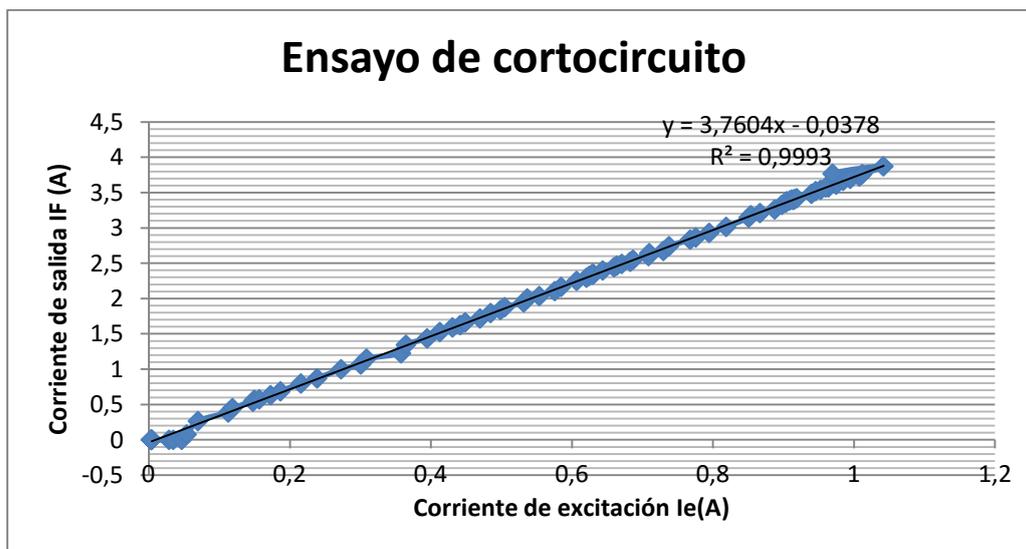


Figura 28. Ensayo de cortocircuito - Máquina de polos salientes. [3]

La corriente de excitación con la que debemos de trabajar en futuros ensayos corresponde con la que produce una corriente de salida por fase igual a la nominal de la máquina, que es de 3,5 A.

Podemos observar que es : $I_e = 0,9426 \text{ A}$.

Máquina de rotor cilíndrico

A continuación presentamos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 15 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo "Tabla 15.xlsx" dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

$I_{exc}(A)$	$I_f(A)$
0	0
0,048	0
0,049	0,269
0,05	0,276
0,05	0,264
0,051	0,257
0,052	0,271
...	...
0,072	0,372
0,075	0,408
0,076	0,422
0,083	0,421
0,087	0,442
0,088	0,454
0,091	0,491

Tabla 7. Ensayo de cortocircuito - Máquina de rotor cilíndrico. [3]

Realizando la gráfica a partir de la tabla anterior :

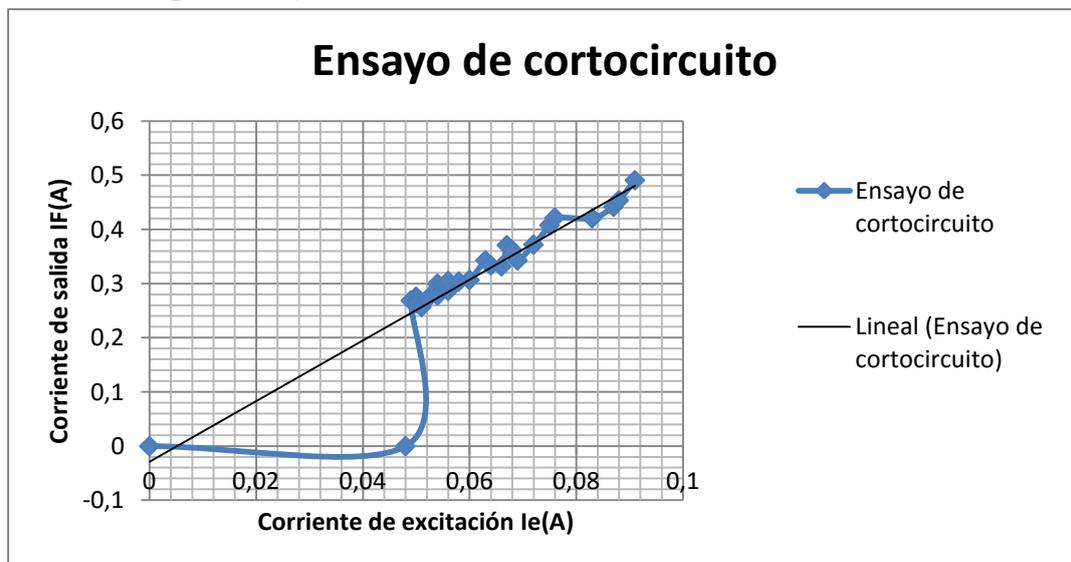


Figura 29. Ensayo de cortocircuito - Máquina de rotor cilíndrico. [3]



De la misma forma, la corriente de excitación con la que debemos de trabajar en futuros ensayos con la máquina de rotor cilíndrico corresponde con la que produce una corriente de salida por fase igual a la nominal de la máquina, que es de 0,46 A. Podemos observar que es : $I_e = 0,08732$ A.

4.3 ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DE REACTANCIAS SÍNCRONAS

Vamos a realizar un conjunto de ensayos con el fin de determinar el valor de las reactancias síncrona homopolar, inversa y directa. Procederemos primero con una máquina de polos salientes y a continuación con una de menor potencia de rotor cilíndrico. Una vez obtenidos los resultados podremos establecer una serie de conclusiones.

El cálculo de las reactancias y constantes de tiempo de las máquinas conforman los datos esenciales para el estudio de los regímenes de funcionamiento de estas máquinas, tanto en servicio permanente como en los estados transitorios circunstanciales como cortocircuito brusco, pérdida de sincronismo, apertura del circuito de excitación, servicio desequilibrado, funcionamiento en paralelo.

MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

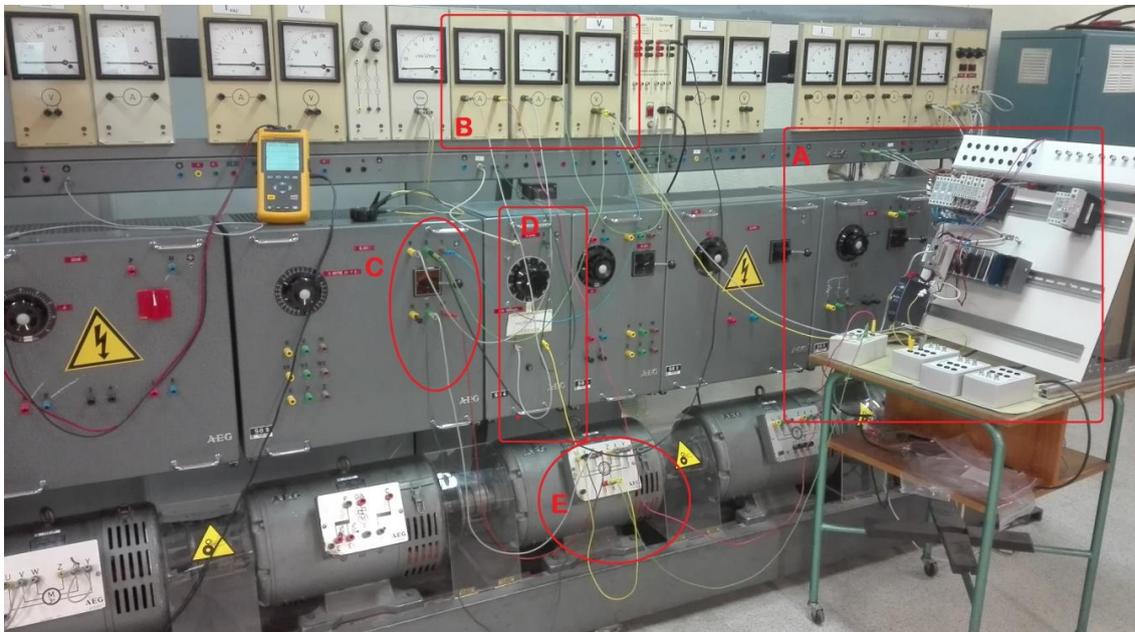


Figura 30. Montaje en la máquina síncrona de polos salientes. [3]

En el montaje anterior llevado a cabo en el laboratorio, tenemos los siguientes elementos:

- A → Transductor de señal para la transmisión de datos al software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica
- B → Voltímetros y amperímetros
- C → Interruptor para la realización del cortocircuito.
- D → Excitación mediante corriente continua.
- E → Conexiones en la máquina síncrona

Mediante esta configuración realizamos el conjunto de ensayos a la máquina síncrona de polos salientes. El procedimiento fue análogo para los diferentes montajes, con las únicas diferencias de la colocación de voltímetros y amperímetros en función de las señales que nos interesase analizar.

Una vez conectada la configuración determinada se procede con la verificación de la secuencia de las fases, mediante un secuencímetro, esto es fundamental para nuestros ensayos en los que tratamos con un sistema trifásico.

Primeramente se medía con estos aparatos del panel que podemos observar en la imagen; estas medidas podían tener ciertas imprecisiones ya que a veces no disponían de la escala adecuada. Pero estos instrumentos únicamente los utilizábamos para disponer de las medidas a mano. A partir de estos amperímetros y voltímetros extraíamos por medio de unos transductores la señales, que debían ir al canal correcto previamente fijado.

A partir de aquí, con el software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica observábamos por pantalla los resultados.

MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO

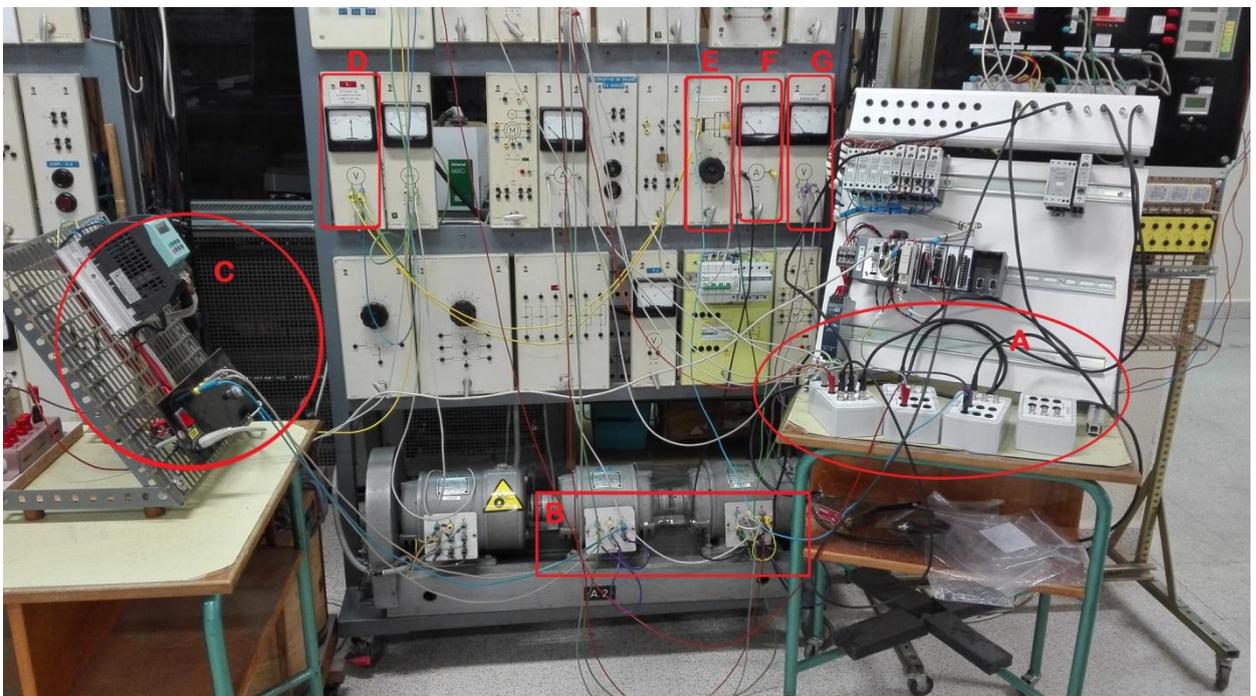


Figura 31. Montaje en la máquina síncrona de rotor cilíndrico. [3]

En el montaje anterior llevado a cabo en el laboratorio, tenemos los siguientes elementos:



- A → Transductor de señal para la transmisión de datos al software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica
- B → Conexiones en la máquina síncrona
- C → Convertidor frecuencia-tensión
- D → Voltímetro.
- E → Excitación mediante corriente continua
- F → Amperímetro
- G → Voltímetro

Con la siguiente máquina al ser de menor potencia, los resultados fueron menos precisos que con la anterior, fundamentalmente porque el rango en el que debíamos posicionar la corriente de excitación era muy pequeño.

El método utilizado para llevar a cabo las diferentes medidas fue análogo al de la máquina de rotor cilíndrico

4.3.1 ENSAYOS PARA DETERMINAR REACTANCIA SÍNCRONA HOMOPOLAR

Se procede con la realización de tres ensayos para poder deducir el valor de esta reactancia; veremos si es posible llegar a una solución común entre los tres casos, o exige sistemas más precisos en alguno de los procedimientos.

1º Procedimiento para la determinación de la reactancia homopolar

La reactancia síncrona homopolar X_0 posee un valor que se define como el cociente del valor eficaz del término fundamental de la componente homopolar de la tensión aplicada entre las fases y el neutro, U_0 y el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente homopolar I_0 .

En este caso haremos girar la máquina a la velocidad nominal de sincronismo con el devanado inductor cortocircuitado y las tres fases del devanado inducido conectadas en serie según muestra la figura siguiente.

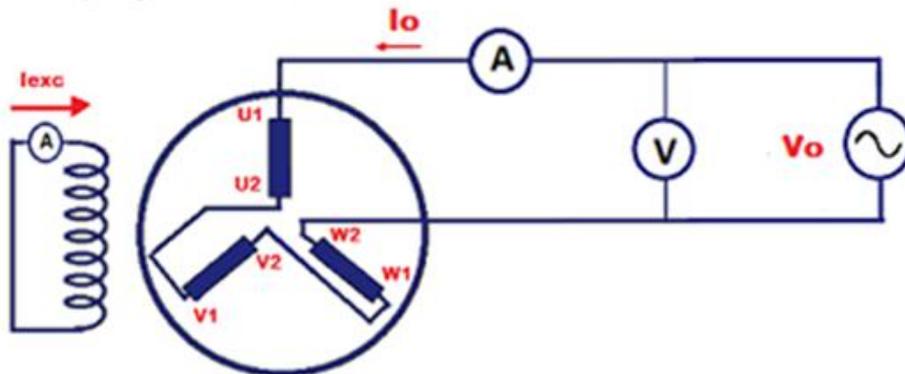


Figura 32. Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. [3]

Se aplica una tensión creciente al circuito monofásico del inducido, y se van leyendo los valores de esta tensión y los correspondientes de la corriente que absorbe el inducido hasta un valor de I próximo a la corriente nominal (I_n).

$$X_0 = \frac{V_0}{3 \cdot I_n}$$

(15)

2º Procedimiento para la determinación de la reactancia homopolar

En este segundo caso, requeriremos de la realización de los ensayos de cortocircuito asimétrico fase-neutro y fase-fase.

1) Cortocircuito fase-neutro

En primer lugar, procedemos a realizar el cortocircuito monofásico o de fase-neutro. Del primer tipo de cortocircuito obtenemos la siguiente relación :

$$3 \cdot \frac{U_n}{I_{ccN}} = X_0 + X_1 + X_2 \quad (16)$$

Donde I_{ccN} es la corriente de cortocircuito monofásico que corresponde a la corriente de excitación (I_e) que estando en vacío nos aporta la tensión nominal U_n . Esta corriente de excitación ha de ser calculada previamente al ensayo.

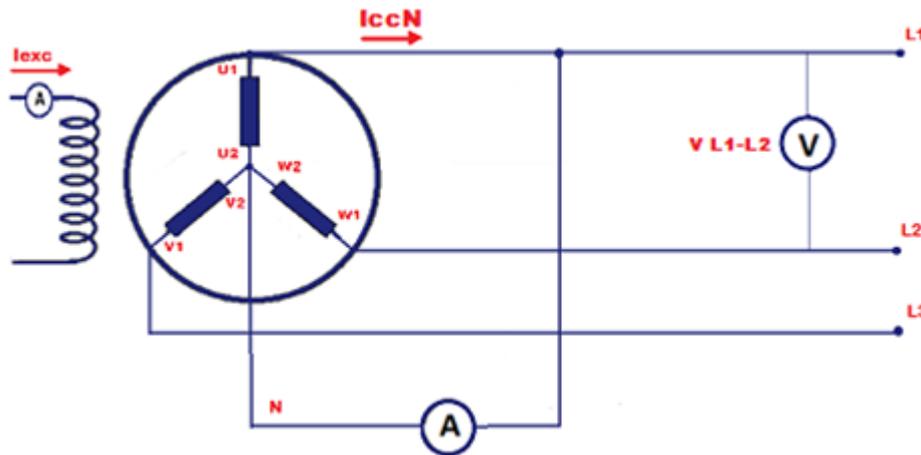


Figura 33. 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. [3]

2) Cortocircuito fase-fase

A continuación realizamos un cortocircuito bifásico sin neutro, en el que procedemos a medir la corriente de cortocircuito y la tensión entre una fase cortocircuitada y la que no. Todas estas medidas tomadas con corriente de excitación constante.

Obtenemos así, la siguiente relación:

$$\frac{U_n}{I_{ccF}} = \frac{1}{\sqrt{3}}(X_1 + X_2) \quad (17)$$

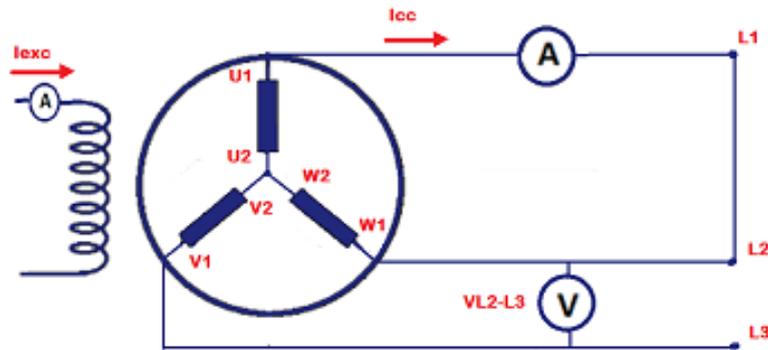


Figura 34. 2ª parte del 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. [3]

A partir de los dos anteriores ensayos y sus correspondientes relaciones (ecuaciones 15-16), podemos deducir el valor de la reactancia síncrona homopolar:

$$X_0 = U_n \cdot \left(\frac{3}{I_{ccN}} - \frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} \right) \quad (18)$$

3º Procedimiento para la determinación de la reactancia homopolar

Un tercer método para medir X_0 nos lo da el ensayo de cortocircuito de dos fases-neutro. Se conecta en estrella el devanado del inducido, se unen directamente dos bornes al punto neutro. A continuación, se hace girar la máquina a su velocidad asignada y se excita.

Las magnitudes medidas son la tensión entre el borne en circuito abierto y el neutro V_{L1-N} y la intensidad en la conexión que une los bornes cortocircuitados al neutro I_{ccN} .

$$X_0 = \frac{V_{L1-N}}{I_{ccN}} \quad (19)$$

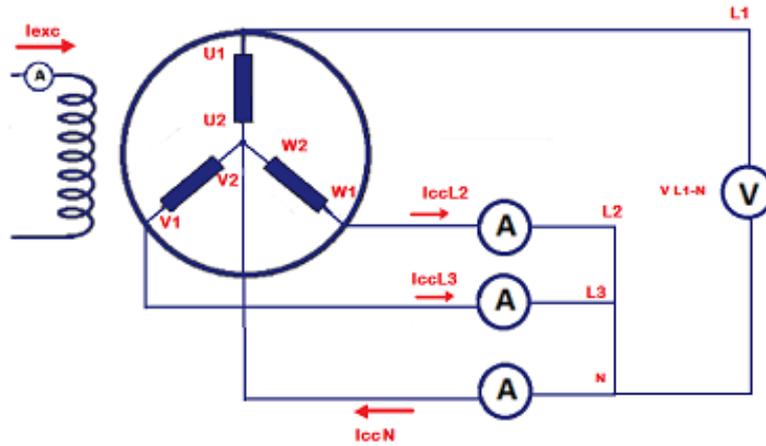


Figura 35. 3º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona homopolar. [3]

Es recomendable tomar las medidas de la potencia activa y de la potencia reactiva para tener en cuenta la influencia de los armónicos, de esta forma los resultados serán más precisos.

$$X_0 = \frac{V_{L1-N}^2}{Q} \frac{Q^2}{P^2 + Q^2}$$

(20)

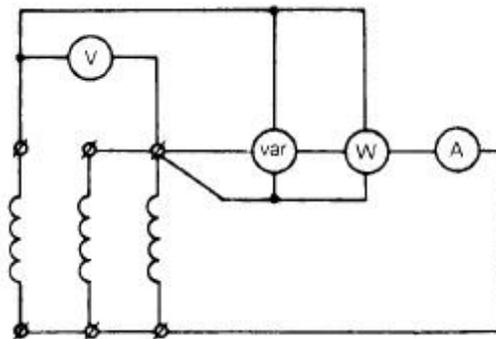


Figura 36. 3º Procedimiento - reactancia síncrona homopolar con vatímetro y voltiamperímetro. [1]

Se hacen las medidas para varios valores de la intensidad en el neutro. Los valores de la intensidad y la duración del ensayo están limitados por el calentamiento o por las vibraciones del rotor.

4.3.2 ENSAYOS PARA DETERMINAR REACTANCIA SÍNCRONA INVERSA

Para este ensayo llevaremos a cabo dos métodos, en los que como en el apartado anterior nos basaremos en la realización de diferentes cortocircuitos.

1º Procedimiento para la determinación de la reactancia inversa

El primer procedimiento, probablemente el más conocido, trata de realizar el ensayo de cortocircuito entre dos fases. Se hace girar la máquina a la velocidad de sincronismo por medio de un motor apropiado. Se miden la corriente de cortocircuito I_{cc} y la tensión V_{L2-L3} entre las dos fases cortocircuitadas y el extremo de la fase libre, con el valor de la excitación constante y la máquina girando a velocidad nominal.

$$X_2 = \frac{V_{L2-L3}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}} \quad (21)$$

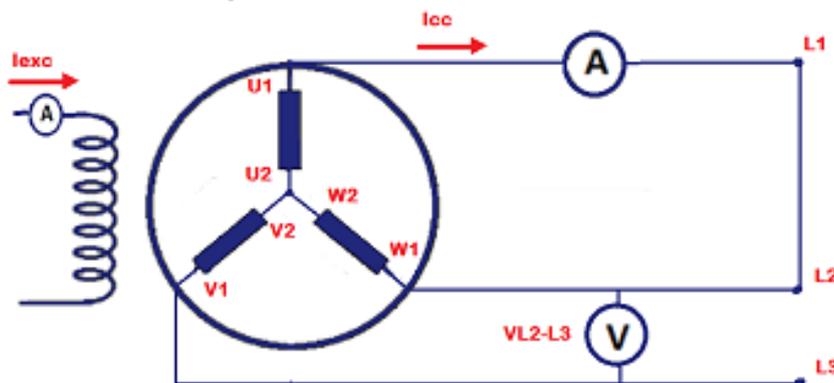


Figura 37. 1º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona inversa. [3]

Se recomienda medir la potencia activa P y la potencia reactiva Q , para aumentar la precisión de las medidas en presencia de armónicos de la tensión o de la intensidad.

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}^2} \quad (22)$$

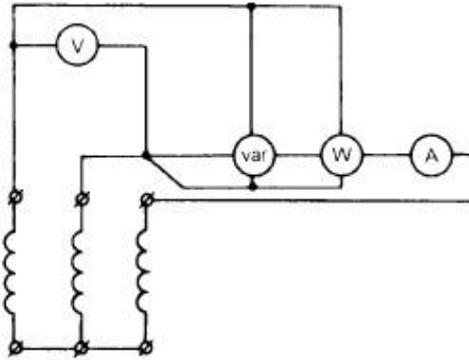


Figura 38. 1º Procedimiento - reactancia síncrona inversa con vatímetro y voltiamperímetro. [1]

Las medidas se hacen para varios valores de la intensidad de cortocircuito.

Para evitar un calentamiento exagerado de las piezas macizas, la duración del ensayo de cortocircuito entre dos fases con intensidades superiores a 0,3 I_n se debe limitar al tiempo necesario para la lectura de los aparatos.

En máquinas de polos salientes, se puede aumentar la intensidad hasta su valor asignado si las vibraciones de la máquina no sobrepasan los límites admisibles. En las máquinas de rotor liso, se limita la intensidad habitualmente a la mitad de su valor asignado.

2º Procedimiento para la determinación de la reactancia inversa

Si disponemos de los ensayos de cortocircuito trifásico y en dos fases, podemos hallar X_2 a partir de las relaciones deducidas para estos. De las fórmulas :

$$X_1 = X_S = \frac{E_{oc}}{I_{ccp}} = \frac{Un}{I_{ccp}} \quad (23)$$

$$X_1 + X_2 = \sqrt{3} \frac{Un}{I_{ccF}} \quad (24)$$

Queda la siguiente expresión:

$$X_2 = Un \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} - \frac{1}{I_{ccp}} \right) \quad (25)$$

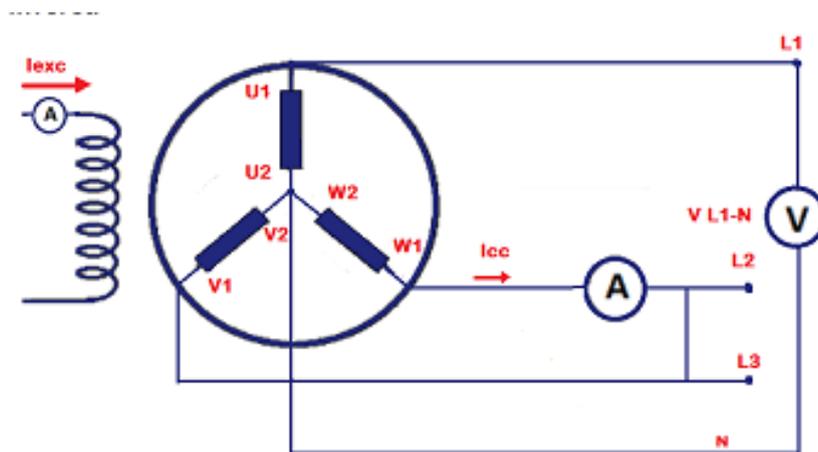


Figura 39. 2º Procedimiento para la determinación de la reactancia síncrona inversa. [1]

4.4 RESULTADOS ENSAYOS

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO BRUSCO

Para la máquina de polos salientes, realizamos también un estudio del transitorio de la corriente. A continuación, represento las corrientes por las 3 fases y la tensión en el ensayo. Para estudiar el transitorio sólo necesitaremos una de las corrientes, ya que se trata de un cortocircuito simétrico, y las corrientes sólo se hallan desfasadas 120° .

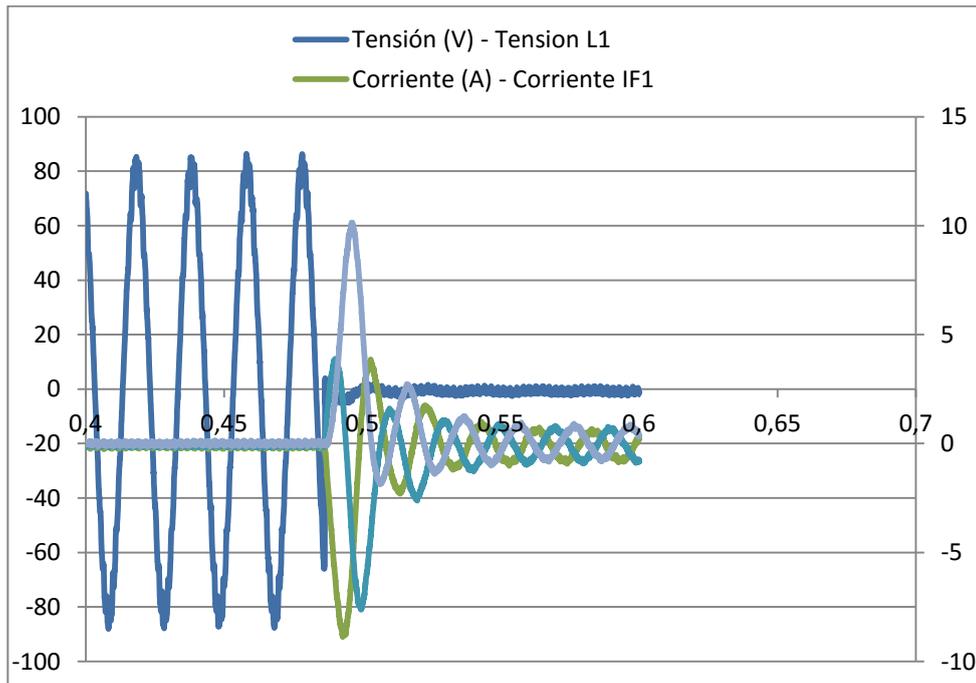


Figura 40. Cortocircuito trifásico brusco. [3]

Estudiamos la corriente por la fase 1 (I_{F1}):

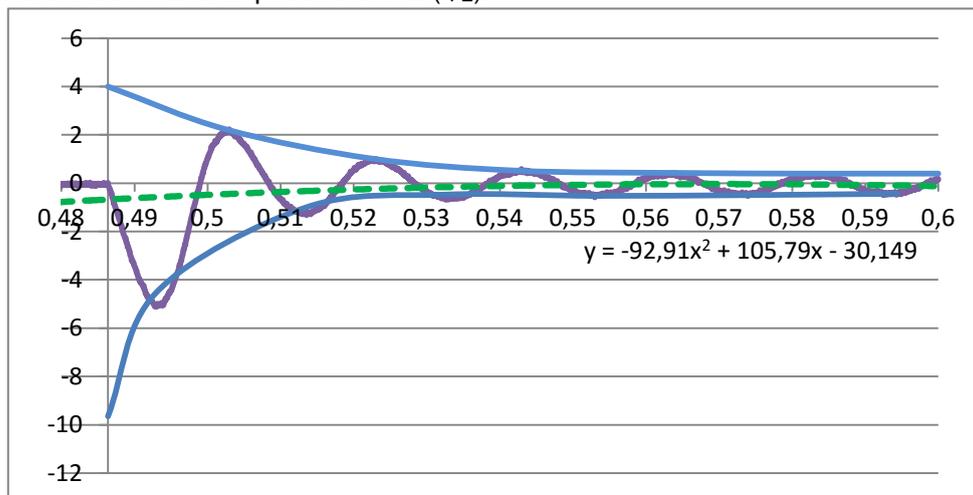


Figura 41. Corriente de cortocircuito por la fase 1 (I_{F1}): Componente simétrica (azul) y componente unidireccional(verde). [3]

En la anterior figura representamos las componente unidireccional y

simétrica, que se trata de la envolvente de la corriente de cortocircuito.

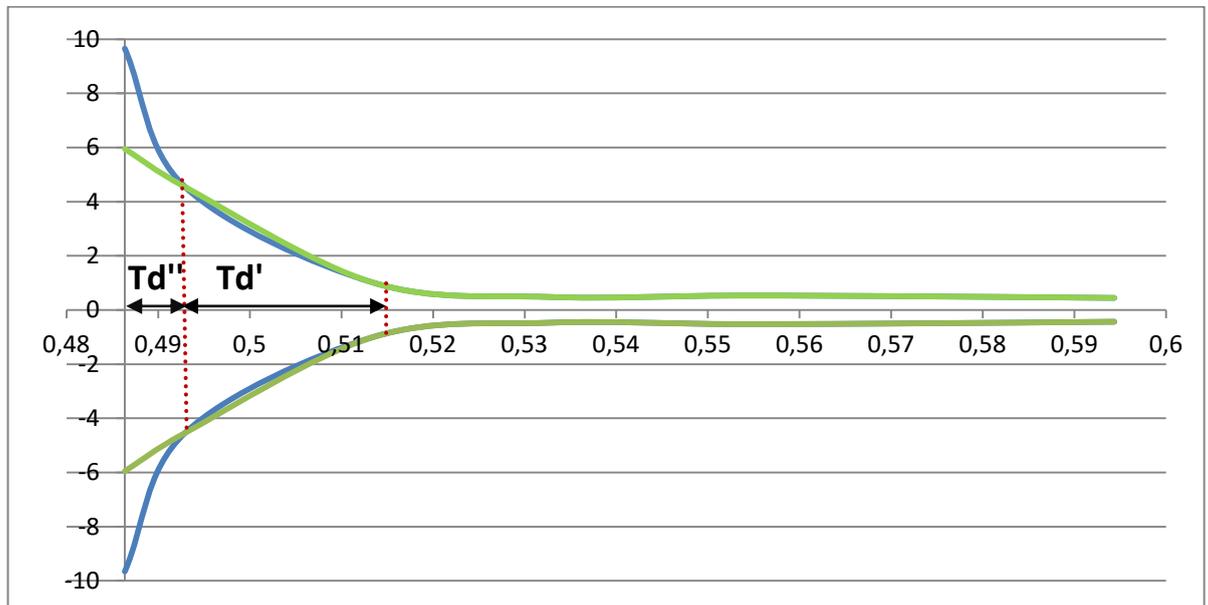


Figura 42. Corriente transitoria (verde) y subtransitoria (azul). [3]

En la figura 45 representamos la componente subtransitoria y transitoria, lo que nos permitirá obtener las reactancias y las constantes de tiempo para estos regímenes.

- Reactancia subtransitoria :

La corriente I'' se corresponde como podemos ver en la figura 13 con:

$$I'' = \frac{9,65}{\sqrt{2}} = 6,82 \text{ A}$$

(26)

En la figura 43 podemos ver que la tensión E_0 antes de producirse el cortocircuito era de 88,06 V.

$$X_S'' = \frac{E_0}{I''} = \frac{88,06}{6,82} = 12,91 \Omega$$

(27)

En la figura 45 podemos apreciar que la constante de tiempo subtransitoria es:

$$T_d'' = 0,49295 - 0,48635 = 0,0066 \text{ s}$$

(28)

- Reactancia transitoria :

La corriente I' se corresponde como podemos ver de nuevo en la figura 13 con:

$$I' = \frac{5,9488}{\sqrt{2}} = 4,2064 \text{ A}$$

(29)

Ahora hallamos la reactancia transitoria, que es:

$$X'_S = \frac{E_0}{I'} = \frac{88,06}{4,2064} = 20,9347 \Omega$$

(30)

En la figura 45 podemos apreciar que la constante de tiempo transitoria es:

$$T'_d = 0,51355 - 0,49295 = 0,0206 \text{ s}$$

(31)

De forma que a partir de la fórmula vista anteriormente :

$$I_{cca} = I_{ccp} + (I'_d - I_{ccp}) \cdot e^{\frac{-t}{T'_d}} + (I''_d - I'_d) \cdot e^{\frac{-t}{T''_d}}$$

Podemos ver el comportamiento del transitorio en cada momento. Que queda de la forma :

$$I_{cca} = 0,61 + (4,2064 - 0,61) \cdot e^{\frac{-t}{0,0206}} + (6,82 - 4,2064) \cdot e^{\frac{-t}{0,0066}}$$

$$I_{cca} = 0,61 + 3,5964 \cdot e^{\frac{-t}{0,0206}} + 2,6136 \cdot e^{\frac{-t}{0,0066}}$$

(32)

A partir de la anterior fórmula representamos la corriente de cortocircuito simétrica, y podemos comprobar que se trata de una buena aproximación. Para hallar la corriente total de cortocircuito, se trataría de añadir la componente unidireccional a la componente simétrica.

La componente unidireccional mostrada en la figura 44, se puede relacionar con la siguiente fórmula, como pudimos observar en la figura 10.

$$I_u = I_{u0} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}} = -0.6746 \cdot e^{\frac{-t}{0.03505}}$$

(33)

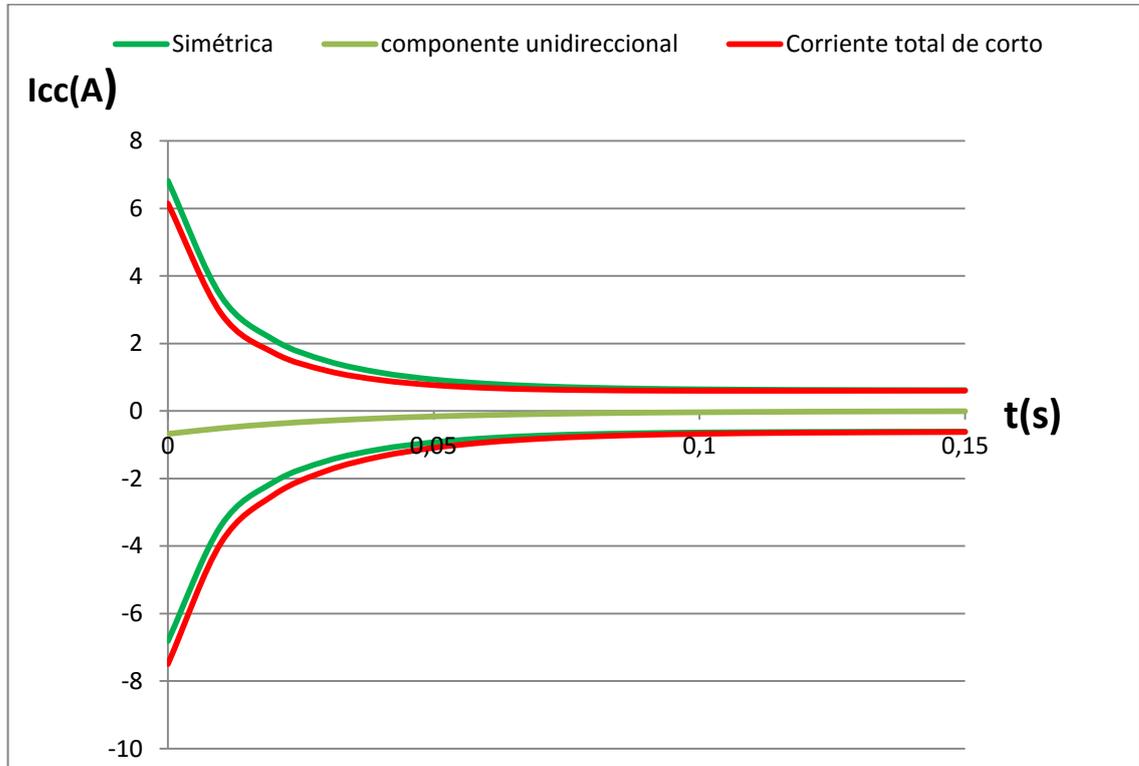


Figura 43. Representación de la ecuación (31) ,(32) y la suma de ambas. [3]

La corriente alterna simétrica queda de la forma :

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I_{cca} \cdot \cos(\omega t + \gamma) + I_{u0} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}}$$

Donde I_{cca} es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito, por lo que para obtener en valores máximos hay que multiplicar por $\sqrt{2}$. Este valor se corresponde con el de la ecuación

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I_{cca} \cdot \cos(100 \cdot \pi t + 0.906 \text{ rd}) - 0.6746 \cdot e^{\frac{-t}{0.03505}}$$

(34)

Las tablas y el conjunto de datos con los que se ha calculado esta parte están disponibles en la Tabla 16 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo "Tabla 16.xlsx" dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

4.4.1 MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

1º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

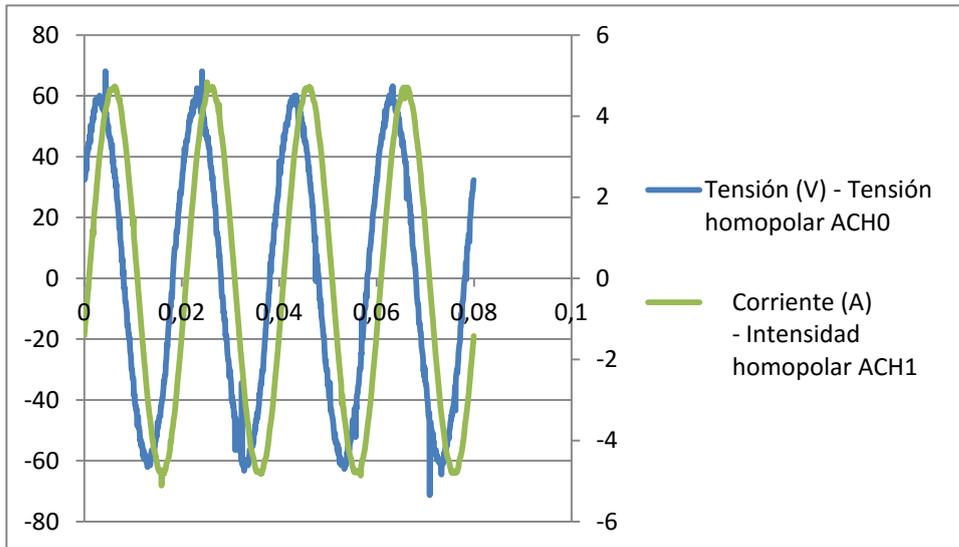


Figura 44. 1º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

La tensión para esta fórmula ha de ser la eficaz obligatoriamente.

$$X_0 = \frac{V_0(ef)}{3 \cdot I_n} = \frac{\left(\frac{58,8}{\sqrt{2}}\right)}{3 * 3.35} = 4.137 \Omega$$

Como vemos en la figura la tensión tiene unos sobrepicos en determinados puntos, que han de ser despreciados para obtener la reactancia homopolar.

Tiempo (s)	Tensión homopolar (V) ACH0	Intensidad homopolar (A) ACH1
0	32,2852	-1,41174
8,00E-05	32,9297	-1,29639
0,00016	32,9297	-1,16089
0,00024	35,3906	-1,06445
0,00032	38,4961	-0,942383
0,0004	35,3906	-0,807495
0,00048	39,7266	-0,704956
.....
0,07944	26,1328	-2,0929
0,07952	26,1328	-1,97754
0,0796	28,0078	-1,87439
0,07968	28,5937	-1,77185
0,07976	29,2383	-1,6626
0,07984	31,6992	-1,55945
0,07992	32,2852	-1,42456

Tabla 8. 1º procedimiento R.S. homopolar. [3]

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 3 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 3.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

2º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

Cortocircuito fase-neutro

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 4 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 4.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión VL1L2 (V)ACH0	Corriente IccN (A) ACH1
0	-30	4,66919
8,00E-05	-30,6445	4,93225
0,00016	-30	5,17029
0,00024	-31,875	5,45959
0,00032	-30	5,72327
0,0004	-26,3086	5,96741
0,00048	-25,7227	6,18591
....
0,07944	-46,6992	-1,18042
0,07952	-44,8242	-0,923462
0,0796	-44,8242	-0,640259
0,07968	-44,8242	-0,390015
0,07976	-44,2383	-0,145264
0,07984	-44,8242	0,15686
0,07992	-46,0547	0,419922

Tabla 9. 1ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. [3]

Con el conjunto de estos datos graficamos la siguiente figura :

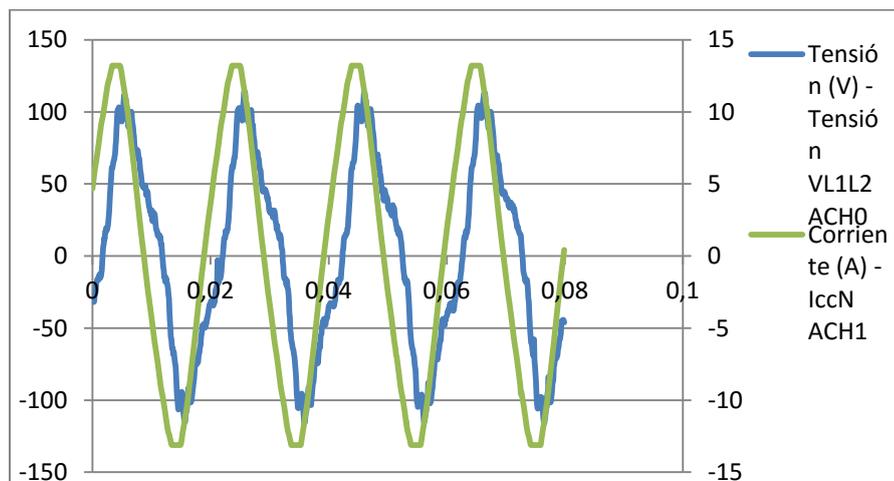


Figura 45. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

Cortocircuito fase-fase

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 5 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 5.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión - VL2L3 (V) ACH0	Corriente- Icc (A) ACH1
0	132,246	7,7832
8,00E-05	135,996	7,83691
0,00016	144,609	7,83691
0,00024	150,762	7,7832
0,00032	157,559	7,88574
0,0004	158,203	7,83691
0,00048	161,25	7,88574
....
0,07944	103,887	7,11426
0,07952	110,684	7,31934
0,0796	114,375	7,42188
0,07968	122,402	7,31934
0,07976	122,988	7,63184
0,07984	127,324	7,68066
0,07992	128,555	7,68066

Tabla 10. 2ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. [3]

En la figura siguiente graficamos tensión y corriente en el eje de ordenadas con el tiempo en el eje de abscisas:

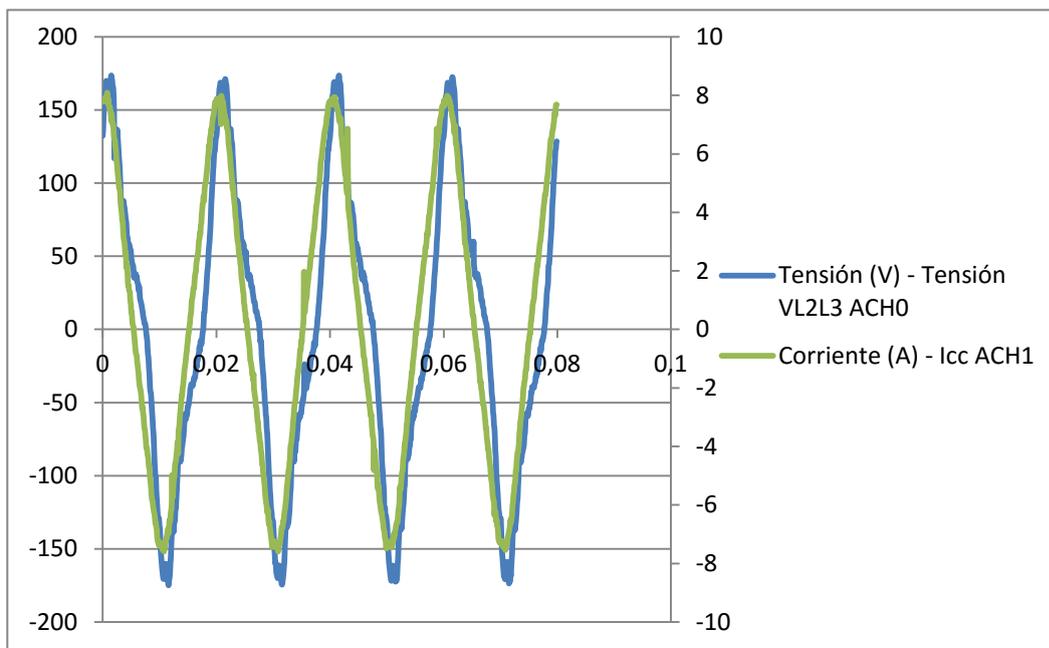


Figura 46. 2ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

A partir de los resultados de los dos ensayos anteriores en los que nos apoyamos en este método, obtenemos de nuevo la reactancia síncrona homopolar :

$$X_0 = U_n \cdot \left(\frac{3}{I_{ccN}} - \frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} \right) = 380 \cdot \left(\frac{3}{13.2} - \frac{\sqrt{3}}{8.09} \right) = 5.00 \Omega$$

Para los valores de las corrientes de cortocircuito en ambos ensayos, hemos cogido los valores máximos, como se puede observar.

3º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

Cortocircuito dos fases-neutro

A continuación mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 6 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 6.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V) - VL1-N ACHO	Corriente (A) - IccN ACH1	Corriente (A) - IccL2 ACH3	Corriente (A) - IccL3 ACH5
0	-7,20703	-7,69531	0,683594	7,37305
8,00E-05	-0,410156	-7,49023	0,478516	7,42676
0,00016	0,234375	-7,33398	0,219727	7,42676
0,00024	4,51172	-7,23145	0,117187	7,47559
0,00032	5,15625	-6,92383	0,0146484	7,47559
0,0004	6,38672	-6,87012	-0,19043	7,47559
0,00048	5,15625	-6,51367	-0,498047	7,42676
....
0,07944	-7,79297	-8,67188	2,02148	7,06543
0,07952	-9,66797	-8,56934	1,86523	7,16797
0,0796	-14,5898	-8,4668	1,61133	7,2168
0,07968	-13,3594	-8,36426	1,50879	7,27051
0,07976	-12,1289	-8,10547	1,25	7,27051
0,07984	-14,0039	-7,90039	0,942383	7,37305
0,07992	-10,8984	-7,90039	0,786133	7,47559

Tabla 11. 3º procedimiento R.S. homopolar(1) [3]

En la figura siguiente graficamos la tensión entre fase y neutro, y las corrientes por las restantes fases (I_{ccL2} y I_{ccL3}) y por el neutro (I_{ccN}):

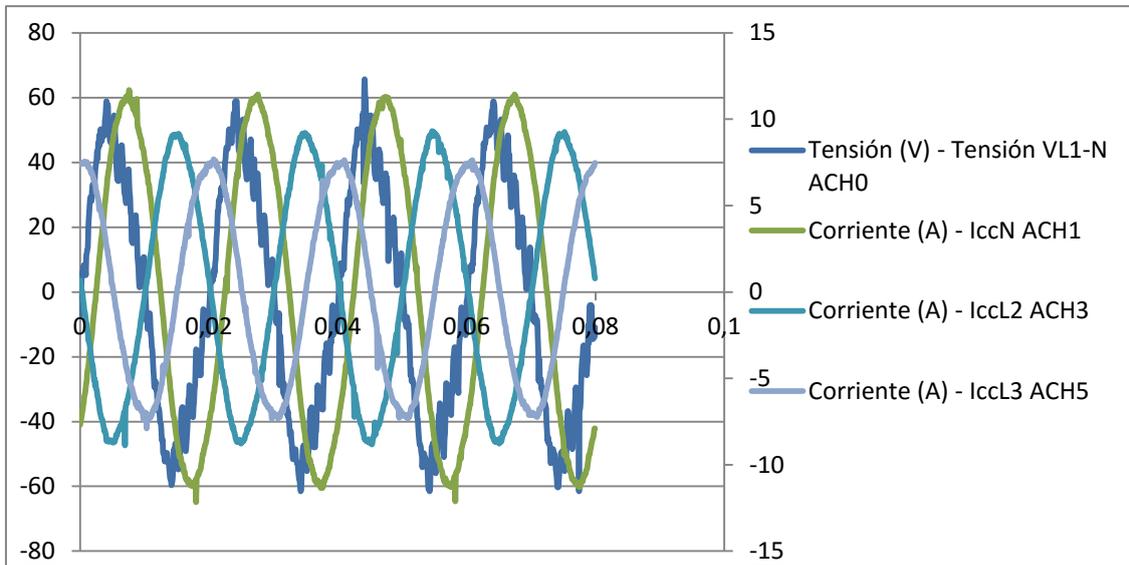


Figura 47. 3º procedimiento R.S. Homopolar (1) [3]

$$X_0 = \frac{V_{L1-N}}{I_{ccN}} = \frac{58.83}{11.69} = 5.03 \Omega$$

Volvimos a repetir el ensayo anterior excitando mediante una dinamo con el objetivo de que esta corriente fuera lo más constante posible.

Para este caso realizamos el ensayo con la corriente con la que conseguimos alcanzar la tensión nominal, esta era $I_e=0,95$ A. Conseguimos mantenerla constante previamente a realizar el mencionado cortocircuito, pero una vez que se producía esta se volvía sinusoidal, por lo que interpretamos que la excitación se magnetiza al producirse el cortocircuito y esto es lo que hace que no sea una señal constante.

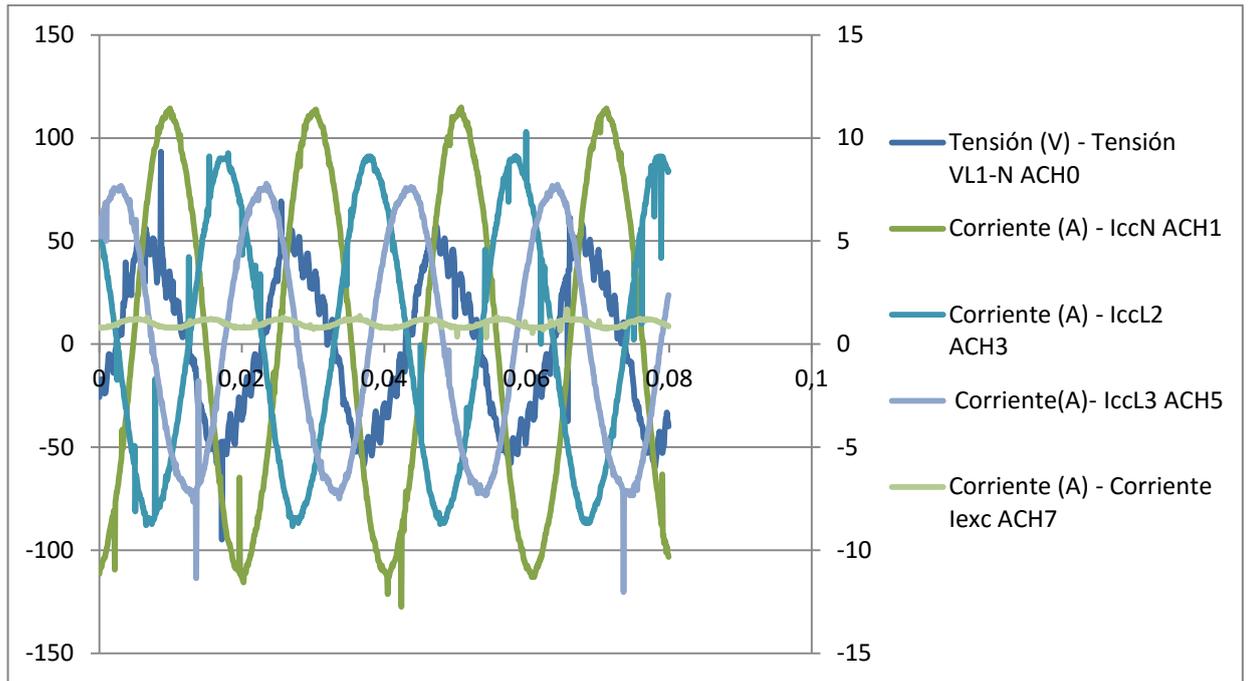


Figura 48. 3º procedimiento R.S. Homopolar (2) [3]

Tiempo (s)	Tensión VL1-N (V) ACH0	Corriente (A) - IccN ACH1
0	-25,7227	-11,1377
8,00E-05	-19,5117	-10,8838
0,00016	-18,9258	-10,8301
0,00024	-17,0508	-10,8301
0,00032	-17,0508	-10,7812
0,0004	-18,9258	-10,5762
0,00048	-20,7422	-10,5225
....
0,07944	-40,4883	-9,5459
0,07952	-36,2109	-9,64844
0,0796	-36,7969	-10,1123
0,07968	-33,1055	-9,80469
0,07976	-36,7969	-10,1123
0,07984	-37,4414	-10,1611
0,07992	-39,9023	-10,3174

Tabla 12. 3º procedimiento R.S. homopolar(2) [3]

Los datos de este ensayo que hemos repetido están disponibles en la Tabla 7 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo "Tabla 7.xlsx" dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

$$X_0 = \frac{V_{L1-N}}{I_{ccN}} = \frac{57.012}{11.484} = 4.96 \Omega$$

La norma en la que nos estamos apoyando nos recomienda realizar los cálculos con potencia activa y reactiva, ya que con estas variables tienen menor influencia los armónicos.

En la fórmula anteriormente expuesta hemos trabajado con valores pico para corriente y tensión; en este caso las potencias aparecen en valores eficaces por lo tanto tendremos que ofrecer la tensión medida en valor eficaz paralelamente. A continuación, comprobamos si ambos resultados son similares :

$$V_{L1-N}^{ef} = \frac{V_{L1-N}}{\sqrt{2}} = \frac{57.012}{\sqrt{2}} = 40.314 V$$

$$X_0 = \frac{V_{L1-N}^{ef\ 2}}{Q} \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} = \frac{40.314^2}{189} \frac{189^2}{198^2 + 189^2} = 4.1 \Omega$$

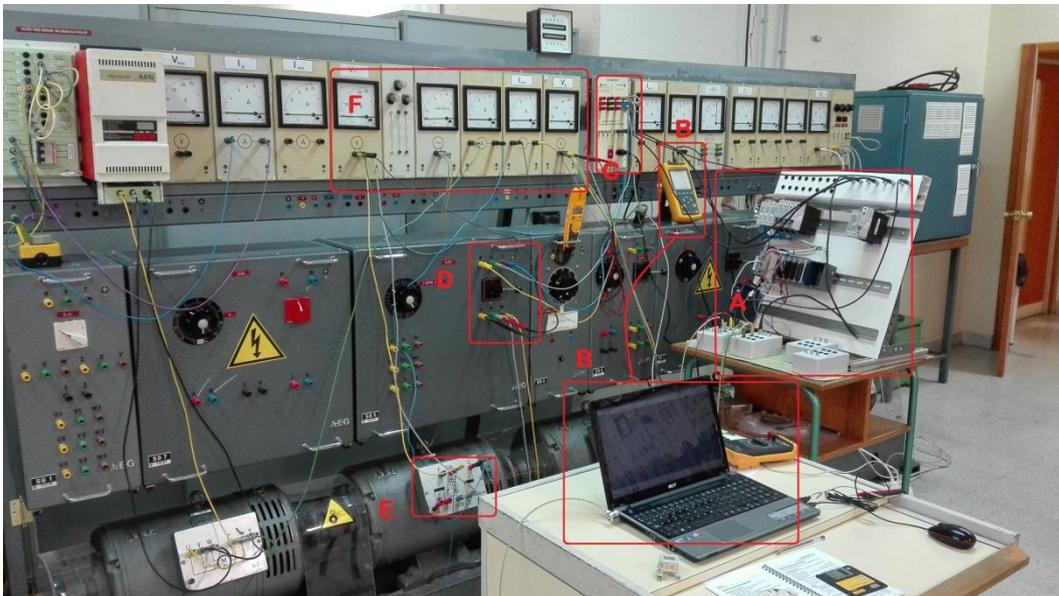


Figura 49. Disposición en el laboratorio con herramienta "Fluke"^[3]

En el montaje anterior llevado a cabo en el laboratorio, tenemos los siguientes elementos:

- A → Transductor de señal para la transmisión de datos al software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica
- B → Herramienta Fluke del laboratorio del departamento de Máquinas Eléctricas de la escuela de Ingenierías Industriales (sede Francisco Mendizábal) y del software integrado en esta FlukeView.
- C → Transductor de señal para la transmisión de datos al software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” con mayor rango para la corriente de cortocircuito.
- D → Excitación.
- E → Interruptor para la realización del cortocircuito.
- F → Voltímetros y amperímetros.

Para poder extraer los datos de la potencia hicimos uso de la herramienta Fluke del laboratorio del departamento de Máquinas Eléctricas de la escuela de Ingenierías Industriales (sede Francisco Mendizábal) y del software integrado en esta FlukeView.

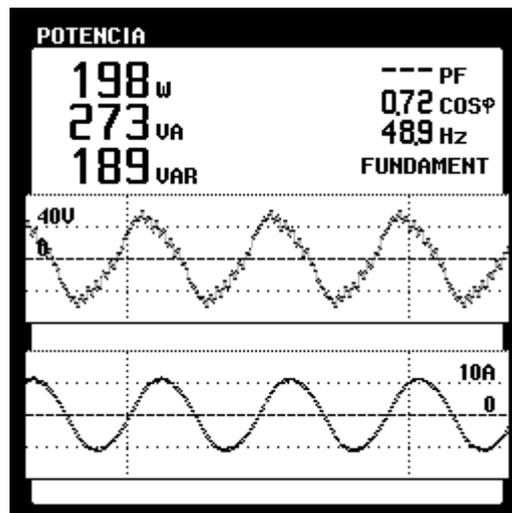


Figura 50. Captura obtenida mediante herramienta "Fluke" (1) [3]

1º Procedimiento reactancia síncrona inversa

Cortocircuito fase-fase

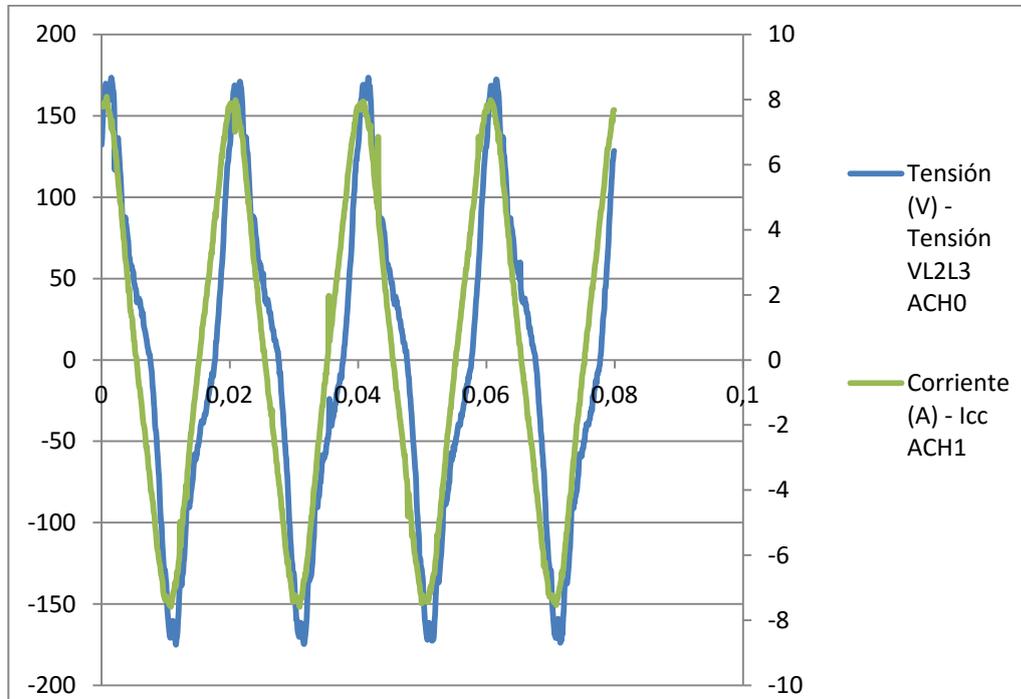


Figura 51. 1º procedimiento R.S. Inversa (1) [3]

Este ensayo es el mismo que hemos descrito en el 2º procedimiento para obtener la reactancia síncrona homopolar. En este caso los resultados los obtenemos para obtener la reactancia síncrona inversa, a través de la siguiente fórmula :

$$X_2 = \frac{V_{L2-L3}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}} = \frac{173.61}{8.09 \cdot \sqrt{3}} = 12.389 \Omega$$

Volvimos a repetir el ensayo anterior excitando mediante una dinamo con el objetivo de que esta corriente fuera lo más constante posible.

De nuevo realizamos el ensayo con la corriente $I_{exc}=0,95$ A.

Los datos del ensayo que hemos repetido están disponibles en la Tabla 8 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo "Tabla 8.xlsx" dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V)	Corriente (A) - Icc
0	-16,4648	-4,76563
8,00E-05	-23,2617	-4,91699
0,00016	-26,3086	-5,01953
0,00024	-30	-5,17578
0,00032	-36,2109	-5,38086
0,0004	-38,6719	-5,53711
0,00048	-43,0078	-5,74219
....
0,07944	34,7461	-1,26465
0,07952	31,0547	-1,57715
0,0796	27,3633	-1,57715
0,07968	26,7773	-1,83105
0,07976	25,4883	-2,08984
0,07984	21,7969	-2,08984
0,07992	18,1055	-2,34863

Tabla 13. 1º procedimiento R.S. inversa (2). [3]

Representamos tensión, corriente de cortocircuito y corriente de excitación en la figura siguiente. Podemos apreciar que aunque excitamos con una corriente constante al cortocircuitar esta se vuelve oscilatoria.

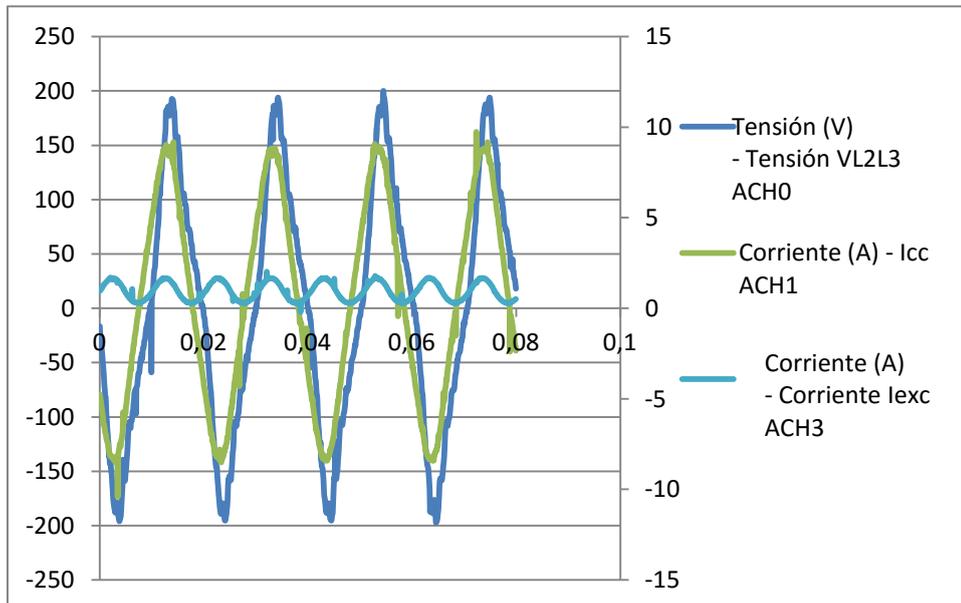


Figura 52. 1º procedimiento R.S. Inversa (2). [3]

$$X_2 = \frac{V_{L2-L3}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}} = \frac{194.04}{9.17 \cdot \sqrt{3}} = 12.217 \Omega$$

Usando los valores eficaces de tensión y corriente obtenidos mediante la herramienta FlukeView, la reactancia síncrona inversa queda:

$$X_2 = \frac{V_{L2-L3}(rms)}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}(rms)} = \frac{115.7}{5.49 \cdot \sqrt{3}} = 12.17 \Omega$$

La norma en la que nos estamos apoyando nos recomienda realizar los cálculos con potencia activa y reactiva, ya que con estas variables tienen menor influencia los armónicos.

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}^2} = \frac{570}{\sqrt{3} \cdot 5.49^2} = 10.92 \Omega$$

$$X_2 = \frac{V_2}{\sqrt{3}} \frac{P}{P^2 + Q^2} = 10.77 \Omega$$

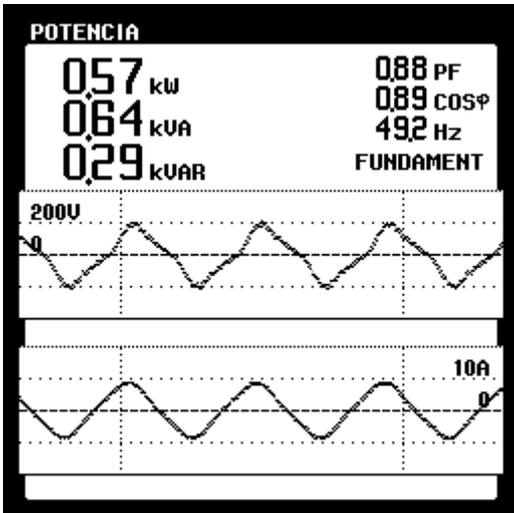


Figura 53. Captura "Fluke" (2). [3]

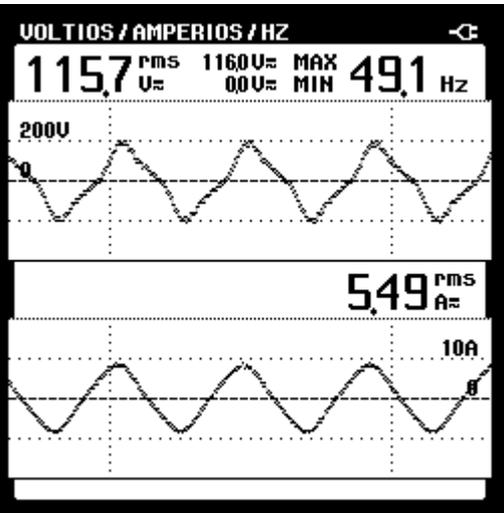


Figura 54. Captura "Fluke" (3). [3]

2º Procedimiento reactancia síncrona inversa

A continuación, mostramos un extracto de los datos del ensayo disponibles en la Tabla 9 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 9.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión VL1-N (V)	Corriente (A) - Icc
0	51,4453	-1,78223
8,00E-05	49,5703	-1,72852
0,00016	46,5234	-1,52344
0,00024	45,2344	-1,37207
0,00032	48,9844	-1,21582
0,0004	48,9844	-1,01074
0,00048	45,2344	-0,805664
....
0,07944	65,625	-3,01758
0,07952	64,9805	-2,75879
0,0796	65,625	-2,75879
0,07968	61,9336	-2,45117
0,07976	60,0586	-2,24609
0,07984	58,8281	-2,19238
0,07992	55,7812	-2,03613

Tabla 14. 2º procedimiento R.S. Inversa. [3]

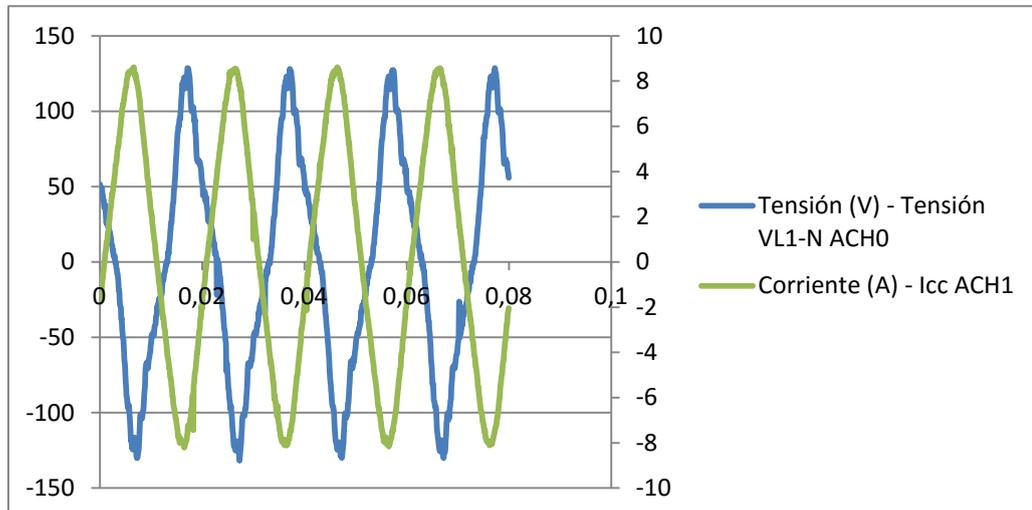


Figura 55. 2º procedimiento R.S. Inversa. [3]

Con los datos de este ensayo y la corriente de cortocircuito correspondiente con el cortocircuito brusco obtenemos de otra forma la reactancia síncrona inversa:



$$X_2 = U_n \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} - \frac{1}{I_{ccp}} \right) = 380 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{8.61} - \frac{1}{5.8} \right) = 10.92 \Omega$$

4.4.2 MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO

1º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

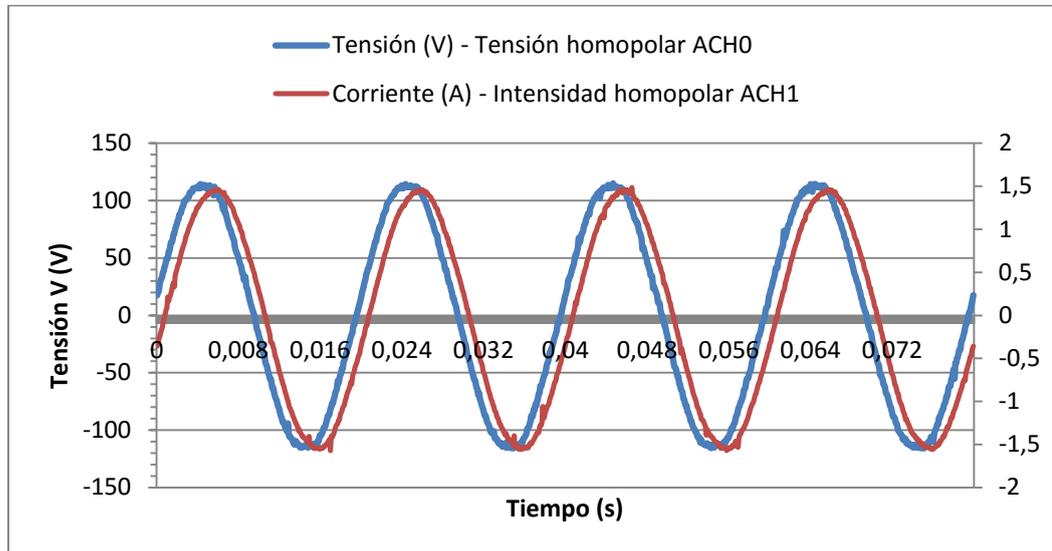


Figura 56. 1º Procedimiento para R.S. Homopolar. [3]

La tensión para esta fórmula ha de ser la eficaz obligatoriamente.

$$X_0 = \frac{V_0^{ef}}{3 \cdot I_n} = \frac{115.02/\sqrt{2}}{3 * 0.46} = 58.94 \Omega$$

Tiempo (s)	Tensión homopolar ACH0(V)	Corriente homopolar ACH1(A)
0	17,5195	-0,357666
8,00E-05	19,9805	-0,319214
0,00016	21,2109	-0,280762
0,00024	26,7773	-0,248413
0,00032	29,8242	-0,216064
0,0004	31,6992	-0,177612
0,00048	33,5156	0,151978
...
0,07944	-0,410156	-0,563354
0,07952	2,69531	-0,531006
0,0796	3,28125	-0,48645
0,07968	7,03125	-0,473022
0,07976	10,0781	-0,428467
0,07984	13,7695	-0,383301
0,07992	17,5195	-0,357666

Tabla 15. 1º Procedimiento para R.S. Homopolar. [3]

Aquí mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 10 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 10.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

2º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

Cortocircuito fase-neutro

A continuación mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 11 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 11.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V) - Tensión VL1L2 ACHO	Corriente (A) - IccN ACH1
0	45,8789	0,870361
8,00E-05	44,0039	0,825195
0,00016	44,0039	0,825195
0,00024	40,3125	0,799561
0,00032	37,8516	0,767212
0,0004	36,6211	0,741577
0,00048	34,1602	0,722046
....
0,07944	33,5156	1,06323
0,07952	29,2383	1,06323
0,0796	28,5937	1,03699
0,07968	32,9297	1,01807
0,07976	32,9297	1,00525
0,07984	35,3906	0,979614
0,07992	39,7266	0,953979

Tabla 16. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

Con los datos anteriores obtenemos la siguiente gráfica:

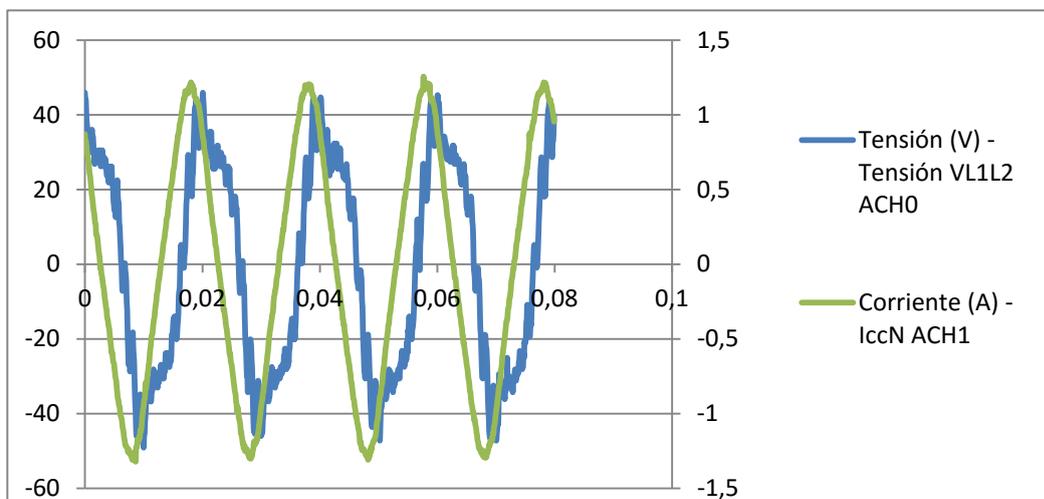


Figura 57. 1ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

Cortocircuito fase-fase

Presentamos aquí un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 12 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 12.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V) - Tensión VL2L3 ACH0	Corriente (A) - Icc ACH1
0	-59,0039	0,606689
8,00E-05	-57,7734	0,62561
0,00016	-55,957	0,632324
0,00024	-52,2656	0,651855
0,00032	-49,7461	0,657959
0,0004	-46,0547	0,741577
0,00048	-46,0547	0,664673
....
0,07944	-12,1289	0,426636
0,07952	-17,0508	0,426636
0,0796	-23,2617	0,439453
0,07968	-24,4922	0,419922
0,07976	-24,4922	0,432739
0,07984	-25,7227	0,465088
0,07992	-27,5391	0,490723

Tabla 17. 2ª parte 2º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

De la misma forma obtenemos la siguiente gráfica :

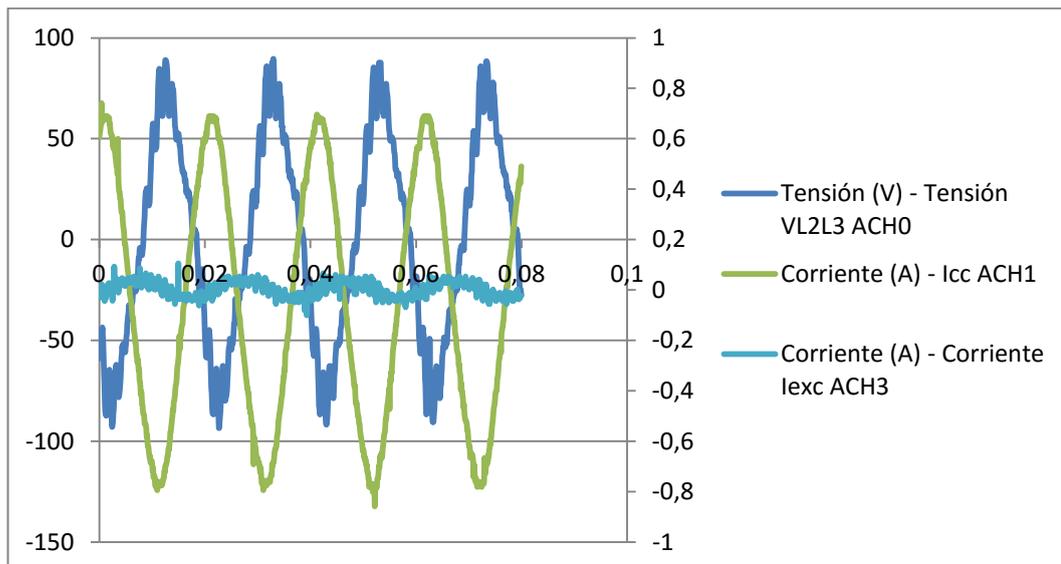


Figura 58. 2ª parte 2º procedimiento R.S. homopolar. [3]



$$X_0 = U_n \cdot \left(\frac{3}{I_{ccN}} - \frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} \right) = 380 \cdot \left(\frac{3}{1.21} - \frac{\sqrt{3}}{0.742} \right) = 55.11 \Omega$$

3º Procedimiento reactancia síncrona homopolar

A continuación mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 13 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 13.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V) - Tensión VL1-N ACH0	Corriente (A) - IccN ACH1
0	-30,6445	0,657959
8,00E-05	-28,1836	0,67749
0,00016	-33,75	0,72876
0,00024	-36,7969	0,754395
0,00032	-35,5664	0,792847
0,0004	-36,7969	0,838013
0,00048	-46,0547	0,895996
....
0,07944	-33,75	0,388184
0,07952	-33,1055	0,458984
0,0796	-31,2305	0,50354
0,07968	-30	0,535889
0,07976	-31,2305	0,593872
0,07984	-26,3086	0,606689
0,07992	-30	0,62561

Tabla 18. 3º procedimiento R.S. Homopolar. [3]

En la siguiente gráfica representamos los valores de intensidad y tensión en el tiempo :

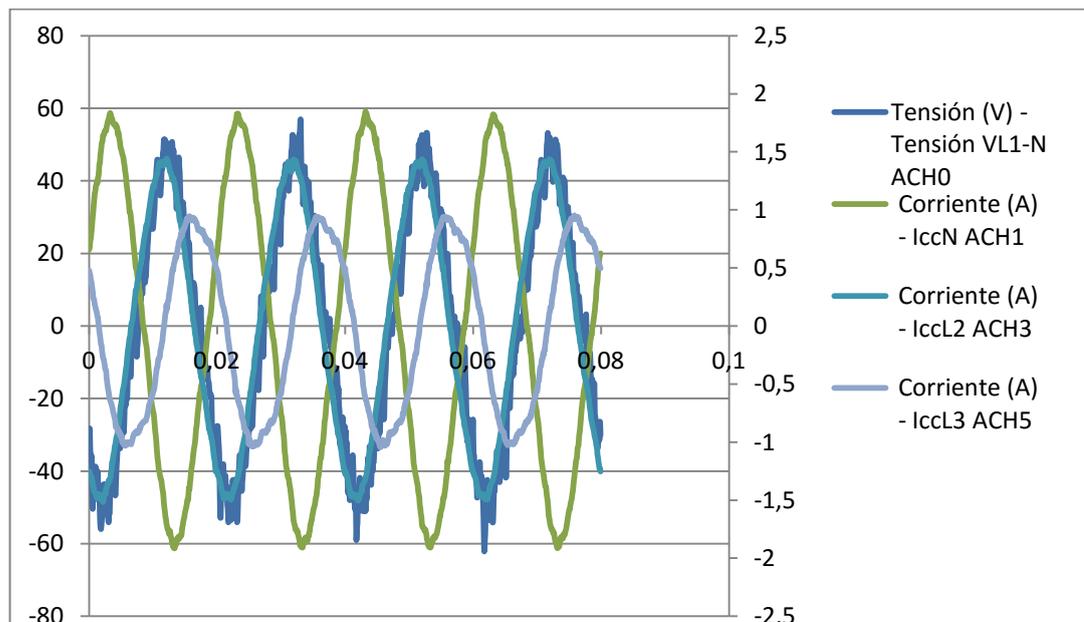


Figura 59. 3º procedimiento R.S. homopolar. [3]



$$X_0 = \frac{V_{L1-N}}{I_{ccN}} = \frac{54.4 \cdot \sqrt{3}}{1.82} = 29.9 \Omega$$

1º Procedimiento reactancia síncrona inversa

Para calcular la reactancia síncrona el método que hemos utilizado ha sido el mismo que el de la segunda parte del 2º procedimiento para obtener la reactancia síncrona homopolar.

A continuación, representamos de nuevo tensión entre fases y la corriente de cortocircuito en función del tiempo :

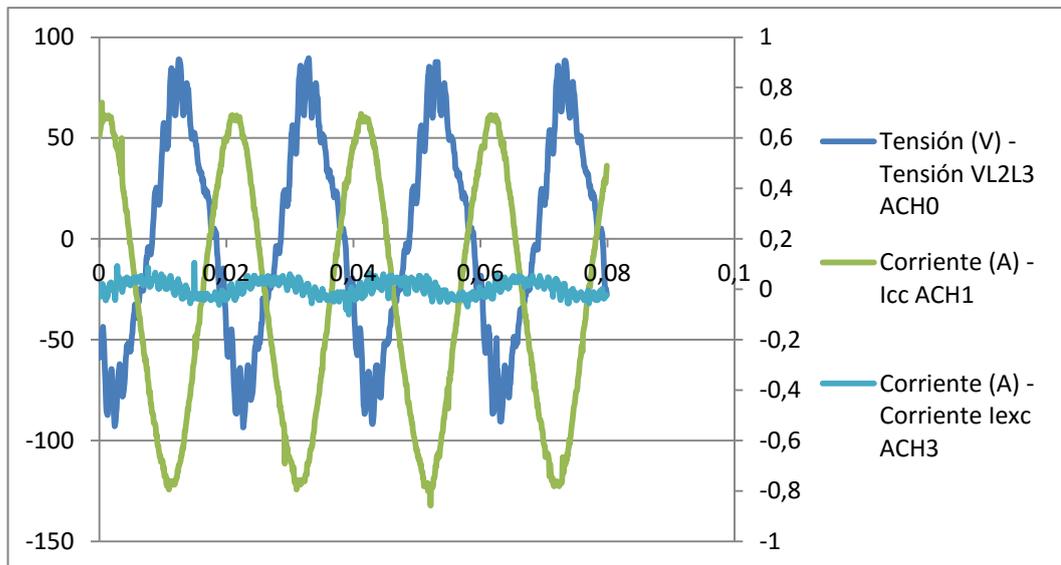


Figura 60. 1º procedimiento R.S. Inversa. [3]

Los datos de esta gráfica estarán como hemos mencionado anteriormente en la Tabla 12 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo "Tabla 12.xlsx" dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

$$X_2 = \frac{V_{L2-L3}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}} = \frac{89.707}{0.742 \cdot \sqrt{3}} = 69.84 \Omega$$

2º Procedimiento reactancia síncrona inversa

A continuación mostramos un extracto de los datos del ensayo. El resto de ellos están disponibles en la Tabla 14 (Dicha tabla se puede consultar en el archivo “Tabla 14.xlsx” dentro de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V) - Tensión VL1-N ACH0	Corriente (A) - Icc ACH1
0	82,2656	1,47461
8,00E-05	89,0625	1,48743
0,00016	92,7539	1,51306
0,00024	90,9375	1,51306
0,00032	89,707	1,55762
0,0004	83,4961	1,55151
...
0,07944	12,5391	1,01135
0,07952	18,1055	1,06323
0,0796	26,1328	1,08215
0,07968	32,9297	1,09497
0,07976	38,4961	1,12732
0,07984	40,3125	1,15967
0,07992	42,1875	1,19812

Tabla 19. 2º procedimiento R.S. Inversa. [3]

Representando los datos análogamente a apartados anteriores obtenemos :

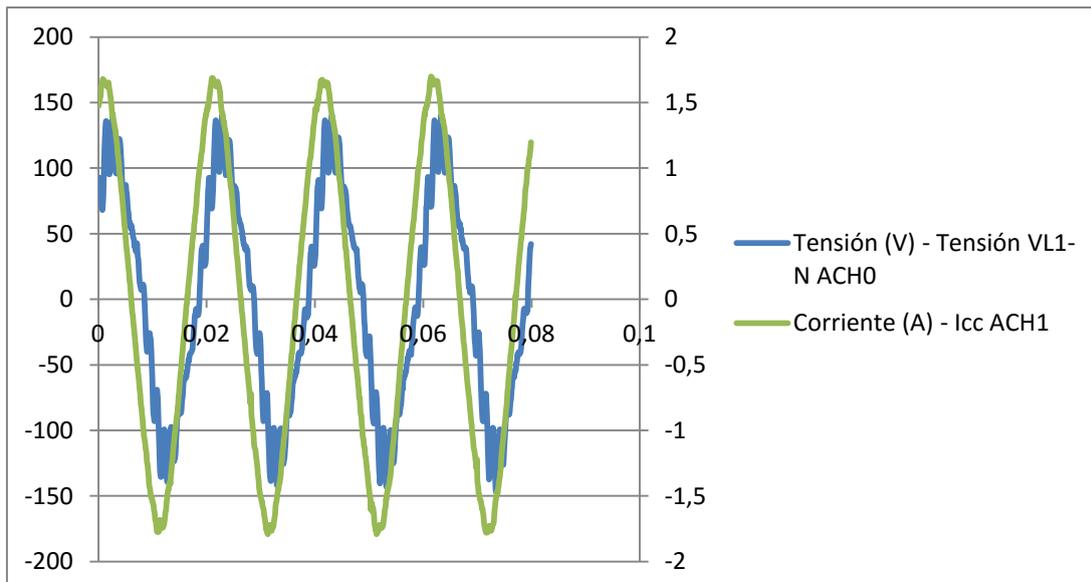


Figura 61. 2º procedimiento R.S. Inversa. [3]

$$X_2 = U_n \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{I_{ccF}} - \frac{1}{I_{ccp}} \right) = 380 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{1.7} - \frac{1}{1.2} \right) = 70.49 \Omega$$

Resultados de los diferentes ensayos en las dos máquinas:

	Máq. rotor cilíndrico	Máq. polos salientes
$X_0(1^\circ \text{ Proced.})$	58.94	4.14
$X_0(2^\circ \text{ Proced.})$	55.11	5.00
$X_0(3^\circ \text{ Proced.})$	29.9	4.1
$X_2(1^\circ \text{ Proced.})$	69.84	10.92
$X_2(2^\circ \text{ Proced.})$	70.49	10.92

Tabla 20. Resultados reactancias síncronas ambas máquinas. [3]

De los resultados obtenidos, tomamos como valores más precisos aquellos cuyo procedimiento se realice mediante un único ensayo, ya que en estos el error que se induce es menor que en los que requieren de dos ensayos.

En la máquina de polos salientes, realizamos dos variantes más que eran recomendados por la norma EN 60034-4:2008 para obtener medidas más precisas. Luego para este caso hemos dado mayor credibilidad a estas medidas.

En la máquina de rotor cilíndrico, podemos observar que por el 3º procedimiento el resultado no es congruente, esto como ya se explicará más adelante responde a que para esta máquina de pequeña potencia la corriente de excitación debía de estar fija en un rango muy limitado, lo que no era posible en algunas circunstancias.

5. RESULTADOS EN VALORES POR UNIDAD (p.u)

A continuación vamos a proceder a hallar los valores de las reactancias calculadas en los diferentes ensayos vistos con anterioridad, en su valor por unidad (p.u). Será conveniente contrastar estos resultados con los valores normales establecidos a nivel internacional.

Como valores base para deducir los valores p.u. tomaremos la tensión y la potencia que vienen en la placa de características de casa máquina síncrona.

1. Máquina síncrona de rotor cilíndrico

$$V_n = V_b = 380 \text{ V}$$

$$S_n = S_b = 0.3 \text{ kVA}$$

A partir de estos valores que hemos tomados de referencia obtenemos tanto la corriente base I_b como la reactancia base X_b (recordemos que debido a lo despreciable de la resistencia $Z_b \sim X_b$), a través de:

$$I_n = I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_b} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 380} = 0.4558 \text{ A} \quad (35)$$

$$Z_n = Z_b = \frac{\sqrt{3} \cdot V_b^2}{S_b} = \frac{\sqrt{3} \cdot 380^2}{300} = 833.69 \Omega \quad (36)$$

A partir de la siguiente relación, ya vista durante el desarrollo del trabajo, procedemos a calcular la reactancia síncrona directa :

$$3 \cdot \frac{U_n}{I_{ccN}} = X_0 + X_1 + X_2$$
$$3 \cdot \frac{380}{1.21/\sqrt{2}} = 58.94 + X_1 + 69.84$$

Luego : $X_1 = 1203.62 \Omega$

Una vez hemos obtenido todos los valores base, podemos calcular las reactancias síncronas en sus valores v.p.u, que es la forma en la que podremos compararlas entre ellas. Este cálculo se realiza mediante la simple

relación :

$$X(p.u) = \frac{X}{X_b}$$

(37)

- Reactancia síncrona directa (X_1)

$$X_1 = \frac{1203.62}{833.69} = 1.444 p.u.$$

- Reactancia síncrona inversa (X_2)

$$X_2 = \frac{69.84}{833.69} = 0.0838 p.u.$$

- Reactancia síncrona homopolar (X_0)

$$X_0 = \frac{58.94}{833.69} = 0.071 p.u.$$

2. Máquina síncrona de polos salientes

$$V_n = V_b = 380 \text{ V}$$

$$S_n = S_b = 3 \text{ kVA}$$

De la misma forma que con la máquina del apartado anterior obtenemos los valores base de intensidad e impedancia.

$$I_n = I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_b} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 4.558 \text{ A}$$

$$Z_n = Z_b = \frac{\sqrt{3} \cdot V_b^2}{S_b} = \frac{\sqrt{3} \cdot 380^2}{3000} = 83.369 \Omega$$

A partir de la siguiente relación, ya vista durante el desarrollo del trabajo, procedemos a calcular la reactancia síncrona directa :

$$3 \cdot \frac{U_n}{I_{ccN}} = X_0 + X_1 + X_2$$

$$3 \cdot \frac{380}{13.2/\sqrt{2}} = 4.1 + X_1 + 10.92$$

Luego : $X_1 = 107.116 \Omega$

Análogamente que en el apartado anterior, los resultados en valores por unidad de las reactancias síncronas son :

- Reactancia síncrona directa (X_1)

$$X_1 = \frac{107.116}{83.369} = 1.285 \text{ p. u.}$$

- Reactancia síncrona inversa (X_2)

$$X_2 = \frac{10.92}{83.369} = 0.131 \text{ p. u.}$$

- Reactancia síncrona homopolar (X_0)

$$X_0 = \frac{4.1}{83.369} = 0.049 \text{ p. u.}$$

La reactancia síncrona puede calcularse a partir de :

$$X_s = \frac{U_n}{I_{ccp}} = \frac{380}{3.5} = 108.571 \Omega$$

Que en valores p.u. :

$$X_s(p.u) = \frac{108,571}{83.369} = 1.302 p.u$$

(38)

Las reactancias transitorias y subtransitorias las hemos calculado anteriormente :

$$X'_s(p.u) = \frac{20.9347}{83.369} = 0.2511 p.u$$

(39)

$$X''_s(p.u) = \frac{12.91}{83.369} = 0.1549 p.u$$

(40)

Para alternadores de polos salientes :

	Valores normalizados	Resultados
X_o	0.04 - 0.2	0.049
X_1	0.8 - 1.2	1.285
X_2	0.15 - 0.3	0.131
X_s	0.8 - 1.2	1.302
X'_s	0.2 - 0.35	0.2511
X''_s	0.13 - 0.3	0.1549

Tabla 21. Comparativa reactancias máquina síncrona de polos salientes. [3]

Podemos comprobar que para la máquina de mayor potencia, los resultados son bastante precisos, ya que aquellos que se salen de los rangos normalizados, no lo hacen por mucho.



	Máq. rotor cilíndrico	Máq. polos salientes
X_0	0.071 p. u.	0.049 p. u.
X_1	1.444 p. u.	1.285 p. u.
X_2	0.0838 p. u.	0.131 p. u.

Tabla 22. Resultados reactancias síncronas en valores p.u. [3]

6. COMPROBACIÓN DE RESULTADOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CORTOCIRCUITOS

A partir de los resultados obtenidos para las reactancias, podemos calcular las tensiones y corrientes por fase y así comprobar si los resultados obtenidos son coherentes.

Estos cálculos se realizarán a partir de los estudios de cortocircuitos, materia contenida en la asignatura "Líneas eléctricas de A.T." impartida en el 3º curso del grado.

Conviene mencionar que nos basaremos en el teorema de Fortescue o teorema de las componentes simétricas, este se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas trifásicos desequilibrados, y demuestra que, de forma general, un sistema de n fases desequilibradas puede ser descrito por la suma de n sistemas equilibrados, denominados componentes simétricas, aplicando el principio de superposición.

De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres fasores desequilibrados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas equilibrados de fasores.

- 1) Componentes de secuencia positiva (directa) que consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados uno de otro por una fase de 120° y que tienen la misma secuencia de fase que las fases originales.
- 2) Componentes de secuencia negativa (inversa) que consiste en tres fasores iguales en magnitud, desplazados en fase uno de otro en 120° y que tienen una secuencia de fase contraria a las fases originales.
- 3) Componentes de secuencia cero (homopolares) que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno de otro.

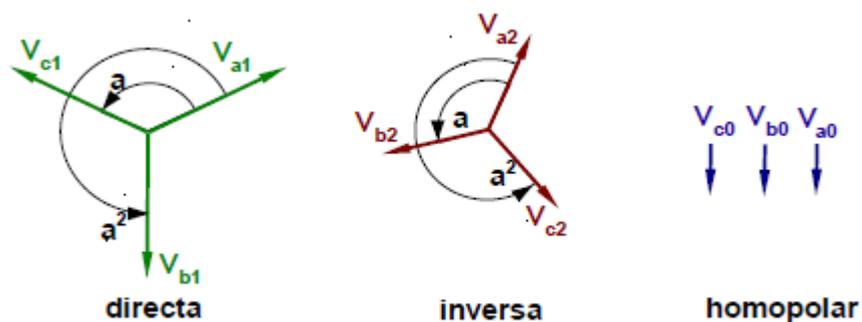


Figura 62. Componentes equilibrados a partir de teorema de Fortescue.^[9]

Por tanto tenemos :

$$\begin{array}{l} V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{array} \quad \begin{array}{l} V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{array}$$

En forma matricial :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (42)$$

MÁQUINA SÍNCRONA POLOS SALIENTES

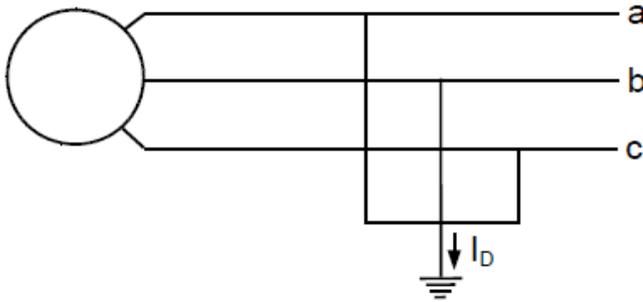
Realizaremos los cálculos con los siguientes valores nominales.

Valores nominales-base

$$\begin{aligned} V_n &= V_b = 380 \text{ V} \\ I_n &= I_b = 4.558 \text{ A} \\ Z_n &= Z_b = 83.369 \Omega \end{aligned}$$

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

a) A tierra.



Condiciones:

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ V_b &= 0 \\ V_c &= 0 \end{aligned}$$

Figura 63. Cortocircuito trifásico a tierra. [9]

Como sabemos que las tensiones en las diferentes fases son nulas hallaremos el valor de las componentes simétricas :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(43)

Vemos que sus valores también son nulos.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{z_1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Partiendo de las condiciones hallaremos el valor de las variables que nos interesan :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{E}{z1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1_{240^\circ} \\ 1_{120^\circ} \end{bmatrix} = \frac{1}{1.285} \begin{bmatrix} 1 \\ 1_{240^\circ} \\ 1_{120^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.778 \\ 0.778_{240^\circ} \\ 0.778_{120^\circ} \end{bmatrix} (p.u)$$

(44)

$$I_D = I_a + I_b + I_c = 0$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.546 \\ 3.546_{240^\circ} \\ 3.546_{120^\circ} \end{bmatrix} (A)$$

Podemos observar que este valor es muy similar a la corriente nominal de la máquina, por lo que es una buena aproximación.

b) Aislado de tierra

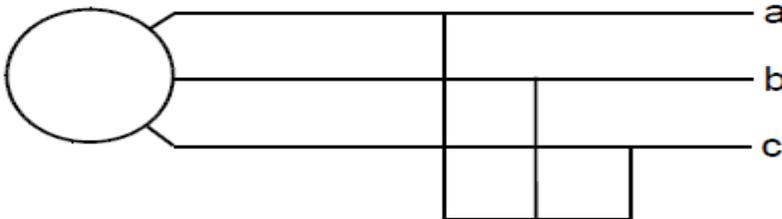


Figura 64. Cortocircuito trifásico aislado de tierra. [9]

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

(45)

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

(46)

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO. Fase - tierra.

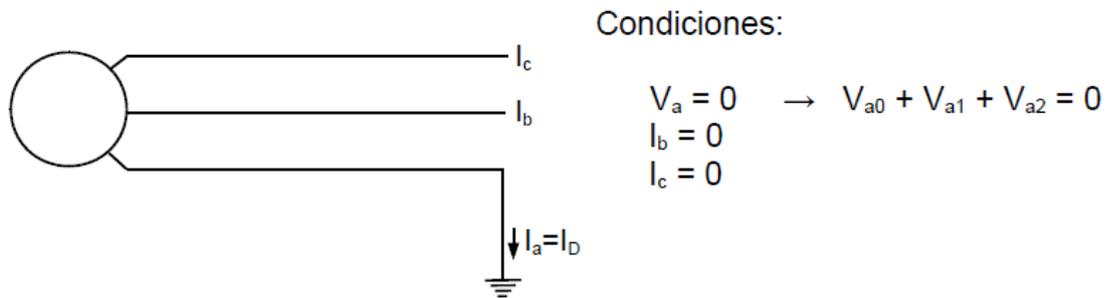


Figura 65. Cortocircuito fase-tierra. ¹⁹

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = \frac{I_a}{3} = \frac{E}{z_0 + z_1 + z_2} = \frac{1}{1.465} = \mathbf{0.682 (p.u.)}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{3 \cdot E}{z_0 + z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{3}{1.465} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{2.048} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} (p.u.) \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{9.33} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} (A)$$

Se puede comprobar que este valor corresponde con la corriente eficaz.

$$I_a(\text{máx}) = \mathbf{9.33\sqrt{2} = 13.2 A}$$

En anteriores apartados obtuvimos una corriente de cortocircuito fase-neutro de 13,2 A por lo que se adecua mucho el valor para esta situación.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{E}{z_0+z_1+z_2} \begin{bmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0+z_1+z_2} \begin{bmatrix} -z_0 \\ z_0+z_2 \\ -z_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0+z_1+z_2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -z_0 \\ z_0+z_2 \\ -z_2 \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0+z_1+z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ (a^2-1)z_0+(a^2-a)z_2 \\ (a-1)z_0+(a-a^2)z_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_0 + z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ z_{0210^\circ} + z_{2270^\circ} \\ z_{0150^\circ} + z_{290^\circ} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{1.445} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.049_{210^\circ} + 0.131_{270^\circ} \\ 0.049_{150^\circ} + 0.131_{90^\circ} \end{bmatrix} =$$

$$\frac{\sqrt{3}}{1.445} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1611_{-105.252^\circ} \\ 0.1611_{105.252^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{0.1931_{-105.252^\circ}} \\ \mathbf{0.1931_{105.252^\circ}} \end{bmatrix} (p.u)$$

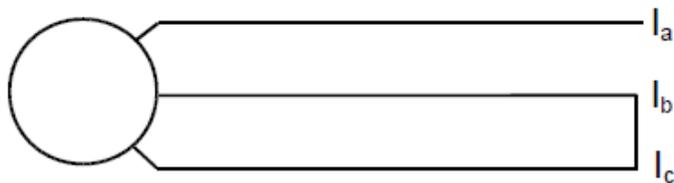
(49)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{73.378_{-105.252^\circ}} \\ \mathbf{73.378_{105.252^\circ}} \end{bmatrix} (V)$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = 141.586 (V)$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO

a) Aislado de tierra



Condiciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b + I_c &= 0 \\ V_b &= V_c \end{aligned}$$

Figura 66. Cortocircuito bifásico aislado de tierra. [9]

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + 2V_b \\ V_a - V_b \\ V_a - V_b \end{bmatrix} \rightarrow V_{a1} = V_{a2} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} I_b \begin{bmatrix} 0 \\ a - a^2 \\ a^2 - a \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_b \begin{bmatrix} 0 \\ 1_{90} \\ 1_{270} \end{bmatrix} \rightarrow I_{a1} = -I_{a2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (1) V_{a1} = V_{a2} \rightarrow E - I_{a1}z_1 = -I_{a2}z_2 \\ (2) I_{a1} = -I_{a2} \rightarrow E - I_{a1}z_1 = I_{a1}z_2 \end{cases} \rightarrow I_{a1} = \frac{E}{z_1 + z_2}$$

$$\begin{cases} V_{a1} = E - I_{a1}z_1 \\ I_{a1} = \frac{E}{z_1 + z_2} \end{cases} \rightarrow V_{a1} = E - \frac{Ez_1}{z_1 + z_2} \rightarrow V_{a1} = \frac{Ez_2}{z_1 + z_2}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \\ \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \end{bmatrix} = \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{0.131}{1.416} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.185 \\ -0.0925 \\ -0.0925 \end{bmatrix} \text{ (p.u)} \end{aligned}$$

(50)

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70.3 \\ -35.15 \\ -35.15 \end{bmatrix} \text{ (V)}$$

$$V_{ab} = Va - Vb = 70.3 + 35.15 = 105.45 \text{ (V)}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{E}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_{270} \\ 1_{90} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{1.416} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_{270} \\ 1_{90} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.223_{270} \\ 1.223_{90} \end{bmatrix} \text{ (p.u)} \end{aligned}$$

(51)



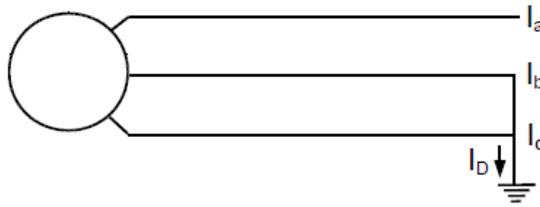
$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.575_{270^\circ} \\ 5.575_{90^\circ} \end{bmatrix} (A)$$

Estos valores corresponden con las corrientes eficaces, luego las corrientes de pico serán :

$$I_a(\text{máx}) = 5.575 \cdot \sqrt{2} = 7.885 \text{ A}$$

En anteriores apartados obtuvimos una corriente de cortocircuito fase-fase de 8,09 A por lo que se acerca bastante al valor correspondiente para esta situación.

b) A tierra



Condiciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \rightarrow I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \\ V_b &= V_c = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{V_a}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{V_a}{3}$$

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \rightarrow -\frac{V_{a0}}{z_0} + \frac{E - V_{a1}}{z_1} - \frac{V_{a2}}{z_2} = 0 \rightarrow -\frac{V_{a0}}{z_0} + \frac{E - V_{a0}}{z_1} - \frac{V_{a0}}{z_2} = 0$$

$$\rightarrow \frac{E}{z_1} = V_{a0} \left[\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right] \rightarrow V_{a0} = \frac{\frac{E}{z_1}}{\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}} \rightarrow \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{\frac{E}{z_1}}{\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{\frac{E}{z_1}}{\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{3E z_0 z_2}{z_0 z_1 + z_0 z_2 + z_1 z_2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ -I_{a0} - I_{a2} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = V_{a0} \begin{bmatrix} \frac{-1}{z_0} \\ \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_2} \\ \frac{-1}{z_2} \end{bmatrix} = \frac{\frac{E}{z_1}}{\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}} \begin{bmatrix} \frac{-1}{z_0} \\ \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_2} \\ \frac{-1}{z_2} \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0 z_1 + z_0 z_2 + z_1 z_2} \begin{bmatrix} -z_2 \\ z_0 + z_2 \\ -z_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0 z_1 + z_0 z_2 + z_1 z_2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -z_2 \\ z_0 + z_2 \\ -z_0 \end{bmatrix} = \frac{E}{z_0 z_1 + z_0 z_2 + z_1 z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ (a^2 - 1)z_2 + (a^2 - a)z_0 \\ (a - 1)z_2 + (a - a^2)z_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{3 \cdot E \cdot z_0 z_2}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{0.0193}{0.2377} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0818 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (p.u) \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30.85 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (V)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ z_{2210^\circ} + z_{0270^\circ} \\ z_{2150^\circ} + z_{090^\circ} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{0.2377} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.049_{270^\circ} + 0.131_{210^\circ} \\ 0.049_{90^\circ} + 0.131_{150^\circ} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{0.2377} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1611_{-134.723^\circ} \\ 0.1611_{134.723^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.174_{-134.723^\circ} \\ 1.174_{134.723^\circ} \end{bmatrix} (p.u) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.35_{-134.723^\circ} \\ 5.35_{134.723^\circ} \end{bmatrix} (A)$$

$$I_D = I_b + I_c = \frac{3 \cdot E \cdot z_2}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} = 1.653 (v.p.u) = 7.536 (A) \quad (54)$$

Este sería el valor eficaz, el valor máximo que es el que anteriormente hemos obtenido sería:

$$I_D = 7.536 \cdot \sqrt{2} = 10.657 A$$

En anteriores apartados obtuvimos una corriente de cortocircuito 2 fases neutro de 11,48 A ; en este caso no obtenemos tanta precisión como en los cortocircuitos anteriores.

Corrientes obtenidas para cada tipo de cortocircuito :

- **Trifásico** : $I_{cc}=1.49I_n$
- **Fase-neutro**: $I_{cc}=2.89I_n$
- **Fase-fase**: $I_{cc}=1.730I_n$
- **2 Fases-tierra**: $I_{cc}=2.338I_n$

MÁQUINA SÍNCRONA ROTOR CILÍNDRICO

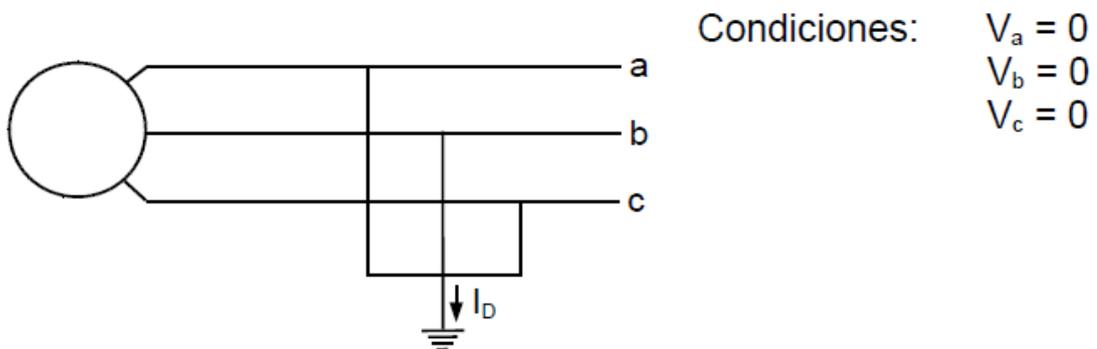
Realizaremos los cálculos con los siguientes valores nominales.

Valores nominales-base

$$\begin{aligned} V_n &= V_b = 380 \text{ V} \\ I_n &= I_b = 0.4558 \text{ A} \\ Z_n &= Z_b = 833.69 \Omega \end{aligned}$$

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

a) A tierra



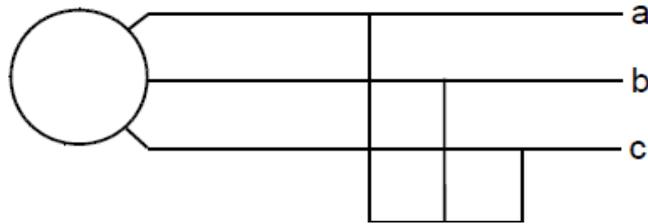
$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{E}{z_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1_{240^\circ} \\ 1_{120^\circ} \end{bmatrix} = \frac{1}{1.444} \begin{bmatrix} 1 \\ 1_{240^\circ} \\ 1_{120^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6925 \\ 0.6925_{240^\circ} \\ 0.6925_{120^\circ} \end{bmatrix} (p.u)$$

(55)

$$I_D = I_a + I_b + I_c = 0$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3156 \\ 0.3156_{240^\circ} \\ 0.3156_{120^\circ} \end{bmatrix} (A)$$

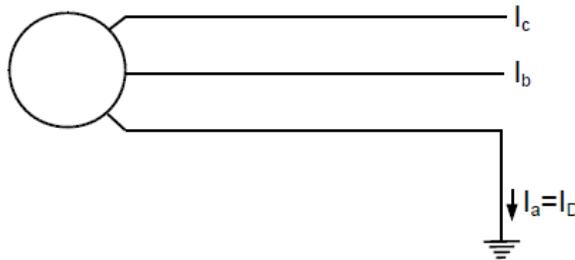
b) Aislado de tierra



$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (56)$$

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (57)$$

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO. Fase - tierra



Condiciones:

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \rightarrow V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned}$$

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = \frac{I_a}{3} = \frac{E}{z_0 + z_1 + z_2} = \frac{1}{1.598} = 0.626 \text{ v. p. u.}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{3 \cdot E}{z_0 + z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{3}{1.598} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.877 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (p. u.)}$$

(58)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8557 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

Se puede comprobar que este valor corresponde con la corriente eficaz, luego el valor de pico será :

$$I_a(\text{máx}) = 0.8557\sqrt{2} = 1.21 \text{ A}$$

En anteriores apartados obtuvimos una corriente de cortocircuito fase-neutro de 1,21 A , por lo que constituye una perfecta aproximación al ensayo.

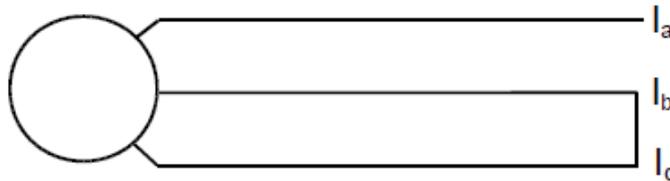
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_0 + z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ z_{0210^\circ} + z_{2270^\circ} \\ z_{0150^\circ} + z_{290^\circ} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{1.598} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.071_{210^\circ} + 0.0838_{270^\circ} \\ 0.071_{150^\circ} + 0.0838_{90^\circ} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{1.598} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.134_{-117.271^\circ} \\ 0.134_{117.271^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.145_{-117.271^\circ} \\ 0.145_{117.271^\circ} \end{bmatrix} \text{ (p.u)} \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 55.1_{-117.271^\circ} \\ 55.1_{117.271^\circ} \end{bmatrix} \text{ (V)}$$

$$V_{ab} = Va - Vb = 97.951 \text{ (V)}$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO

a) Aislado de tierra



Condiciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b + I_c &= 0 \\ V_b &= V_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \\ \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \end{bmatrix} = \frac{E \cdot z_2}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{0.0838}{1.598} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1048 \\ -0.0524 \\ -0.0524 \end{bmatrix} \text{ (v.p.u)} \end{aligned} \tag{60}$$

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.85 \\ -19.93 \\ -19.93 \end{bmatrix} \text{ (V)}$$

$$V_{ab} = Va - Vb = 39.85 + 19.93 = 59.78 \text{ (V)}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia0 \\ Ia1 \\ Ia2 \end{bmatrix} = \frac{E}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_1 + z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_{270^\circ} \\ 1_{90^\circ} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{1.528} \begin{bmatrix} 0 \\ 1_{270^\circ} \\ 1_{90^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.134_{270^\circ} \\ 1.134_{90^\circ} \end{bmatrix} \text{ (v.p.u)} \end{aligned} \tag{61}$$

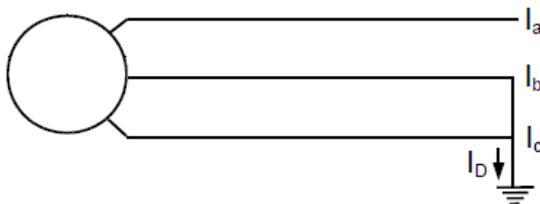
$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.517_{270^\circ} \\ 0.517_{90^\circ} \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

Estos valores corresponden con las corrientes eficaces, luego los corrientes de pico serán :

$$I_a(\text{máx}) = 0.517 \cdot \sqrt{2} = 0.73 \text{ A}$$

En anteriores apartados obtuvimos una corriente de cortocircuito fase-fase de 0,742 A , por lo que se trata de una buena aproximación al ensayo.

b) A tierra



Condiciones:

$$I_a = 0 \rightarrow I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \frac{3 \cdot E \cdot z_0 z_2}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{0.0178}{0.2295} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0777 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (v. p. u)} \quad (62)$$

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 29.555 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (V)}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{3} \cdot E}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} \begin{bmatrix} 0 \\ z_{2210^\circ} + z_{0270^\circ} \\ z_{2150^\circ} + z_{090^\circ} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{0.2295} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.071_{270^\circ} + 0.0838_{210^\circ} \\ 0.071_{90^\circ} + 0.0838_{150^\circ} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{0.2377} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1342_{-122.732^\circ} \\ 0.1342_{122.732^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9778_{-122.732^\circ} \\ 0.9778_{122.732^\circ} \end{bmatrix} \text{ (v. p. u)} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4457_{-122.732^\circ} \\ 0.4457_{122.732^\circ} \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

$$I_D = I_b + I_c = \frac{3 \cdot E \cdot z_2}{z_0 z_1 + z_1 z_2 + z_0 z_2} = 1.0576 \text{ (v. p. u)} = 0.482 \text{ (A)} \quad (64)$$

Este sería el valor eficaz, el valor máximo que es el que anteriormente hemos obtenido sería:

$$I_D = 0.482 \cdot \sqrt{2} = 0.682 \text{ A}$$

Para este caso no obtuvimos tan buena aproximación, ya que durante los ensayos obtuvimos un valor de 1,7 A.

Corrientes obtenidas para cada tipo de cortocircuito :

- **Trifásico** : $I_{cc}=1.001I_n$
- **Fase-neutro**: $I_{cc}=2.655I_n$
- **Fase-fase**: $I_{cc}=1.602I_n$
- **2 Fases-tierra**: $I_{cc}=1.49I_n$





7. PROTECCION FRENTE A CORTOCIRCUITOS

Un cortocircuito se produce cuando se unen dos puntos del circuito con diferente potencial eléctrico. Cuando se produce el contacto provocando el cortocircuito, la corriente aumenta considerablemente en un instante muy corto de tiempo, esto provoca daños graves en los equipos y posibles daños en personas que se encuentren cerca del cortocircuito. Las causas del cortocircuito suelen ser alguna de las causas siguientes:

- Elementos metálicos que unen los contactos accidentalmente.
- Cables rotos o con funda deteriorada uniendo los cables.
- Deteriorado el barniz aislante de los conductores.
- Fallo en el montaje o mantenimiento al crear un contacto erróneamente.
- Por humedades, polvo o filtraciones de agua o líquido conductor.

Para evitar daños por el aumento repentino de la corriente por cortocircuitos los circuitos están protegidos por diferentes métodos que concretaremos a continuación.

Los principales dispositivos que protegen los circuitos contra cortocircuitos son los fusibles que se deben cambiar cuando han actuado.

Otro componente eléctrico que protege los circuitos contra cortocircuitos son los interruptores magnéticos o magnetotérmicos, que se encargan de abrir el circuito en caso de cortocircuito, pero solo se tiene que rearmar el componente una vez reparado el motivo del cortocircuito levantando la maneta del interruptor sin necesidad de cambiar el componente protector como pasa con el fusible. Los interruptores magnéticos que se suelen utilizar para proteger a motores son regulables la intensidad de disparo, teniendo que regularlo dependiendo de la intensidad nominal del motor, ajustándolo según indique el fabricante del motor, normalmente en un valor cercano al de la intensidad máxima del motor controlando que no salte con el pico de intensidad del arranque.



En un sistema eléctrico, los generadores son un elemento destacado del resto. En caso de que el sistema sufra alguna perturbación los generadores han de mantenerse en servicio siempre que sea posible. Esto en ocasiones no es posible debido a las limitaciones mecánicas y térmicas. Por otra parte, los generadores, como máquinas rotativas, padecen los disturbios de la red de forma muy distinta al resto de equipos.

También pueden suceder averías internas en sus arrollamientos. Algunas de estas, son muy dañinas para la máquina. La detección de tales faltas internas requiere de sistemas de protección.

Por todo ello, la protección de los generadores requiere de un análisis más exhaustivo. Conforme aumenta la potencia de las máquinas, sus sistemas de protecciones son más complejos.

Para los grandes alternadores, se instalan equipos de protección compactos, que incorporan *relés de protección* propiamente dichos, *los transformadores auxiliares de intensidad y tensión*, *las fuentes de alimentación para los relés y las bobinas de disparo*, *el equipo de señalización*, *relés auxiliares*, *equipos de vigilancia de los circuitos de disparo*, etc. Las protecciones suelen agruparse en dos paneles de protección. La distribución de protecciones entre los dos paneles se realiza intentando que las protecciones de un panel tengan la réplica de reserva local en el otro. En el caso de que esto no se cumpla, se duplican las protecciones.

1) PROTECCIÓN DE CORTOCIRCUITOS ENTRE ESPIRAS

Los cortocircuitos entre espiras son roturas del aislamiento entre espiras del mismo arrollamiento o de la misma fase. Aparecen sobre todo en alternadores con gran número de conductores por ranura; es decir, en unidades con tensión relativamente elevada y de baja potencia. Las causas más habituales de cortocircuitos son las sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos o deterioros mecánicos del aislamiento. En máquinas que sólo poseen uno o dos conductores por ranura, la probabilidad de cortocircuito entre espiras es baja: se asocia únicamente a la cabeza de la bobina, sobre la que se ejercen grandes fuerzas.

Cuando ocurre un cortocircuito entre espiras pueden aparecer intensidades de gran magnitud; es por esto que los defectos han de ser solventados rápidamente, a fin de evitar el deterioro de otras partes del bobinado. Usualmente, cuando ocurre un cortocircuito entre espiras, también se produce un fallo de aislamiento contra el hierro del estátor, lo que puede

desencadenar el funcionamiento de la protección contra defectos a tierra del estátor.

a) *Protección de los cortocircuitos entre espiras en máquinas con un arrollamiento por fase*

Un cortocircuito entre espiras supone un descenso de la tensión inducida en la fase. Esto implica que aparece una diferencia de potencia entre el neutro de los arrollamientos y el de las tensiones en los bornes de la máquina. Dicha diferencia de potencial es empleada para localizar el cortocircuito.

La suma de las tensiones de fase se desarrolla con la ayuda de un transformador de tensión trifásico de acoplamiento magnético. En el lado de A.T., el punto neutro de dicho transformador se une al punto neutro del alternador. En el arrollamiento secundario con conexión en triángulo se acopla un relé de tensión máxima.

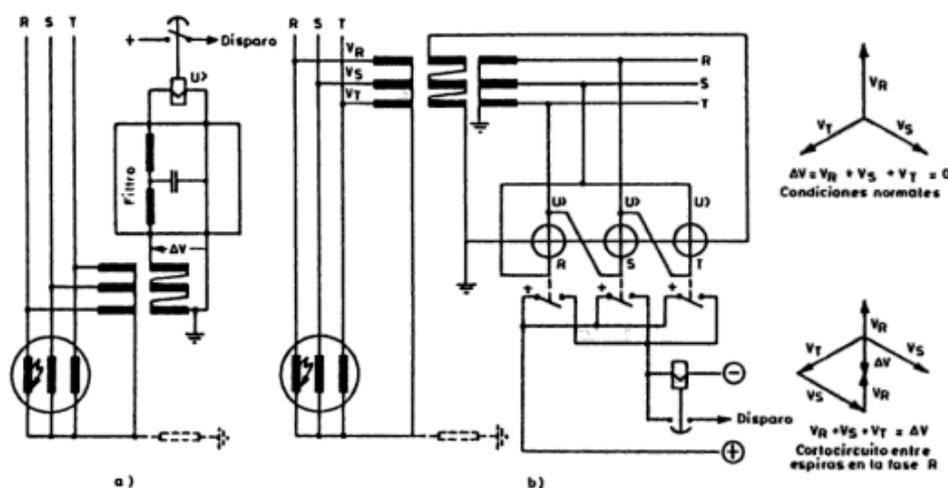


Figura 68. Protección contra cortocircuitos entre espiras.^[12]

En circunstancias normales, el relé se mantiene en reposo. Cuando ocurre un cortocircuito entre espiras, la diferencia de potencial de la que hemos hablado tiene que producir la actuación del relé de tensión. La tensión máxima durante un cortocircuito entre espiras que englobase el arrollamiento completo sería igual a la tensión de fase.

Como en situaciones normales se presenta en los bornes de un arrollamiento en triángulo la suma del 3º armónico en las tres tensiones de fase, esta protección ha de ser impasible a los armónicos. Pueden usarse los relés tipo Ferraris que son polarizados por una tensión compuesta sin armónicos. La tensión del arrollamiento en triángulo del transformador de igual manera se conecta al segundo bobinado. Este acoplamiento es exclusivamente proporcional a la componente 50 Hz de la tensión e independiente de los armónicos de 3º orden,

Cuando se empleen los relés tipo Ferraris, polarizados cada uno de estos con



una tensión compuesta, puede conseguir lo siguiente:

1. Determinar la fase en defecto.
2. Ajustar una sensibilidad común para las tres fases.

Como consecuencia de la unión del punto neutro del alternador con el del transformador de tensión, esto también puede emplearse para alternadores con neutro a tierra.

Para concretar la sensibilidad necesaria de una protección contra cortocircuitos entre espiras, hay que definir a partir de qué mínimo número de pasos de bobinas es posible el contacto entre partes de arrollamiento de la misma fase. Entonces, podrá deducirse la tensión mínima que queda cortocircuitada en el momento del contacto. Esta tensión debe ser localizada por el relé de protección contra cortocircuitos entre espiras y tienen que ser superiores al máximo valor de las asimetrías que aparecen en circunstancias normales. Es lo normal adecuar el valor de actuación al 2 % de la tensión nominal. En alternadores de polos salientes son tolerables grandes asimetrías de tensión. Por lo que hay que ajustar mucho más alto el relé.

Por otro lado, se requiere temporizar la protección para prevenir que el relé actúe debido a maniobras de explotación, fenómenos transitorios en la red externa, etc.

b) Protección de cortocircuito es entre espiras en máquinas con neutro aislado y con varios arrollamientos por fase

En estos alternadores, cuando tenemos un cortocircuito entre espiras en una de las bobinas, la tensión en la fase afectada se mantiene por el arrollamiento en paralelo. Para esta situación, es más conveniente medir la corriente de circulación entre las dos bobinas, en lugar de medir la tensión. Para esto, es adecuado conectar un relé de sobreintensidad entre los dos puntos neutros de los conductores del arrollamiento. En situaciones normales del servicio, circula intensidad a la frecuencia fundamental y únicamente una cierta corriente armónica.

Cuando se produce un cortocircuito entre espiras, se observa que circula corriente entre el conductor en defecto y el conductor sano paralelo de la misma fase, esto puede ser detectado por el relé de sobreintensidad.

El ajuste del relé ha de ser superior a la corriente normal de armónicos (sobre el 5% de la corriente nominal para máquinas pequeñas y 3 % para grandes). Se puede obtener una sensibilidad mayor si el relé tiene un filtro pasa-bajo

con el objetivo de eliminar armónicos.

Esta protección pues ser empleada de igual manera cuando el alternador tiene tres arrollamientos paralelos por fase, lo que puede llevar a tres puntos neutros diferentes. Este tipo de protección sólo debe emplearse en alternadores que poseen neutro aislado.

c) Protección de cortocircuitos entre espiras para máquinas con neutro puesto a tierra y varios arrollamientos por fase

En esta ocasión, la puesta a tierra del neutro se hace con un transformador de forma que los extremos del primario estén unidos a los dos puntos neutro, con puesta a tierra en el centro del arrollamiento primario. De esta forma, el transformador no muestra impedancia suplementaria para las corrientes que recorren hacia tierra puesto que hay compensación. Por lo que estas corrientes son idénticas en los dos conductores de arrollamiento. De forma adversa cuando ocurre un cortocircuito entre espiras aparecerá una corriente desde un punto neutro hacia el otro, que inducirá una intensidad en el arrollamiento secundario del transformador, con lo que esto desencadenará la actuación del relé de corriente.

Otro procedimiento se basa en comparar, mediante un relé diferencial, las intensidades en los diferentes conductores de arrollamiento de la misma fase o en las uniones de los puntos neutros a tierra. Si se revisan, dos a dos, las corrientes de fase de un alternador trifásico, la protección estará formada por seis transformadores de corriente y un relé diferencial trifásico (protección diferencial transversal). Además, puede distinguirse la fase que se ve afectada. Este uso provoca la aparición de una distribución simétrica de las bobinas en paralelo en las ranuras del estátor. Se pueden observar corrientes diferenciales de toda la serie de armónicos desde el segundo hasta el décimo.

Es adecuado recalcar que los cortocircuitos entre espiras no son localizados ni por un relé diferencial convencional ni por un relé de asimetría. Los relés diferenciales no actúan cuando ocurre un cortocircuito entre espiras, ya que la intensidad es igual en lado neutro y en lado bornes del alternador. El relé de asimetría no puede detectar determinados cortocircuitos entre espiras, a no ser que sea de extraordinaria sensibilidad.



2) PROTECCIÓN DE CONTACTOS A TIERRA EN EL ESTÁTOR

A pesar de las mejoras llevadas a cabo en la fabricación de los aislamientos de las máquinas eléctricas, sigue siendo el contacto a tierra una de las averías más usuales. Tanto el contacto entre espiras como entre devanados, ambos empiezan debido a un contacto a tierra en el estátor. Por esto, con la utilización de esta protección se puede prevenir el contacto entre espiras y por supuesto sus fatales consecuencias. Por este motivo, debe procurarse :

- a) Localizar contactos a tierra en toda la zona de los devanados, incluido en centro de estrella.
- b) Desconectar el generador y su excitación con la mayor celeridad posible, si se ha producido un contacto a tierra en el estátor.
- c) Conservar las intensidades de contacto a tierra lo menor posible para que no den lugar a daños en la chapa del estátor.
- d) Mejorar la sensibilidad de la protección de tal forma que permanezca insensible frente a perturbaciones y contactos a tierra en la red.

Se aconseja para seguir la premisa de "baja intensidad de paso a tierra" operar con el neutro del generador aislado o puesto a tierra a través de una impedancia grande. En conexiones "en bloque" se tiene la ventaja de tener la máquina aislada galvánicamente de la red externa, de forma que las perturbaciones no influyen en la protección contra contactos a tierra en el estátor. A pesar de ello, siempre existe influencia a través del transformador de bloque, de manera que si existe una falta a tierra en la red exterior también se presenta cierta tensión entre la estrella del generador y tierra.

Uno de los esquemas más comunes de puesta a tierra de un generador sería por medio de una resistencia conectada al secundario de un transformador de potencia, de relación V_1/V_2 .

El valor de r_{PT} , nos indica el valor máximo que puede tolerar la corriente de falta a tierra I_N .

El valor real de R_{PT} , viene dado por :

$$R_{PT} = r_{PT} \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

(65)

De aquí podemos deducir la máxima corriente de falta a tierra:

$$I_N = \frac{V_N}{R_{PT}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot r_{PT} \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}$$

(66)

r_{PT} : Impedancia de puesta a tierra, en ohmios secundarios

I_N :Corriente de falta a tierra (A)

Cuanto más cerca se encuentre la falta del neutro, menor será la tensión para dar lugar a intensidad.

El ajuste del relé de tensión será el grado de protección del arrollamiento.

Obviamente, cuanto menor sea el ajuste del relé mayor será la zona protegida del arrollamiento.

3) PROTECCIÓN DE FALTA A TIERRA EN EL ROTOR

Un contacto a tierra en el rotor de un generador síncrono no afecta por si mismo el funcionamiento de la máquina.

Normalmente, esta protección sólo sirve de alarma. Se deja a decisión del personal el momento para quitar der servicio la máquina y efectuar una medida exacta del contacto a tierra.

El principal problema se presenta con el segundo contacto a tierra; ya que en ese caso queda anulada una parte del arrollamiento inductor.

Además de los efectos térmicos, esta doble falta a tierra provoca una distorsión del flujo magnético creado por el arrollamiento inductor, de forma que las fuerzas atractivas difieren mucho de un polo al opuesto. Esta fuerza desequilibradora gira según lo hace el propio rotor, produciéndose una violenta vibración que puede dañar cojinete y llegar a desplazar el rotor.

Existen varias formas de detectar el primer contacto a tierra :



a) Método del potenciómetro

Este sistema es el más sencillo. Consiste en una resistencia con toma intermedia conectada en paralelo con el inductor. La toma media está conectada a tierra a través de un relé que no actúa en condiciones normales. En el momento en que se produce un contacto a tierra aparece una tensión en bornes del relé y éste cierra, de forma temporizada, un contacto de alarma.

El principal inconveniente es que cuando existe un contacto a tierra en las proximidades del centro del arrollamiento del rotor, el relé no se ve sometido a tensión y por lo tanto no se produce alarma. Esto se solventa con otra toma del potenciómetro. Si no se produce contacto, al conmutar la toma opera el relé. Esta conmutación debe efectuarse periódicamente y tomar la precaución de volver el conmutador a su posición original.

b) Método de inyección de corriente continua

El relé, alimentado por corriente alterna, inyecta una tensión de continua en el polo negativo del circuito de excitación y controla la circulación de corriente. El filtro elimina las componentes alternas provenientes de la tensión de excitación. Cuando se reduce la resistencia de asilamiento se produce un paso de corriente que provoca el cierre de un contacto de alarma con una temporización de 5-10 s. El ajuste mínimo del relé depende de la capacidad respecto a tierra del arrollamiento.

La temporización es necesaria para evitar que el relé funcione por el aumento de la corriente capacitiva provocada por el incremento de la tensión de excitación, que se suele producir cuando se regula muy rápidamente.

c) Método de inyección de corriente alterna

En este sistema la tensión alterna es inyectada al circuito de excitación a través de un transformador y se controla el paso de corriente. Cuando se produzca un contacto a tierra, la circulación de intensidad provoca el cierre de un contacto de alarma. Se utiliza una temporización de 5-10 s.

El interés del cálculo de la corriente de cortocircuito de los generadores reside en conocer los efectos mecánicos y térmicos de este estado de funcionamiento para prever los medios necesarios con el objetivo de que el generador soporte los citados efectos y para establecer una limitación temporal a la duración de los mismos. Tanto los efectos térmicos como los mecánicos son proporcionales



al cuadrado de la intensidad que los causa, esto quiere decir que crecen muy rápidamente con la intensidad de cortocircuito, y hay que prever métodos para limitar esta corriente y su duración, sobre todo en energía térmica en los diferentes componentes del generador dando lugar a un rápido pero progresivo aumento de temperatura, por lo que para su evaluación suele ser de más interés la corriente promedio eficaz durante el cortocircuito. Por el contrario, para la rotura de algún elemento constructivo por estar sometido a una carga mecánica mayor de la admisible bastan tiempos de actuación de dicha carga mecánica muy breves, lo que hace necesario conocer con precisión suficiente la evolución instantánea de las corrientes durante el cortocircuito y, especialmente, poder acotar sus valores máximos.



8. NORMALIZACIÓN

Para nuestro estudio hemos seguido la norma vigente EN 60034-4:2008 titulada "Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de ensayos".

Esta norma tiene por objeto establecer métodos para la determinación de las magnitudes características de las máquinas síncronas trifásicas a partir de los resultados de unos ensayos. No se pretende que esta norma se interprete como una exigencia para la ejecución sobre una máquina.

Los ensayos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas se deben efectuar con la máquina en perfecto estado, y con todos los aparatos de regulación automática desconectados. A menos que se especifique lo contrario, los ensayos se realizarán a la velocidad de giro asignada.

La norma nos fue conseguida a través de la plataforma de la biblioteca de la facultad, y se puede tener acceso a ella a través de TFG_00759_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII.



9. CONCLUSIONES

Hemos podido dilucidar que para este tipo de ensayos había que tener una precisión muy grande, ya que la corriente de excitación debía estar entre unos rangos determinados a la hora de realizar el cortocircuito. Esto supuso, que para la máquina de menor potencia los resultados obtenidos no fueran muy precisos.

En cambio, para la máquina de polos salientes, de mayor potencia, estos sí fueron más adecuados. Pudimos mejorar la precisión de estos con la medición de potencias activa y reactiva que nos permitía tener en cuenta los armónicos.

Para esta máquina los resultados en valores p.u. de las reactancias síncronas están dentro de los rangos que deben, y comprobando los valores de tensiones y corrientes en los diferentes cortocircuitos obtuvimos unas aproximaciones bastante buenas.

Durante la realización del TFG fuimos variando nuestros objetivos, por los diferentes problemas que nos surgían a la hora de realizar correctamente nuestros ensayos. En un principio, quisimos enfocarlo en hallar las reactancias síncronas para ambas máquinas y comparar resultados, pero nos encontramos con la traba de que los resultados para la máquina de rotor cilíndrico (de menor potencia) no tenían una validez adecuada, ya que como hemos dicho anteriormente la corriente de excitación no se mantenía constante dentro de cierto rango.

Por lo que le hemos prestado una mayor atención a la máquina de polos salientes, en la que los resultados obtenidos sí que fueron satisfactorios. En esta conseguimos mejorar además la precisión excitando mediante una dinamo que nos permitía mantener la corriente más constante y medir la potencia activa y reactiva, tal como aconseja la norma EN 60034-4:2008.

Podemos concluir de la máquina de polos salientes que los resultados para las corrientes de cortocircuito en las diferentes situaciones calculados a partir de las reactancias síncronas, son de gran precisión; esto no es así con la tensión que difiere más a la que veíamos en los ensayos. La posible causa de esto en nuestra opinión es también la corriente de excitación, ya que esta tiene una mayor incidencia en la tensión que en la corriente, y una pequeña divergencia sería más patente.

Podemos además decir que los resultados para la máquina de rotor cilíndrico tienen otro motivo para no ser tan exactos, y este es que la resistencia interna de la máquina tiene un valor considerable, y es algo que habíamos



despreciado a la hora de llevar a cabo nuestros cálculos. En el caso de la máquina de polos salientes la resistencia interna es bastante menor por lo que el haberla despreciado no nos condiciona tanto.

Valorando los procedimientos llevados a cabo para la obtención de las reactancias síncronas se puede decir que estos son bastante precisos para máquinas de una potencia significativa y sobre todo siguiendo la norma vigente (midiendo P y Q). Por otro lado, el hecho de tener que llevar la máquina a cortocircuito aunque sea sin sobrepasar los límites de excitación, es un tanto arriesgado para la integridad de la misma.



10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] EN 60034-4:2008 Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos. (Ratificado por AENOR en Octubre de 2011).
- [2] Máquinas síncronas ,Universidad de Cantabria, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta .
- [3] Elaboración propia.
- [4] Máquinas síncronas : Cortocircuitos, Universidad de Cantabria, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta.
- [5] Máquinas eléctricas, 5ª Edición, Editorial McGraw Hill, J. Fraile Mora.
- [6] Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial. Tesis doctoral. Moisés San Martín Ojeda.
- [7] Caracterización de la reactividad de la máquina síncrona, Univ. de Valladolid, J. Pablo Ossa Castaño.
- [8] Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas, Tomo IV, Máquinas síncronas y motores de c.a. de colector, Editores técnicos asociados, M. Cortés Cherta.
- [9] Apuntes de la asignatura "Líneas eléctricas de A.T." impartida en el 3º curso del grado.
- [10] Análisis de sistemas eléctricos de potencia, 2ª Edición, Editorial McGraw Hill, William D. Stevenson
- [11] Criterios generales de protección del sistema eléctrica peninsular español, elaborado por RED ELÉCTRICA (Noviembre 1995)
- [12] Protecciones en las instalaciones eléctricas. Evolución y perspectivas, 2ª Edición, Boixareu editores, Paulino Montañé.