



ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicas

SARA GARCÍA RÍOS



Tesis doctoral
2019

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

Sara García Ríos

Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicas

TESIS DOCTORAL

Dirigida por:

Dr. Luis Guasch Pesquer

Dr. Francisco González Molina

Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática, DEEEiA
Grupo de Automática y Electrónica Industrial, GAEI

Tarragona 2019



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

FAIG CONSTAR que aquest treball, titulat "Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos", que presenta Sara García Ríos per a l'obtenció del títol de Doctor, ha estat realitzat sota la meva direcció al Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica d'aquesta universitat.

HAGO CONSTAR que el presente trabajo, titulado "Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos", que presenta Sara García Ríos para la obtención del título de Doctor, ha sido realizado bajo mi dirección en el Departamento d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica de esta universidad.

I STATE that the present study, entitled "Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos", presented by Sara García Ríos for the award of the degree of Doctor, has been carried out under my supervision at the Department d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica of this university.

Tarragona, 04-06-2019 / Tarragona, 04-06-2019 / Tarragona, 04-06-2019

El/s director/s de la tesi doctoral
El/los director/es de la tesis doctoral
Doctoral Thesis Supervisor/s

Luis Guasch Pesquer

Francisco González Molina

Agradecimientos

En primer lugar, a mis codirectores de tesis, Luis Guasch Pesquer y Francisco González Molina, por su profesionalidad, dedicación y paciencia.

En segundo lugar, a las personas de la Universitat Rovira i Virgili que han contribuido al desarrollo de esta tesis. En concreto:

- Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
- Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica
- Grup d'Automàtica i Electrònica Industrial

Por último, pero no menos importante, a mis compañeros de Doctorado y técnicos del GAEL, y a mi familia y amigos por su apoyo.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

Resumen

Esta tesis analiza el efecto de los desequilibrios del sistema de tensión trifásico en máquinas de inducción y en transformadores trifásicos, mediante los factores VUF (*Voltage Unbalance Factor*), CUF (*Current Unbalance Factor*) y TRF (*Torque Ripple Factor*).

Se caracterizó un desequilibrio de tensión mediante cuatro parámetros: tipo de desequilibrio (q), componente directa de la tensión (V_1), VUF y ángulo del factor complejo de desequilibrio de tensión (θ_{CVUF}).

El análisis de esta perturbación en máquinas de inducción trifásicas se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase se tomaron los motores 1 y 2 de referencia, en los cuales se simuló su comportamiento frente a 13060 puntos de desequilibrio, y se calculó el efecto que provocaba cada punto en la corriente y el par. Se observó que los parámetros del desequilibrio de tensión q y θ_{CVUF} no tienen influencia en el CUF y el TRF . También se observó que existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto al VUF (para valores constantes de V_1) y que existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto a V_1 (para valores constantes de VUF). Pequeños desequilibrios de tensión pueden generar grandes desequilibrios de corriente y un fuerte rizado de par. En la segunda fase se ensayó el motor 3 en el laboratorio bajo 20 puntos de desequilibrio. Se calcularon los valores de CUF y TRF a partir de los registros de corrientes y par y se obtuvieron resultados muy cercanos a los obtenidos mediante la simulación de este motor en los puntos ensayados. Dichos resultados fueron cualitativamente iguales a los obtenidos para los motores 1 y 2 de la primera fase.

Para analizar el efecto de desequilibrios en transformadores trifásicos primero se definieron los 30 puntos de desequilibrio a los que se iba a someter el transformador. Posteriormente, se escogió el transformador que se iba a utilizar para cada simulación y el modelo matemático del mismo. Finalmente, mediante un algoritmo se trataron los datos obtenidos mediante simulaciones, y se analizaron los factores de desequilibrio. Se observó que los desequilibrios de tensión en el devanado primario provocan desequilibrios en las tensiones del secundario y en las corrientes del primario y del secundario. También se observó que existe una relación lineal entre el CUF y el TRF respecto al VUF (para valores constantes de V_1), y que existe una relación lineal entre el CUF y el TRF respecto a V_1 (para valores constantes de VUF).

Para las variables analizadas en este trabajo (tensión, corriente y par) de transformadores y máquinas de inducción trifásicos, se observó que un desequilibrio de tensión se puede caracterizar únicamente mediante el VUF y V_1 .

Por último, se desarrolló un nuevo método de estimación de parámetros del transformador monofásico. Se escogió un transformador, y el modelo matemático del mismo, que se representaba mediante el circuito equivalente Gamma. Para desarrollar el método de estimación de parámetros, primero se realizaron los ensayos de vacío y cortocircuito del transformador. Después, se realizaron 28 ensayos en carga del transformador, con diferentes índices y tipos de carga. Finalmente, se diseñó un algoritmo que estimaba los nuevos parámetros a

partir de la información recogida en todos los ensayos. Este algoritmo minimizaba dos errores: el error de pérdidas eléctricas de potencia y el error de caída de tensión en el devanado secundario del transformador. Se consiguieron estimar parámetros más precisos del circuito equivalente Gamma del transformador monofásico que los obtenidos con los ensayos de vacío y cortocircuito.

Listado de símbolos principales

C	Índice de carga
C_{Ha}	Efectos capacitivos entre el devanado de alta tensión y la cuba del transformador
C_{H1H2}	Efectos capacitivos entre los devanados de alta tensión en el transformador
C_{HaXa}	Efectos capacitivos entre el devanado de alta y el devanado de baja tensión en el transformador
<i>CCUF</i>	<i>Complex Current Unbalance Factor</i>
<i>CUF</i>	<i>Current Unbalance Factor</i>
<i>CVUF</i>	<i>Complex Voltage Unbalance Factor</i>
I_1	Componente directa de la corriente
I_2	Componente inversa de la corriente
I_N	Corriente nominal
J	Momento de inercia
<i>MMF</i>	Fuerza magnetomotriz
n	Velocidad del motor
p	Pares de polos
L_0	Inductancias de pérdidas por flujo de dispersión
L_{HaXa}	Inductancias de dispersión entre devanados del transformador
L_M	Inductancias de magnetización de las columnas del transformador
L_Y	Inductancias de magnetización de los yugos del transformador
\mathfrak{R}	Reluctancia
R_0	Resistencia de pérdidas en el núcleo del transformador
R_{cc}	Resistencia de cortocircuito
R_{Fe}	Resistencia asociada a las pérdidas en el núcleo del motor de inducción
R_H	Resistencia asociada a las pérdidas en el devanado de alta tensión del transformador
R_s	Resistencia de estator
R_r	Resistencia de rotor
R_X	Resistencia asociada a las pérdidas en el devanado de baja tensión del transformador
s	Deslizamiento
T_0	Valor medio del par
T_{pp}	Valor de par pico a pico
T_N	Par nominal
<i>TRF</i>	<i>Torque Ripple Factor</i>
<i>VUF</i>	<i>Voltage Unbalance Factor</i>
V_1	Componente directa de la tensión / Tensión en el devanado primario
V_2	Componente inversa de la tensión / Tensión en el devanado secundario
V_N	Tensión nominal
X_{cc}	Reactancia de cortocircuito
X_m	Reactancia de magnetización

X_{sd}	Reactancia de dispersión del estator
X_{rd}	Reactancia de dispersión del rotor
θ	Ángulo
Γ	Par motor
Φ	Flujo magnético
ω	Velocidad angular

Índice de Figuras

Fig. 1.1	Representación del valor pico a pico (T_{pp}) y el valor medio (T_0) de par	9
Fig. 2.1	Esquema de la máquina de inducción trifásica de jaula sencilla o rotor bobinado	11
Fig. 2.2	Circuito equivalente del modelo de jaula sencilla del motor de inducción trifásico	19
Fig. 2.3	Circuito equivalente con cinco parámetros constantes del modelo de jaula sencilla del motor de inducción	21
Fig. 3.1	Curvas características de par y corriente del motor para ensayos reales y simulaciones, para el conjunto de parámetros seleccionados.....	27
Fig. 3.2	Vista global del montaje de laboratorio utilizado en los ensayos. Los principales aparatos son: 1) fuente de tensión programable; 2) motor de inducción; 3) sensor de par; 4) generador de CC; 5) carga resistiva del generador de CC; 6) osciloscopio	29
Fig. 3.3	Evolución temporal de las tensiones, corrientes, par y velocidad cuando el motor 1 está sometido a un desequilibrio de tensión tipo T5 con un $VUF = 3,5 \%$ y $\theta_{CVUF} = 107,6^\circ$ y $V_1 = 1,06$ pu.....	31
Fig. 3.4	CUF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%, 1,0 \%, 1,5 \%, 2,0 \%, 2,5 \%, 3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 1	33
Fig. 3.5	CUF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%, 1,0 \%, 1,5 \%, 2,0 \%, 2,5 \%, 3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 2.....	34
Fig. 3.6	θ_{CCUF} respecto al tipo de desequilibrio para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2	35
Fig. 3.7	CUF respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2	36
Fig. 3.8	θ_{CCUF} respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2	36
Fig. 3.9	CUF respecto a VUF para los 4289 puntos de desequilibrio para cada valor de V_1 para los motores 1 y 2	37
Fig. 3.10	θ_{CCUF} respecto a VUF para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2	37
Fig. 3.11	CUF respecto a θ_{CVUF} para los 20197 puntos de desequilibrio con $VUF = 2,0 \%$ para los motores 1 y 2	38
Fig. 3.12	θ_{CCUF} respecto a θ_{CVUF} para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2	39
Fig. 3.13	TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%, 1,0 \%, 1,5 \%, 2,0 \%, 2,5 \%, 3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 1	40
Fig. 3.14	TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%, 1,0 \%, 1,5 \%, 2,0 \%, 2,5 \%, 3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 2.....	41

Fig. 3.15	<i>TRF</i> respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2 42	
Fig. 3.16	<i>TRF</i> respecto a <i>VUF</i> , para los 4289 puntos de desequilibrio, para cada valor de V_1 y los motores 1 y 2	43
Fig. 3.17	<i>TRF</i> respecto a θ_{CVUF} para los 20197 puntos de desequilibrio con $VUF = 2,0\%$ para los motores 1 y 2	43
Fig. 3.18	Evolución temporal de las corrientes de línea y del par cuando el motor 3 está sometido a un desequilibrio de tensión definido por un $VUF = 1,0\%$ y $V_1 = 1$ pu.....	44
Fig. 3.19	Influencia de V_1 en el <i>CUF</i> cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para ensayos experimentales y simulaciones.....	45
Fig. 3.20	Influencia del <i>VUF</i> en el <i>CUF</i> cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para ensayos experimentales y simulaciones	46
Fig. 3.21	Influencia de V_1 en el <i>TRF</i> cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de <i>VUF</i>	48
Fig. 3.22	Influencia de <i>VUF</i> en el <i>TRF</i> cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1	49
Fig. 3.23	Evolución del <i>CUF</i> en función del <i>VUF</i> para valores de V_1 de 0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu, para ensayos y simulaciones	52
Fig. 3.24	Evolución del <i>CUF</i> en función de V_1 para valores de <i>VUF</i> de 1, 2, 3, 4 y 5 %, para ensayos y simulaciones	53
Fig. 3.25	Evolución del <i>TRF</i> en función del <i>VUF</i> para valores de V_1 de 0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu, para ensayos y simulaciones	54
Fig. 3.26	Evolución del <i>TRF</i> en función de V_1 para valores de <i>VUF</i> de 1, 2, 3, 4 y 5 %, para ensayos y simulaciones	55
Fig. 4.1	Primer paso de transformación de un circuito aplicando el Teorema de la Dualidad	62
Fig. 4.2	Segundo paso de transformación de un circuito aplicando el Teorema de la Dualidad	62
Fig. 4.3	Distribución del núcleo y de los devanados del transformador.....	64
Fig. 4.4	Circuito magnético equivalente de Hopkinson	64
Fig. 4.5	Circuito equivalente transformado mediante la Teoría de la Dualidad	65
Fig. 4.6	Circuito equivalente eléctrico del transformador	65
Fig. 4.7	Capacidades de acoplamiento del transformador	66
Fig. 4.8	Fuente de alimentación utilizada en las simulaciones.....	71
Fig. 4.9	Esquema del circuito utilizado en las simulaciones de desequilibrios	72
Fig. 4.10	Diagrama de bloques del algoritmo utilizado para el tratamiento de datos obtenidos a partir de las simulaciones.....	73

Fig. 4.11 Tensiones y corrientes en el devanado primario del transformador cuando se encuentra sometido a un desequilibrio con $VUF = 1 \%$, $V_1 = 1$ pu y $C = 1$	74
Fig. 4.12 Tensiones y corrientes en el devanado secundario del transformador cuando se encuentra sometido a un desequilibrio con $VUF = 1 \%$, $V_1 = 1$ pu y $C = 1$	74
Fig. 4.13 Influencia del VUF_p en el VUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	75
Fig. 4.14 Influencia de V_1 en el VUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	75
Fig. 4.15 Influencia del VUF_p en el CUF_p cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	76
Fig. 4.16 Influencia del VUF_p en el CUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	76
Fig. 4.17 Influencia de V_1 en el CUF_p cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	77
Fig. 4.18 Influencia de V_1 en el CUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$	77
Fig. 5.1 Circuito equivalente del modelo de transformador utilizado	79
Fig. 5.2 Transformador monofásico	80
Fig. 5.3 Diagrama de flujo del algoritmo I de estimación de parámetros utilizado en el transformador monofásico	86
Fig. 5.4 Pérdidas eléctricas de potencia y caída de tensión en el transformador en cada ensayo, calculada a partir de los parámetros iniciales y de los parámetros finales	87
Fig. 8.1 Circuito equivalente con cinco parámetros constantes del modelo de jaula sencilla del motor de inducción de componentes directa e inversa	98

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Fasores para los ocho tipos de desequilibrios de tensión	6
Tabla 2.1 Relación entre las ecuaciones de la máquina de un par de polos y de la de p pares de polos	22
Tabla 3.1 Parámetros del motor 1	25
Tabla 3.2 Parámetros del motor 2	25
Tabla 3.3 Parámetros del motor 3	26
Tabla 3.4 Error de CUF (%) entre resultados de simulación y de laboratorio para los veinte puntos de funcionamiento	46
Tabla 3.5 Pendiente de las rectas de CUF vs VUF para cada valor de V_1 , obtenidas a partir de los datos experimentales.....	47
Tabla 3.6 Pendiente de las rectas de CUF vs V_1 para cada valor de VUF , obtenidas a partir de los datos experimentales.....	47
Tabla 3.7 Error de TRF (%) entre resultados de simulación y de laboratorio para los veinte puntos de funcionamiento	48
Tabla 3.8 Pendiente de las rectas de TRF vs. VUF para cada valor de V_1 , obtenidas a partir de los datos experimentales.....	49
Tabla 3.9 Pendiente de las rectas de TRF vs. V_1 para cada valor de VUF , obtenidas a partir de los datos experimentales.....	49
Tabla 3.10 Pendiente de las rectas $CUF-V_1$ y $TRF-V_1$, para valores constantes de VUF , y pendiente de las rectas $CUF-VUF$, y $TRF-VUF$ para valores constantes de V_1	51
Tabla 4.1 Importancia de parámetros y efectos para diferentes modelos de transformador	58
Tabla 4.2 Pares duales de elementos	61
Tabla 4.3 Parámetros constantes del circuito equivalente del transformador utilizado.....	68
Tabla 4.4 Parámetros lineales del circuito equivalente del transformador utilizado.....	68
Tabla 4.5 Curva no lineal de magnetización de L_{M1}, L_{M2} y L_{M3}	69
Tabla 4.6 Curva de magnetización de L_{Y12} y L_{Y23}	70
Tabla 5.1 Características del transformador monofásico	80
Tabla 5.2 Valores de consigna para el ensayo de carga del transformador monofásico ...	81
Tabla 5.3 Valores iniciales y finales de R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} del transformador monofásico	87
Tabla 8.1 Valores de CUF obtenidos de diferentes maneras: CUF_e , mediante ensayos de laboratorio, CUF_s , mediante simulaciones, CUF_{tp} , mediante el modelo de régimen permanente, para cada valor de V_{1F} y de VUF	99

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

INDICE

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos de la tesis	3
1.3	Estructura de la tesis	3
1.4	Introducción.....	4
1.5	Caracterización de los desequilibrios de tensión	5
1.5.1	Tipos de desequilibrios de tensión	5
1.5.2	Componente directa de un sistema de tensiones trifásico	5
1.5.3	Factor de desequilibrio de tensión complejo	7
1.6	Medición de los efectos de los desequilibrios de tensión.....	7
1.6.1	Factor de desequilibrio de corriente complejo	7
1.6.2	Factor de rizado de par.....	8
2	Modelo de la máquina de inducción trifásica	10
2.1	Introducción.....	10
2.2	Modelo matemático en régimen transitorio	10
2.2.1	Transformación de ecuaciones de la máquina de inducción trifásica	14
2.2.2	Ecuaciones transformadas de Ku	15
2.3	Modelo matemático en régimen permanente	19
2.3.1	Par electromagnético	21
2.3.2	Ecuaciones de la máquina de inducción con p pares de polos	22
3	Efectos de los desequilibrios en el motor de inducción trifásico.....	23
3.1	Introducción.....	23
3.2	Metodología.....	23
3.2.1	Puntos de desequilibrio	24
3.2.2	Motores seleccionados	25
3.2.3	Estructura de simulaciones y metodología.....	27
3.2.4	Montaje de laboratorio y metodología	28
3.3	Resultados obtenidos en la Fase I	29
3.3.1	Respuesta temporal de corrientes y par	29
3.3.2	Influencia de los parámetros de los desequilibrios en la corriente ...	31
3.3.3	Influencia de los parámetros de los desequilibrios en el par	39

3.4	Resultados obtenidos en la Fase II.....	44
3.4.1	Respuesta temporal de corrientes y par	44
3.4.2	Influencia de V_1 y VUF en el CUF	45
3.4.3	Influencia de los parámetros de los desequilibrios en el par	47
3.5	Análisis de los resultados.....	49
3.5.1	Parámetros significativos del desequilibrio.....	50
3.5.2	Efecto en la corriente	50
3.5.3	Efecto en el par.....	50
3.5.4	Severidad de V_1 y VUF en los efectos	50
3.5.5	Comparación de resultados experimentales y simulados	51
3.6	Conclusiones.....	56
4	Efectos de los desequilibrios en el transformador trifásico	57
4.1	Introducción.....	57
4.2	Modelos matemáticos del transformador	57
4.3	Modelo matemático utilizado	60
4.3.1	Teorema de la Dualidad	60
4.3.2	Descripción del núcleo y de los devanados	62
4.3.3	Circuito magnético equivalente de Hopkinson.....	63
4.3.4	Derivación dual del circuito equivalente	64
4.4	Metodología.....	67
4.4.1	Puntos de desequilibrio	67
4.4.2	Transformador seleccionado	67
4.4.3	Programa de simulación	70
4.4.4	Estructura de simulaciones y metodología.....	71
4.4.5	Algoritmo de tratamiento de datos	72
4.5	Resultados obtenidos	73
4.5.1	Respuesta temporal de tensiones y corrientes	73
4.5.2	Influencia de los parámetros de los desequilibrios en las tensiones	74
4.5.3	Influencia de los parámetros de los desequilibrios en las corrientes	75
4.6	Conclusiones.....	77
5	Estimación de parámetros del transformador monofásico.....	79
5.1	Introducción.....	79
5.2	Transformador	79

5.3	Metodología	80
5.3.1	Diseño de los ensayos	81
5.3.2	Procedimiento de estimación de los parámetros finales	81
5.4	Resultados	84
5.4.1	Parámetros estimados	84
5.4.2	Mejora en el cálculo de las pérdidas eléctricas	84
5.4.3	Mejora en el cálculo de la caída de tensión	87
5.5	Conclusiones	88
6	Conclusiones	89
6.1	Aportaciones	89
6.1.1	Desequilibrios de tensión	89
6.1.2	Efectos de los desequilibrios en el motor de inducción trifásico	89
6.1.3	Efectos de los desequilibrios en el transformador trifásico	89
6.1.4	Estimación de parámetros del transformador monofásico	90
6.2	Futuras líneas de investigación	90
7	Bibliografía	92
8	Anexos	97
8.1	Anexo I: cálculo del <i>CUF</i> a partir del modelo de régimen permanente de la máquina de inducción trifásica	97

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

ANÁLISIS DE DESEQUILIBRIOS EN TRANSFORMADORES Y MÁQUINAS DE INDUCCIÓN TRIFÁSICAS

Sara García Ríos

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La calidad de la energía es un tema de estudio en auge en la actualidad [1], [2]. Las principales razones son:

- Los equipos, los procesos productivos y las empresas se han hecho menos tolerantes a perturbaciones
- Los equipos (de baja y alta potencia) producen más perturbaciones de corriente que antes
- La regularización (liberalización, privatización) de la industria de la electricidad ha dado lugar al desarrollo de indicadores de calidad
- Algunas fuentes de energía renovables, presentes cada vez en mayor volumen en la red eléctrica, provocan perturbaciones

Según la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), en la norma IEC 61000-4-30 [3], se define la calidad de la energía eléctrica como: “características de la electricidad en un punto dado del sistema eléctrico, evaluadas respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) [4] la define como: “el concepto de alimentar y aislar equipo sensible de manera que sea apropiado para la operación de ese equipo”. Según [5], la calidad de la energía eléctrica se puede definir como una combinación entre calidad de la tensión y calidad de la corriente. La tensión ideal se define como una onda sinusoidal de amplitud y frecuencias constantes, las cuales son iguales a su valor nominal. La misma definición se aplica para la corriente ideal. El cambio del valor de alguno de estos parámetros se conoce como perturbación en la calidad de la energía. Mientras que las perturbaciones de tensión se originan en la red y afectan a los consumidores, las perturbaciones de corriente se originan en las cargas de los consumidores y afectan a la red de distribución [6], [7].

Según la IEEE 1159-2009 [4], los principales tipos de perturbaciones son:

- Armónico: componente sinusoidal de una onda periódica, que presenta una frecuencia que es múltiplo entero de la onda fundamental.
- Desequilibrio de tensión: desviación máxima entre las tres fases respecto a la tensión trifásica media dividida por la tensión trifásica media. La relación entre la componente directa de la tensión y la componente inversa de la tensión, generalmente expresada como un porcentaje.
- Flicker: impresión de la inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa con el tiempo.
- Hueco de tensión: disminución de entre 0,1 y 0,9 pu en el valor eficaz de la tensión o la corriente a la frecuencia de alimentación durante duraciones de 0,5 ciclos a 1 minuto. Los valores típicos son 0,1 a 0,9 pu.

- Impulso: cambio repentino de la frecuencia sin potencia en la condición de tensión o corriente en estado estable que tiene polaridad unidireccional (principalmente positiva o negativa).
- Interrupción: pérdida absoluta de la tensión durante un tiempo determinado. En función de la duración se pueden clasificar en: instantánea (entre 0,5 y 30 ciclos), momentánea (entre 30 ciclos y 2 s), temporal (entre 2 s y 2 min) y sostenida (mayor de 2 min).
- Notch: Una perturbación de conmutación (u otra) de la forma de onda de tensión de potencia normal, que dura menos de 0,5 ciclos, que inicialmente es de polaridad opuesta a la forma de onda y, por lo tanto, se resta de la forma de onda normal en términos del valor máximo del voltaje de perturbación. Esto incluye la pérdida completa de voltaje para hasta 0.5 ciclos.
- Sobretenión: tensión medida que tiene un valor mayor que la tensión nominal por un período de tiempo mayor a 1 min. Los valores típicos son 1,1-1,2 pu.
- Subtensión: tensión medida que tiene un valor menor que la tensión nominal durante un período de tiempo superior a 1 min. Los valores típicos son 0,8-0,9 pu.
- Swell: incremento en la tensión o corriente eficaz a la frecuencia nominal para duraciones entre 0,5 ciclos y 1 min. Los valores típicos son 1,1-1,8 pu.

En esta tesis se estudia el efecto de un tipo de perturbaciones de tensión, los desequilibrios, en los motores de inducción trifásicos y en los transformadores trifásicos.

Los motores de inducción y los transformadores trifásicos son máquinas eléctricas muy utilizadas en la actualidad. Los motores de inducción se encuentran, sobre todo, en procesos productivos en la industria, y su buen funcionamiento es clave para mantener las condiciones de calidad en los productos fabricados. Para poder estudiar el funcionamiento de los motores bajo diferentes condiciones, el desarrollo de modelos y la estimación de parámetros que simulen su funcionamiento es importante [8], [9].

Las perturbaciones en la tensión de suministro afectan al funcionamiento de los motores de inducción trifásicos: producen desequilibrios en las corrientes, afectan al par, y producen vibraciones y calentamiento del motor [10]–[14]. El estudio del comportamiento del motor de inducción frente a diferentes perturbaciones permite prevenir posibles fallos e interrupciones de los procesos productivos [15], [16]. En esta tesis, se analizarán los efectos de los desequilibrios de tensión en la corriente y el par de los motores de inducción trifásicos.

Sin los transformadores, la distribución eficiente de la energía eléctrica no sería posible. A pesar de haberse creado configuraciones de red más complejas, con el despliegue de las *smart grids* o redes inteligentes, el diseño de transformadores no ha cambiado fundamentalmente para hacer frente a estos cambios en la red [17], [18]. Los transformadores también sufren las perturbaciones de la red, las cuales alteran su funcionamiento. En esta tesis, se analizarán los efectos de los desequilibrios de tensión en transformadores trifásicos y se explicará un nuevo método de estimación de parámetros en transformadores monofásicos.

Así mismo, se observará la transmisión de las perturbaciones entre los devanados primario y secundario del transformador.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

El primer objetivo de la tesis es analizar los efectos que producen los desequilibrios de tensión en la corriente y el par de los motores de inducción trifásicos y en la corriente de los transformadores trifásicos.

Para la consecución de este primer objetivo, y en ambas máquinas, se ha realizado un estudio teórico donde se han caracterizado los desequilibrios de tensión; se han definido los modelos matemáticos utilizados para los motores de inducción trifásicos y los transformadores trifásicos; se han definido un conjunto de puntos de desequilibrio significativos y finalmente se ha simulado el comportamiento de ambas máquinas en los puntos seleccionados.

En el caso de los motores de inducción trifásicos, se realizaron también ensayos en el laboratorio para un conjunto de 20 puntos de desequilibrio. Se replicaron los ensayos en el laboratorio mediante el correspondiente estudio teórico, para corroborar la validez de las caracterizaciones y modelos adoptados en dicho estudio.

El segundo objetivo de la tesis es mejorar la estimación de los cuatro parámetros del circuito equivalente Gamma del modelo de transformador monofásico mediante un método nuevo basado en ensayos en carga, respecto a los resultados de los típicos ensayos de vacío y cortocircuito [19].

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo se estructura de la siguiente forma:

- **Capítulo 2:** este capítulo está dedicado a los desequilibrios de tensión: definición; clasificación según [20]; cuantificación mediante el factor de desequilibrio de tensión complejo; medición de los efectos producidos en la corriente y el par.
- **Capítulo 3:** Se presenta el modelo de la máquina de inducción de jaula sencilla utilizado siguiendo la transformación de Ku, en régimen dinámico y permanente.
- **Capítulo 4:** Se estudian los efectos de los desequilibrios de tensión en motores de inducción trifásicos. Primero se realiza un estudio teórico en el que dos motores de inducción trifásicos son sometidos a 13060 puntos de desequilibrio, analizando el efecto de éstos en la corriente y el par mecánico mediante un algoritmo desarrollado mediante Matlab®. En una segunda fase, un tercer motor de inducción trifásico, es sometido en el laboratorio a un total de 20 puntos de desequilibrio, midiendo la corriente y el par, para calcular el efecto en la corriente y el par mecánico.

Este sistema real, es replicado de forma teórica, y se analizan los resultados obtenidos mediante ensayos y simulaciones.

- **Capítulo 5:** Se estudian los efectos de los desequilibrios de tensión en transformadores trifásicos. Primero se explican los tipos de modelos matemáticos que existen. Después se explica el modelo matemático utilizado para este estudio, y su circuito equivalente correspondiente. A continuación, se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio, describiendo los puntos de desequilibrio, las características del transformador sobre el que se ha llevado a cabo el estudio, y la metodología de simulación. Finalmente se presentan los resultados obtenidos, la respuesta temporal y la influencia de los parámetros de desequilibrio en las tensiones y corrientes de cada devanado del transformador.
- **Capítulo 6:** Se describe un nuevo método de estimación de los cuatro parámetros del circuito equivalente en Gamma del transformador monofásico, a partir de ensayos en el laboratorio. Una vez definidos el transformador utilizado, junto con el circuito equivalente del modelo matemático seleccionado, se definen los criterios seguidos para seleccionar los 28 puntos de ensayo realizados, y el algoritmo matemático diseñado para la estimación de parámetros desarrollado mediante Matlab®. Finalmente, se presentan como resultados los nuevos parámetros estimados, así como las mejoras de cálculo de las pérdidas eléctricas y de la caída de tensión con los nuevos parámetros, respecto a los obtenidos mediante los ensayos de vacío y cortocircuito.
- **Capítulo 7:** Se describen las aportaciones de la tesis y las futuras líneas de investigación. Desequilibrios de tensión

1.4 INTRODUCCIÓN

En sistemas de potencia trifásicos las tensiones generadas en cada fase tienen la misma amplitud, la misma frecuencia, la misma forma de onda (generalmente sinusoidal) y están desfasadas 120° entre sí. Sin embargo, en el punto de conexión de una carga, o en cualquier punto del sistema de potencia, estas tensiones pueden estar desequilibradas por no cumplir alguna de las cuatro condiciones anteriores.

Los desequilibrios de tensión se suelen originar por una distribución desigual de cargas monofásicas, a cargas monofásicas de elevada potencia, desequilibrios por avería o falta de mantenimiento en cargas trifásicas y/o en sistemas eléctricos rurales, donde existen largas líneas de distribución [21], [22].

Otras causas adicionales de desequilibrios de tensión pueden ser impedancias asimétricas en las bobinas de los transformadores, impedancias de transmisión asimétricas que se pueden originar por una transposición incompleta de líneas de transporte, y fusibles fundidos en bancos de condensadores trifásicos [23], [24].

1.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN

1.5.1 Tipos de desequilibrios de tensión

De acuerdo con [20], los desequilibrios de tensión se clasifican en 8 tipos: 1: subtensión en una fase (1Φ -UV) (UV: under-voltage); 2: subtensión en dos fases (2Φ -UV); 3: subtensión en tres fases (3Φ -UV); 4: sobretensión en una fase (1Φ -OV), (OV: over-voltage); 5: sobretensión en dos fases (2Φ -OV); 6: sobretensión en tres fases (3Φ -OV); 7: desplazamiento desigual de ángulo en una fase (1Φ -A); 8: desplazamiento desigual de ángulo en dos fases (2Φ -A).

En la Tabla 1.1 se muestran los tipos de desequilibrios, los fasores, y su evolución temporal, donde cada círculo representa 1 pu para el módulo de la tensión.

Las expresiones matemáticas de las tensiones durante una situación de desequilibrio se pueden encontrar en (2.1).

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2} V_a \sin(\omega t + 0 + \alpha_a) \\ v_b &= \sqrt{2} V_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha_b\right) \\ v_c &= \sqrt{2} V_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha_c\right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), V_k y α_k son el módulo y el ángulo, respectivamente, del desfase de tensión en la fase k ($k=\{a, b, c\}$).

En este trabajo se utilizará el tipo de desequilibrio (q), como uno de los parámetros que definen un sistema de tensiones desequilibrado. Este parámetro puede adoptar los valores definidos en (2.2).

1.5.2 Componente directa de un sistema de tensiones trifásico

Un sistema de tensiones trifásico desequilibrado puede ser descompuesto en tres sistemas trifásicos equilibrados de componentes: homopolar (V_0), directa (V_1) e inversa (V_2).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$q = \{\mathbf{T1}, \mathbf{T2}, \mathbf{T3}, \mathbf{T4}, \mathbf{T5}, \mathbf{T6}, \mathbf{T7}, \mathbf{T8}\} \quad (2.2)$$

Tabla 1.1 Fasores para los ocho tipos de desequilibrios de tensión

Tipo de desequilibrio (q)	Fasores	Evolución temporal
T1: 1 Φ -UV		
T2: 2 Φ -UV		
T3: 3 Φ -UV		
T4: 1 Φ -OV		
T5: 2 Φ -OV		
T6: 3 Φ -OV		
T7: 1 Φ -A		
T8: 2 Φ -A		

Donde V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} son las tres tensiones de línea del sistema desequilibrado y a es un operador complejo definido en (2.4).

$$a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.4)$$

Como en otros trabajos anteriores que analiza el efecto de los desequilibrios [25], en esta tesis se utilizará también la componente directa de la tensión (V_1) como uno de los parámetros que definen un sistema de tensiones trifásico desequilibrado.

1.5.3 Factor de desequilibrio de tensión complejo

El $CVUF$ fue definido por Wang [20], y utilizado en otros trabajos [15], [26]–[28]. La expresión mostrada en (2.5) se define como la relación entre los fasores V_2 y V_1 (las componentes de secuencia inversa y directa de la tensión). En otros casos, otros factores o procedimientos son utilizados para medir el nivel de desequilibrio de tensión, por ejemplo, en [29] se describe un evaluador gráfico.

$$CVUF (\%) = \frac{V_2}{V_1} 100 = \frac{V_2 (\cos \theta_{V_2} + j \sin \theta_{V_2})}{V_1 (\cos \theta_{V_1} + j \sin \theta_{V_1})} 100 \quad (2.5)$$

VUF es el módulo del $CVUF$ y se utiliza en diferentes normas (IEC, GCOI/GCPS, CENELEC, NRS-048 y ANSI) [30], para definir el límite de desequilibrio de tensión en la alimentación trifásica. Este índice se puede encontrar en (2.6):

$$VUF (\%) = |CVUF (\%)| = \frac{|V_2|}{|V_1|} 100 = \frac{V_2}{V_1} 100 \quad (2.6)$$

El $CVUF$ queda definido por su módulo (VUF) y su ángulo (θ_{CVUF}) en (2.7):

$$CVUF = VUF (\cos \theta_{CVUF} + j \sin \theta_{CVUF}) \quad (2.7)$$

Donde θ_{CVUF} queda definido en (2.8) como:

$$\theta_{CVUF} = \theta_{V_2} - \theta_{V_1} \quad (2.8)$$

Junto con el tipo de desequilibrio (q) y el valor de la componente directa (V_1), se utilizarán VUF y θ_{CVUF} como los cuatro parámetros que caracterizan un sistema de tensiones desequilibrado.

1.6 MEDICIÓN DE LOS EFECTOS DE LOS DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN

1.6.1 Factor de desequilibrio de corriente complejo

Un sistema de corrientes trifásico desequilibrado puede ser descompuesto en tres sistemas trifásicos equilibrados de componentes: homopolar (I_0), directa (I_1) e inversa (I_2).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{AB} \\ I_{BC} \\ I_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Donde I_{AB} , I_{BC} y I_{CA} son las tres corrientes de línea del sistema desequilibrado y a es un operador complejo definido en (2.4).

Para analizar el efecto de un desequilibrio de tensión en la corriente, se utiliza el **CCUF** (2.10). Este factor se incrementa cuando lo hace el desequilibrio entre las tres fases de la intensidad trifásica, y es cero si no se observa ningún desequilibrio en dichas corrientes.

$$\mathbf{CCUF} (\%) = \frac{I_2}{I_1} 100 = \frac{I_2 (\cos \theta_{I_2} + j \sin \theta_{I_2})}{I_1 (\cos \theta_{I_1} + j \sin \theta_{I_1})} 100 \quad (2.10)$$

El **CCUF** se representa mediante su módulo (CUF) (2.11) y su ángulo (θ_{CCUF}) (2.12).

$$CUF = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.11)$$

$$\theta_{CCUF} = \theta_{I_2} - \theta_{I_1} \quad (2.12)$$

En capítulos posteriores se analizará el efecto de cada uno de los parámetros que definen un sistema de tensión trifásico desequilibrado, en los factores CUF y θ_{CCUF} (2.13).

$$\begin{aligned} CUF (q, V_1, VUF, \theta_{CVUF}) \\ \theta_{CCUF} (q, V_1, VUF, \theta_{CVUF}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

1.6.2 Factor de rizado de par

Para analizar el efecto de un desequilibrio de tensión en el par de los motores de inducción trifásicos, se utiliza el **TRF** (2.14). Este factor es nulo cuando no existe desequilibrio, y aumenta a medida que se hace más significativo el desequilibrio.

$$TRF (\%) = \frac{T_{PP}}{T_0} 100 \quad (2.14)$$

T_{pp} y T_0 son el valor de par pico a pico y el valor medio de par, respectivamente (Fig. 1.1).

En capítulos posteriores se analizará el efecto de cada uno de los parámetros que definen un sistema de tensión trifásico desequilibrado, en el factor **TRF** (2.15).

$$TRF (q, V_1, VUF, \theta_{CVUF}) \quad (2.15)$$

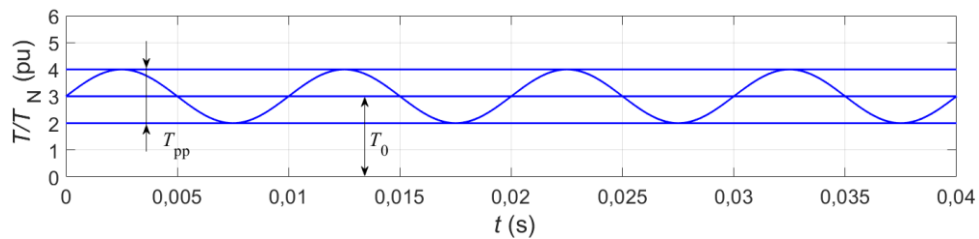


Fig. 1.1 Representación del valor pico a pico (T_{pp}) y el valor medio (T_0) de par

2 MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN TRIFÁSICA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el modelo de jaula sencilla de la máquina de inducción utilizado para determinar su comportamiento cuando se producen desequilibrios de tensión. Primero se explica el modelo en régimen transitorio, y después el modelo en régimen permanente.

2.2 MODELO MATEMÁTICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Se ha escogido un modelo matemático del motor de inducción trifásico que, para su simplificación, parte de las hipótesis siguientes:

- Estátor y rotor lisos (entrehierro constante)
- Máquina simétrica (bobinas del estátor iguales entre sí y bobinas del rotor iguales entre sí).
- Comportamiento magnético del entrehierro lineal (no se consideran los efectos de saturación e histéresis típico de los materiales ferromagnéticos).
- Permeabilidad magnética del entrehierro elevada (reluctancia magnética despreciable frente a la del entrehierro).
- Distribución sinusoidal del campo magnético en el entrehierro.

Las ecuaciones que se utilizan están referidas a uno de los devanados, en este caso, al devanado del estátor. Para ello se multiplican las ecuaciones tensión-corriente de dichos devanados por la relación de espiras entre el devanado del estátor y el devanado del rotor.

La Fig. 2.1 representa una máquina de inducción trifásica de jaula sencilla o de rotor bobinado en cortocircuito, cuyo comportamiento viene determinado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 v_{sa} &= r_s \cdot i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} ; v_{sb} = r_s \cdot i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} ; v_{sc} = r_s \cdot i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \\
 v_{ra} &= r_r \cdot i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} ; v_{rb} = r_r \cdot i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} ; v_{rc} = r_r \cdot i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Estas ecuaciones se pueden escribir de forma matricial como:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d\boldsymbol{\phi}}{dt} ; \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_s \\ \boldsymbol{\phi}_r \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

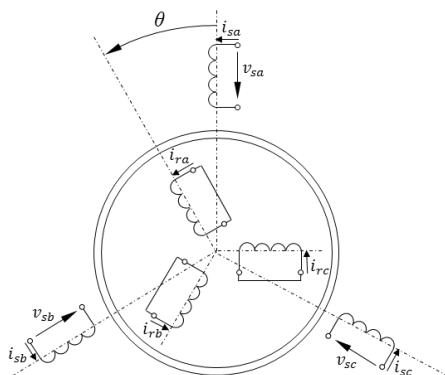


Fig. 2.1 Esquema de la máquina de inducción trifásica de jaula sencilla o rotor bobinado

Donde:

$$\mathbf{v}_s^t = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}] ; \mathbf{v}_r^t = [v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc}] \quad (3.3)$$

$$\mathbf{v}_s^t = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}] ; \mathbf{v}_r^t = [v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc}] \quad (3.4)$$

$$\mathbf{i}_s^t = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}] ; \mathbf{i}_r^t = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}] \quad (3.5)$$

$$\Phi_s^t = [\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}] ; \Phi_r^t = [\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}] \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} ; \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La matriz de acoplamientos, $\mathbf{M}(\theta)$, relaciona los flujos y las intensidades de la siguiente manera:

$$\Phi = \mathbf{M}(\theta) \cdot \mathbf{i} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss}(\theta) & \mathbf{M}_{sr}(\theta) \\ \mathbf{M}_{rs}(\theta) & \mathbf{M}_{rr}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Esta matriz de acoplamiento está formada por cuatro matrices, $\mathbf{M}_{ss}(\theta)$, que es la matriz de acoplamiento entre las bobinas del estator, $\mathbf{M}_{rr}(\theta)$, $\mathbf{M}_{sr}(\theta)$, matriz de acoplamiento entre las bobinas del rotor y $\mathbf{M}_{rs}(\theta)$, matriz de acoplamiento entre las bobinas del estator y del rotor, cuyas expresiones son:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{ss}(\theta) &= \begin{bmatrix} l_s & m_s \cdot \cos \frac{2\pi}{3} & m_s \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} \\ m_s \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} & l_s & m_s \cdot \cos \frac{2\pi}{3} \\ m_s \cdot \cos \frac{2\pi}{3} & m_s \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} & l_s \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} l_s & \frac{-m_s}{2} & \frac{-m_s}{2} \\ \frac{-m_s}{2} & l_s & \frac{-m_s}{2} \\ \frac{-m_s}{2} & \frac{-m_s}{2} & l_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{rr}(\theta) &= \begin{bmatrix} l_r & m_r \cdot \cos \frac{2\pi}{3} & m_r \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} \\ m_r \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} & l_r & m_r \cdot \cos \frac{2\pi}{3} \\ m_r \cdot \cos \frac{2\pi}{3} & m_r \cdot \cos \frac{-2\pi}{3} & l_r \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} l_r & \frac{-m_r}{2} & \frac{-m_r}{2} \\ \frac{-m_r}{2} & l_r & \frac{-m_r}{2} \\ \frac{-m_r}{2} & \frac{-m_r}{2} & l_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{sr}(\theta) &= [\mathbf{M}_{rs}(\theta)]^t = \\ &= \begin{bmatrix} m \cdot \cos \theta & m \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & m \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & m \cdot \cos \theta & m \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ m \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & m \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & m \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Las matrices $\mathbf{M}_{ss}(\theta)$ y $\mathbf{M}_{rr}(\theta)$ son constantes mientras que la matriz $\mathbf{M}_{sr}(\theta)$ depende de θ .

Al sustituir la matriz de acoplamientos en la ecuación (3.2) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d}{dt} \{ \mathbf{M}(\theta) \cdot \mathbf{i} \} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d\mathbf{M}(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{M}(\theta) \cdot \frac{d\mathbf{i}}{dt} = \\ &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \omega \cdot \frac{d\mathbf{M}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{M}(\theta) \cdot \frac{d\mathbf{i}}{dt} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Donde:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.14)$$

El par electromagnético se calcula a través de la energía o la coenergía:

$$\Gamma(t) = - \left. \frac{\partial W_{\text{mag}}([\Phi], \theta)}{\partial \theta} \right|_{[\Phi]=\text{cte}} = \left. \frac{\partial W'_{\text{mag}}([\mathbf{i}], \theta)}{\partial \theta} \right|_{[\mathbf{i}]=\text{cte}} \quad (3.15)$$

$$\Gamma(t) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{i}]^t \cdot \mathbf{M}(\theta) \cdot \mathbf{i} \right\} = \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{i}]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{i} \quad (3.16)$$

Como $\mathbf{M}_{ss}(\theta)$ y $\mathbf{M}_{rr}(\theta)$ no dependen de θ :

$$\Gamma(t) = \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{i}_r + \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{i}_r]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{rs}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{i}_s \quad (3.17)$$

Además $\mathbf{M}_{sr}(\theta) = [\mathbf{M}_{rs}(\theta)]^t$. Por tanto:

$$\Gamma(t) = [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{i}_r \quad (3.18)$$

De aquí se obtiene la ecuación que relaciona el par acelerador con la aceleración angular:

$$\Gamma - \Gamma_{\text{res}} = (J + J_{\text{res}}) \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

Se obtiene, por tanto, el modelo matemático del motor de inducción, definido por las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.19), que forman un sistema compuesto por 6 ecuaciones eléctricas y 2 ecuaciones mecánicas.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \omega \cdot \frac{d\mathbf{M}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{M}(\theta) \cdot \frac{d\mathbf{i}}{dt} \\ \Gamma - \Gamma_{\text{res}} &= \mathbf{J} \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ \omega &= \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

2.2.1 Transformación de ecuaciones de la máquina de inducción trifásica

Para determinar el comportamiento de la máquina de inducción basta con resolver el sistema de ecuaciones diferenciales (3.20). Este cálculo no es sencillo y requiere tiempo, ya que la matriz de acoplamientos $\mathbf{M}(\theta)$ no es constante en el tiempo, aun suponiendo que la velocidad mecánica es constante y que el circuito magnético tiene un comportamiento lineal.

Por ello, se convierten las ecuaciones anteriores en un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes mediante una transformación, donde se utilizan dos ángulos arbitrarios, denominados Ψ_s y Ψ_r , que sirven para transformar las ecuaciones del estátor y del rotor respectivamente.

$$\mathbf{T}_c(\Psi_s, \Psi_r) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}(\Psi_s) & 0 \\ 0 & \mathbf{T}(\Psi_r) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Además, para que estos ángulos arbitrarios no dependan de la posición del rotor, θ , cumplen la siguiente condición:

$$\Psi_s = \theta + \Psi_r \quad (3.22)$$

Por lo cual,

$$\Psi_r = \Psi_s - \theta = \Psi - \theta \quad (3.23)$$

$$\mathbf{T}_c(\Psi, \theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}(\Psi) & 0 \\ 0 & \mathbf{T}(\Psi - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Además, se cumple:

$$\mathbf{T}_c^{-1}(\Psi, \theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{-1}(\Psi) & 0 \\ 0 & \mathbf{T}^{-1}(\Psi - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Se debe establecer una referencia para determinar el ángulo Ψ . Las más utilizadas son:

- Referencia fija al estátor: $\Psi = 0$
- Referencia fija al rotor: $\Psi - \theta = 0 \Rightarrow \Psi = \theta$
- Referencia en sincronismo o fija al campo: $\Psi = \omega_s \cdot t$; $\Psi = \int \omega_s(t) \cdot dt$

Donde ω_s es la pulsación de las tensiones del estátor.

2.2.2 Ecuaciones transformadas de Ku

La transformación de Ku es una de las transformaciones más utilizadas. Este método incorpora la transformación de Fortescue o de componentes simétricas, que sirve para diagonalizar matrices circulantes.

La transformación de Ku se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{K}(\Psi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{-j\Psi} & a \cdot e^{-j\Psi} & a^2 \cdot e^{-j\Psi} \\ e^{j\Psi} & a^2 \cdot e^{j\Psi} & a \cdot e^{j\Psi} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{K}^{-1}(\Psi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & e^{j\Psi} & e^{-j\Psi} \\ 1 & a^2 \cdot e^{j\Psi} & a \cdot e^{-j\Psi} \\ 1 & a \cdot e^{j\Psi} & a^2 \cdot e^{-j\Psi} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Donde a es el operador complejo $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Además $\mathbf{K}^{-1}(\Psi) = (\mathbf{K}^t(\Psi))^*$.

La matriz de transformación compuesta es:

$$\mathbf{K}_c(\Psi, \theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}(\Psi) & 0 \\ 0 & \mathbf{K}(\Psi - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Al aplicar la transformación de Ku a las ecuaciones eléctricas de la máquina de inducción trifásica (2.13), se obtiene:

$$\mathbf{K}_c \cdot \mathbf{v} = \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{K}_c \cdot \frac{d}{dt} \{ \mathbf{M} \cdot \mathbf{i} \} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{K}_c \cdot \mathbf{v} = \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{K}_c^{-1} \cdot \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{i} + \mathbf{K}_c \cdot \frac{d}{dt} \{ \mathbf{M} \cdot \mathbf{K}_c^{-1} \cdot \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{i} \} \quad (3.30)$$

Los motores son diseñados de tal manera que las tres bobinas del estátor son iguales, por lo que $r_{sa} = r_{sb} = r_{sc} = r_s$, y también lo son las tres bobinas del rotor: $r_{ra} = r_{rb} = r_{rc} = r_r$. Por ello se cumple que:

$$\mathbf{K}_c \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{K}_c^{-1} = \mathbf{R} \quad (3.31)$$

Las variables transformadas se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_{sk} &= \mathbf{K}(\Psi) \cdot \mathbf{v}_s & ; & & \mathbf{v}_{rk} &= \mathbf{K}(\Psi - \theta) \cdot \mathbf{v}_r & ; & & \mathbf{v}_k &= \mathbf{K}_c(\Psi, \theta) \cdot \mathbf{v} \\
 \mathbf{i}_{sk} &= \mathbf{K}(\Psi) \cdot \mathbf{i}_s & ; & & \mathbf{i}_{rk} &= \mathbf{K}(\Psi - \theta) \cdot \mathbf{i}_r & ; & & \mathbf{i}_k &= \mathbf{K}_c(\Psi, \theta) \cdot \mathbf{i} \\
 \boldsymbol{\phi}_{sk} &= \mathbf{K}(\Psi) \cdot \boldsymbol{\phi}_s & ; & & \boldsymbol{\phi}_{rk} &= \mathbf{K}(\Psi - \theta) \cdot \boldsymbol{\phi}_r & ; & & \boldsymbol{\phi}_k &= \mathbf{K}_c(\Psi, \theta) \cdot \boldsymbol{\phi}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Si no hay saturación, es decir, si el sistema es lineal:

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{K}_c \cdot \left\{ \frac{d}{dt} (\mathbf{K}_c^{-1} \cdot \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{K}_c^{-1}) \right\} \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{K}_c^{-1} \cdot \frac{d \mathbf{i}_k}{dt} \tag{3.33}$$

La matriz de acoplamientos después de aplicarle la transformación de Ku ya no depende de θ , y se define como:

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{K}_c^{-1} \tag{3.34}$$

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_s + \frac{m_s}{2} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot m}{2} & 0 \\ 0 & 0 & l_s + \frac{m_s}{2} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot m}{2} \\ 0 & 0 & 0 & l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot m}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{m_r}{2} \\ 0 & \frac{2}{2} & \frac{3 \cdot m}{2} & 0 & l_r + \frac{2}{2} & l_r + \frac{m_r}{2} \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

Si se cambia la notación por (3.36), la matriz de acoplamientos es la indicada en (3.37).

$$\begin{aligned}
 L_{s0} &= l_s - m_s & ; & & L_{r0} &= l_r - m_r \\
 L_s &= l_s + \frac{m_s}{2} & ; & & L_r &= l_r + \frac{m_r}{2} & ; & & M &= \frac{3 \cdot m}{2}
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} L_{s0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{r0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Sustituyendo \mathbf{M}_k en la ecuación (3.33) se tiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{K}_c \cdot \left\{ \frac{d}{dt} (\mathbf{K}_c^{-1} \cdot \mathbf{M}_k) \right\} \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{M}_k \cdot \frac{d\mathbf{i}_k}{dt} \\ &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{K}_c \cdot \frac{d\mathbf{K}_c^{-1}}{dt} \cdot \mathbf{M}_k \cdot \mathbf{i}_k + \mathbf{M}_k \cdot \frac{d\mathbf{i}_k}{dt} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Operando $\mathbf{K}_c \cdot \frac{d\mathbf{K}_c^{-1}}{dt}$

$$\mathbf{K}_c \cdot \frac{d\mathbf{K}_c^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j \cdot \omega_\psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j \cdot \omega_\psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j \cdot s \cdot \omega_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j \cdot s \cdot \omega_\psi \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Donde:

$$\omega_\psi = \frac{d\Psi}{dt} \quad ; \quad s = \frac{\omega_\psi - \omega}{\omega_\psi} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} v_{s0} \\ v_{sf} \\ v_{sb} \\ v_{r0} \\ v_{rf} \\ v_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_{s0} \cdot p & 0 & 0 & \dots \\ 0 & r_s + L_s \cdot (p + j \cdot \omega_\psi) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & r_s + L_s \cdot (p - j \cdot \omega_\psi) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & M \cdot (p + j \cdot s \cdot \omega_\psi) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & M \cdot (p - j \cdot s \cdot \omega_\psi) & \dots \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & M \cdot (p + j \cdot \omega_\psi) & 0 \\ \dots & 0 & 0 & M \cdot (p - j \cdot \omega_\psi) \\ \dots & r_r + L_{r0} \cdot p & 0 & 0 \\ \dots & 0 & r_r + L_r \cdot (p + j \cdot s \cdot \omega_\psi) & 0 \\ \dots & 0 & 0 & r_r + L_r \cdot (p + j \cdot s \cdot \omega_\psi) \end{bmatrix}$$

Las variables transformadas son:

- Homopolar (subíndice 0)
- *Forward* (subíndice f)
- *Backward* (subíndice b)

$$\begin{bmatrix} v_{sf} \\ v_{sb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} e^{-j\psi} & a \cdot e^{-j\psi} & a^2 \cdot e^{-j\psi} \\ e^{j\psi} & a^2 \cdot e^{j\psi} & a \cdot e^{j\psi} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{i}_r = \\ &= [\mathbf{K}^{-1}(\Psi) \cdot \mathbf{i}_{sk}]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta) \right\} \cdot [\mathbf{K}^{-1}(\Psi - \theta) \cdot \mathbf{i}_{rk}] = \\ &= [\mathbf{i}_{sk}]^t \cdot [\mathbf{K}^{-1}(\Psi)]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta) \right\} \cdot \mathbf{K}^{-1}(\Psi - \theta) \cdot \mathbf{i}_{rk} = \\ &= j \cdot M \cdot (i_{sb} \cdot i_{rf} - i_{sf} \cdot i_{rb}) = 2 \cdot M \cdot \text{Im}(i_{sb} \cdot i_{rf}^*) \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{s0} &= r_s \cdot i_{s0} + L_{s0} \cdot \frac{di_{s0}}{dt} \\ \begin{bmatrix} v_{sf} \\ v_{rf} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sf} \\ i_{rf} \end{bmatrix} + j \cdot \omega_\psi \cdot \begin{bmatrix} L_s & M \\ S \cdot M & S \cdot L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sf} \\ i_{rf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sf} \\ i_{rf} \end{bmatrix} \\ \Gamma - \Gamma_{res} &= J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ \omega &= \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{sf} \\ \phi_{rf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sf} \\ i_{rf} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$L_{sd} = L_s - M; \quad L_{rd} = L_r - M \quad (3.46)$$

2.3 MODELO MATEMÁTICO EN RÉGIMEN PERMANENTE

El modelo de régimen permanente establece las ecuaciones eléctricas y mecánicas que rigen el comportamiento de las máquinas cuando han alcanzado el régimen permanente de funcionamiento. Se han obtenido las ecuaciones en régimen permanente mediante la transformación de Ku.

Si se alimenta la máquina con tensiones simétricas y equilibradas de secuencia directa:

$$\begin{aligned} v_{sa} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \varphi_s) \\ v_{sb} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \varphi_s - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{sc} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \varphi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.47)$$

La tensión transformada del estátor es:

$$v_{sf} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (e^{-j\cdot\Psi} \cdot v_{sa} + a \cdot e^{-j\cdot\Psi} \cdot v_{sb} + a^2 \cdot e^{-j\cdot\Psi} \cdot v_{sc}) \quad (3.48)$$

Sustituyendo v_{sa} , v_{sb} y v_{sc} en la ecuación (3.43) y operando se obtiene:

$$v_{sf} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_s \cdot e^{j(\omega_s \cdot t + \varphi_s - \Psi)} \quad (3.49)$$

Si se toma como referencia la de sincronismo: $\Psi = \omega_s \cdot t$ y $\omega_\psi = \omega_s$. Por lo que la ecuación (3.49) queda de la siguiente manera:

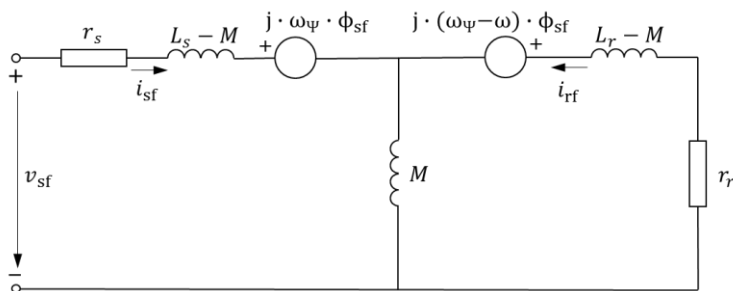


Fig. 2.2 Circuito equivalente del modelo de jaula sencilla del motor de inducción trifásico

$$v_{sf} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_s \cdot e^{j\varphi_s} \quad (3.50)$$

Las excitaciones del sistema son constantes o nulas:

- $v_{s0} = 0$ (la alimentación del estátor es equilibrada)
- $v_{sf} = \text{cte}$
- $v_{sb} = v_{sf}^* = \text{cte}$
- $v_{r0} = 0$ (la alimentación del rotor es nula)
- $v_{rf} = v_{rb}^* = 0$ (porque las tres tensiones del rotor son nulas)

Por tanto, las corrientes en régimen permanente serán constantes o nulas:

$$\begin{aligned} i_{sf} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_s \cdot e^{j\varphi_{is}} ; & i_{rf} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_r \cdot e^{j\varphi_{ir}} \\ i_{sb} &= i_{sf}^* ; & i_{rb} &= i_{rf}^* ; & i_{s0} &= i_{r0} = 0 \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{sf} &= r_s \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot L_s \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot i_{rf} \\ 0 &= r_r \cdot i_{rf} + j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot i_{sf} + j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot L_r \cdot i_{rf} \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

$$s = \frac{\omega_\psi - \omega}{\omega_\psi} \quad (3.53)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{sf} &= r_s \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot L_s \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot i_{rf} \\ 0 &= \frac{r_r}{s} \cdot i_{rf} + j \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot L_r \cdot i_{rf} \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

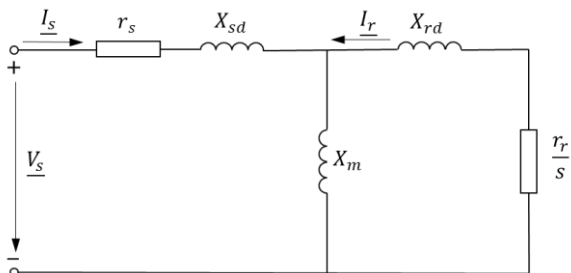


Fig. 2.3 Circuito equivalente con cinco parámetros constantes del modelo de jaula sencilla del motor de inducción

$$\left. \begin{aligned} v_{sf} &= r_s \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot (L_s - M) \cdot i_{sf} + j \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot (i_{sf} + i_{rf}) \\ 0 &= \frac{r_r}{s} \cdot i_{rf} + j \cdot \omega_\psi \cdot M \cdot (i_{sf} + i_{rf}) + j \cdot \omega_\psi \cdot (L_r - M) \cdot i_{rf} \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

$$\underline{V}_s = V_s \cdot e^{j\varphi_s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot v_{sf} \Rightarrow \underline{I}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{sf} ; \underline{I}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{rf} \quad (3.56)$$

Y las reactancias del circuito son:

$$\begin{aligned} X_{sd} &= \omega_\psi \cdot L_{sd} = \omega_\psi \cdot (L_s - M) ; X_{rd} = \omega_\psi \cdot L_{rd} = \omega_\psi \cdot (L_r - M) \\ X_m &= \omega_\psi \cdot M \end{aligned} \quad (3.57)$$

2.3.1 Par electromagnético

La ecuación que define el par electromagnético es:

$$\Gamma(t) = 2 \cdot M \cdot \text{Im}(i_{sf} \cdot i_{rf}^*) = 3 \cdot M \cdot \text{Im}(\underline{I}_s \cdot \underline{I}_r^*) \quad (3.58)$$

La corriente en el estátor se calcula como:

$$\underline{I}_s = - \frac{r_r + j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot L_r}{j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot M} \cdot \underline{I}_r \quad (3.59)$$

Sustituyendo (3.59) en (3.58) se obtiene la expresión final para el par electromagnético:

$$\Gamma(t) = 2 \cdot M \cdot \text{Im} \left(\left(- \frac{r_r + j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot L_r}{j \cdot s \cdot \omega_\psi \cdot M} \cdot \underline{I}_r \right) \cdot \underline{I}_r^* \right) = 3 \cdot \frac{1}{\omega_\psi} \cdot \frac{r_r}{s} \cdot I_r^2 \quad (3.60)$$

Tabla 2.1 Relación entre las ecuaciones de la máquina de un par de polos y de la de p pares de polos

1 par de polos	p pares de polos
θ	$p \cdot \theta$
ω	$p \cdot \omega$
$\Gamma(t)$	$p \cdot \Gamma(t)$

2.3.2 Ecuaciones de la máquina de inducción con p pares de polos

Para p pares de polos, el ángulo θ se multiplica por p en la matriz \mathbf{M} :

$$\mathbf{M}(\theta_e) = \mathbf{M}(p \cdot \theta) \quad (3.61)$$

Las ecuaciones de la máquina de inducción para p pares de polos son:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d}{dt} \{ \mathbf{M}(\theta_e) \cdot \mathbf{i} \} \quad (3.62)$$

$$\Gamma(t) = \left. \frac{\partial W'_{mag}([\mathbf{i}], \theta_e)}{\partial \theta} \right|_{[\mathbf{i}]=cte} = \left. \frac{\partial W'_{mag}([\mathbf{i}], \theta_e)}{\partial (\theta_e/p)} \right|_{[\mathbf{i}]=cte} \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{M}_{sr}(\theta_e) \right\} \cdot \mathbf{i}_r = [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial (\theta_e/p)} \mathbf{M}_{sr}(\theta_e) \right\} \cdot \mathbf{i}_r \\ &= p \cdot [\mathbf{i}_s]^t \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta_e} \mathbf{M}_{sr}(\theta_e) \right\} \cdot \mathbf{i}_r \end{aligned} \quad (3.64)$$

3 EFECTOS DE LOS DESEQUILIBRIOS EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es analizar los efectos de los desequilibrios en los motores de inducción trifásicos, comparando los resultados teóricos obtenidos mediante simulaciones con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Para ello un sistema de tensiones trifásico desequilibrado se caracteriza mediante cuatro parámetros como se ha descrito en el capítulo 2, y se utiliza el modelo matemático descrito en el capítulo 3 para poder simular el comportamiento del motor de inducción trifásico. Posteriormente, se obtienen resultados mediante simulaciones y ensayos experimentales y se comparan y analizan dichos resultados.

3.2 METODOLOGÍA

El estudio se ha llevado a cabo en dos fases, en una primera fase se ha realizado el análisis a partir de los resultados obtenidos mediante simulaciones, y en la segunda se ha realizado a partir de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

En la Fase I se seleccionaron dos motores, que fueron sometidos mediante simulaciones a un total de 13060 puntos de desequilibrio. Como se describe posteriormente con mayor detalle, los puntos de desequilibrio fueron seleccionados para cubrir un amplio espectro de cada uno de los cuatro parámetros que caracterizan un sistema de tensiones desequilibrado: tipo (q), componente directa (V_1), VUF y θ_{CVUF} .

En la Fase II se seleccionó un tercer motor, que fue ensayado en el laboratorio para un total de 20 puntos de desequilibrio, utilizando los aparatos de laboratorio (fuente programable, carga, aparatos de medida...) necesarios para alimentar el motor con tensiones desequilibradas y guardar los datos de las mediciones realizadas. Posteriormente, se caracterizaron los elementos del sistema ensayado para poder comparar los resultados experimentales, con otros obtenidos por simulación siguiendo la metodología utilizada en la Fase I. En este caso como el número de puntos de desequilibrio es menor, éstos se seleccionaron para cubrir el máximo espectro posible de los parámetros V_1 y VUF , puesto que fueron estos dos parámetros los que se mostraron significativos en el análisis de los resultados mediante simulaciones.

Para llevar a cabo las simulaciones, en ambas fases, se diseñaron y desarrollaron una serie de algoritmos que permitían implementar el modelo matemático de cada motor y simular su comportamiento bajo un desequilibrio.

3.2.1 Puntos de desequilibrio

Para llevar a cabo el estudio se escogieron puntos de desequilibrio significativos en cada una de las fases.

Fase I

Los puntos de desequilibrio fueron generados mediante un algoritmo. El número total de puntos obtenidos fue de 13060, y los requisitos para obtenerlos fueron los siguientes:

- Tipo de desequilibrio de tensión (q): la distribución de los 13060 puntos de desequilibrio fue: 21 puntos de T1, 1746 de T2, 3288 de T3, 21 de T4, 2151 de T5, 3859 de T6, 21 de T7 y 1953 de T8
- Componente directa de la tensión (V_1), las restricciones seleccionadas estaban relacionadas con los módulos y los ángulos de las tensiones de fase. Para tener límites simétricos los valores seleccionados fueron de $1,00 \text{ pu} \pm 15 \%$. De acuerdo al cambio en el ángulo de la tensión de fase, los valores seleccionados por el algoritmo fueron de $\pm 15^\circ$.
- Módulo del $CVUF$ (VUF): el algoritmo generó: 781 puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%$, 1274 puntos con $VUF = 1,0 \%$, 1787 puntos con $VUF = 1,5 \%$, 2197 puntos con $VUF = 2,0 \%$, 2376 puntos con $VUF = 2,5 \%$, 2340 puntos con $VUF = 3,0 \%$, y 2305 puntos con $VUF = 3,5 \%$, siendo en total 13060 puntos de desequilibrio.
- Ángulo del $CVUF$ (θ_{CVUF}): el algoritmo fue diseñado sin ninguna restricción de θ_{CVUF} , para analizar los efectos de este parámetro.

Fase II

En esta fase, se generaron 20 puntos de desequilibrio con las siguientes características:

- V_1 : los valores seleccionados fueron 0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu
- VUF : los valores seleccionados fueron 1, 2, 3, 4 y 5 %. Se seleccionaron alrededor del desequilibrio de tensión límite de la mayoría de normas: $VUF_{std} = 2 \%$

Como ya se ha comentado, el análisis de los resultados de las simulaciones que se realizó de forma previa a los ensayos de laboratorio, permitió conocer que los parámetros tipo (q) y ángulo de $CVUF$ (θ_{CVUF}) no presentaban influencia significativa en la corriente y el par de los motores de inducción trifásicos estudiados.

Con las características anteriormente descritas y mediante las fórmulas 2.1 y 2.3, se calcularon los valores de v_a , v_b y v_c , necesarios para la configuración de la fuente de tensión programable, en cada uno de los 20 puntos de desequilibrio seleccionados.

3.2.2 Motores seleccionados

Inicialmente, para llevar a cabo las simulaciones de los 13060 puntos de desequilibrio se eligió un motor, de aquí en adelante referido como motor 1, con las siguientes características: 75 kW, 3300 V, 50 Hz, 15,3 A, 484 Nm y 1455 min⁻¹. El motor arrastraba una carga mecánica con par parabólico respecto a la velocidad del rotor, funcionando en condiciones nominales en régimen permanente.

Posteriormente, se añadió un segundo motor para confirmar los resultados obtenidos con el motor 1. Las principales características del segundo motor, referido como motor 2, son: 7,5 kW, 400 V, 50 Hz, 15,3 A, 39,7 Nm, 1460 min⁻¹. Al igual que el motor 1, el motor 2 arrastraba una carga mecánica con par parabólico respecto a la velocidad del rotor, funcionando también en condiciones nominales en régimen permanente.

Finalmente, se llevaron a cabo las simulaciones del motor ensayado en el laboratorio, a partir de ahora referido como motor 3, cuyas características son: 1,5 kW, 230 V, 50 Hz, 6 A, 0,1 Nm y 1420 min⁻¹. La carga mecánica de este motor presentaba un par lineal, funcionando en régimen permanente en un punto con un índice de carga ligeramente inferior al nominal.

Modelo matemático

En todas las simulaciones se utilizó el modelo de jaula sencilla con cinco parámetros constantes. Este modelo proporciona buenos resultados cuando los puntos de operación están cerca del punto de funcionamiento nominal, comparado con el modelo de doble jaula de siete parámetros constantes [31]. Este modelo se puede representar con el circuito equivalente de la Fig. 2.3.

Estimación de parámetros del motor 1

Los 5 parámetros del modelo de jaula sencilla del motor 1 se estimaron en [32] y fueron utilizados en la Fase I. Sus valores se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Parámetros del motor 1

R_s (Ω)	R_r (Ω)	X_m (Ω)	X_{sd} (Ω)	X_{rd} (Ω)
7,52	3,51	577,32	12,57	12,57

Tabla 3.2 Parámetros del motor 2

R_s (Ω)	R_r (Ω)	X_m (Ω)	X_{sd} (Ω)	X_{rd} (Ω)
0,85	0,57	27,49	1,37	1,37

Tabla 3.3 Parámetros del motor 3

R_s (Ω)	R_r (Ω)	X_m (Ω)	X_{sd} (Ω)	X_{rd} (Ω)
6,80	2,95	74,67	3,25	3,25

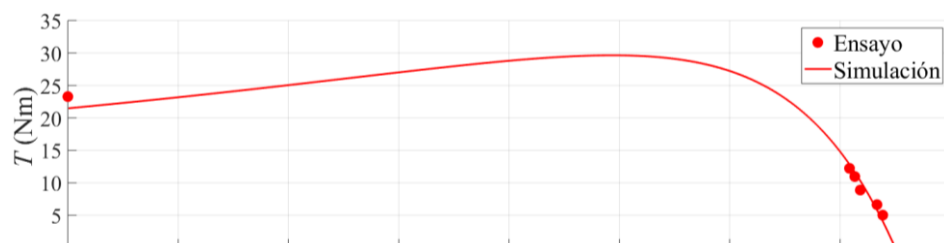
Estimación de parámetros del motor 2

Los 5 parámetros del modelo de jaula sencilla del motor 2 se estimaron en [33] y fueron utilizados en la Fase I. Sus valores se muestran en la Tabla 3.2.

Estimación de parámetros del motor 3

Los cinco parámetros del modelo de jaula sencilla del motor 3 se estimaron mediante un algoritmo diseñado a tal efecto en [8]. Como datos de entrada del algoritmo se tomaron los valores de corriente, par y velocidad de seis puntos de funcionamiento del motor, cinco de los cuales fueron experimentales y el otro fue obtenido del catálogo del fabricante (punto de arranque). Para obtener la corriente, el par y la velocidad de los cinco puntos se escogió como carga mecánica un generador de corriente continua, que a su vez alimentaba a una resistencia. A partir de la regulación de esta resistencia se obtuvieron los valores de las variables en los cinco puntos de funcionamiento deseados.

En la Fig. 3.1 se muestran las características mecánica (par-velocidad) y electromecánica (corriente-velocidad) correspondientes al motor 3. En ambos casos los puntos representan los valores obtenidos en el laboratorio, y las líneas continuas las gráficas a partir de los parámetros obtenidos mediante el algoritmo.



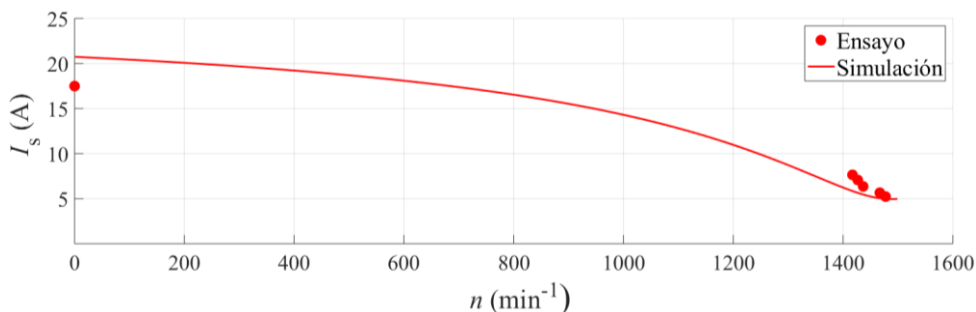


Fig. 3.1 Curvas características de par y corriente del motor para ensayos reales y simulaciones, para el conjunto de parámetros seleccionados

A partir de los valores iniciales, el algoritmo buscaba un conjunto de parámetros que determinaba el error mínimo. Este error tenía dos componentes, una para la corriente y otra para el par. Para cada punto, el algoritmo calculaba la diferencia entre la corriente medida en el ensayo y la calculada mediante los parámetros en cada iteración. Se siguió el mismo procedimiento para el par. La iteración que determinó el mínimo error global correspondió al conjunto de parámetros elegidos, que se muestran en la Tabla 3.3. Las curvas características par-velocidad y corriente-velocidad del motor de inducción se obtuvieron para el conjunto de parámetros seleccionados y se muestran en la Fig. 3.1 mediante una línea continua.

Comparando los puntos de operación de los ensayos de laboratorio con los valores calculados obtenidos a partir del conjunto de parámetros elegido de la Fig. 3.1, las líneas continuas son bastante próximas a los puntos. El conjunto de parámetros es correcto, teniendo en cuenta que el error minimiza el par y la corriente al mismo tiempo y que, por otro lado, la línea debe seguir un camino entre los puntos de funcionamiento experimentales y el punto de arranque en las dos variables (par y corriente).

3.2.3 Estructura de simulaciones y metodología

El estudio de efectos de los desequilibrios en motores de inducción se llevó a cabo en los motores 1, 2 y 3. En la Fase I se analizaron estos efectos únicamente mediante simulaciones para los motores 1 y 2. En la Fase II se replicaron los ensayos realizados con el motor 3 en el laboratorio mediante simulaciones.

En ambas fases, y por lo que respecta a las simulaciones, primero se implementó en Matlab® el modelo matemático del motor de inducción trifásico mostrado en el apartado 3.2.2, en el cual se utilizaban los parámetros estimados para cada motor, descritos en el mismo apartado.

Para la realización del estudio, se sometió a los motores a diferentes condiciones de desequilibrio (con los valores descritos en el apartado 3.2.1) y se simuló el comportamiento de

los motores en cada uno de esos puntos, obteniendo la evolución temporal del par y las corrientes. Finalmente, a partir de éstas se calcularon los valores de CUF , θ_{CCUF} y TRF .

3.2.4 Montaje de laboratorio y metodología

El estudio de los efectos de desequilibrios en motores mediante ensayos experimentales se llevó a cabo en el motor 3.

El motor 3 estaba conectado en triángulo y alimentado por una fuente de tensión programable (PACIFIC 360AMXT-UPC32/MST, 6 kVA), donde los valores de tensiones desequilibradas se programaban para cada punto de operación ensayado. El motor de inducción arrasaba un generador de corriente continua, con excitación independiente (OREMOR, 6 kW), conectado a una carga resistiva (AVITRON 40 kW, 3/N/PE AC, 400/230 V). Para adquirir las tensiones y las corrientes de las tres fases se utilizó un osciloscopio de ocho canales (YOKOGAWA DLM4038). El par se adquirió mediante un sensor de par (Lorenz DR-2112-R) conectado al ordenador. Este ordenador tenía dos softwares de fabricante, uno para la fuente de tensión programable y otro para el sensor de par. Se puede observar una vista global del montaje de laboratorio en la Fig. 3.2.

Adquisición de datos

El objetivo de los ensayos de laboratorio fue obtener los efectos de desequilibrios de tensión en el par y la corriente de un motor de inducción en 20 puntos de funcionamiento. Para cada punto, el ensayo se puede dividir en dos partes:

- 1) Arranque suave del motor con tensión equilibrada hasta llegar a régimen permanente, en un punto de funcionamiento cercano al nominal.
- 2) Aplicación de las condiciones de desequilibrio y registro de: tensiones en las tres fases, corrientes en las tres fases y par.

Tratamiento de datos

Se calculó el factor TRF para cada punto de ensayo. Se obtuvo el T_{pp} a partir de los valores máximo y mínimo del par, siendo el par máximo la media del valor máximo de cada periodo registrado. Se utilizó el mismo procedimiento para calcular el par mínimo. El valor T_0 se obtuvo como la media de todos los valores de par registrados.

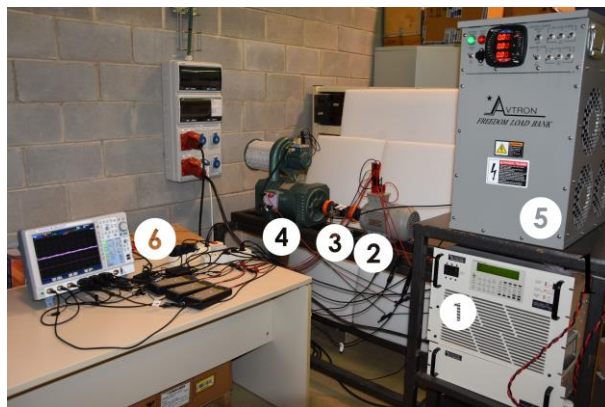


Fig. 3.2 Vista global del montaje de laboratorio utilizado en los ensayos. Los principales aparatos son: 1) fuente de tensión programable; 2) motor de inducción; 3) sensor de par; 4) generador de CC; 5) carga resistiva del generador de CC; 6) osciloscopio

Se obtuvo el CUF para cada punto de ensayo mediante un algoritmo diseñado. Primero, el algoritmo seleccionaba los valores registrados de un número entero de periodos de las corrientes trifásicas; segundo, se obtenía el módulo y el ángulo de cada fase; después se calculaban los valores de secuencia directa e inversa de la corriente y se calculaba con ellos el CUF .

3.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE I

3.3.1 Respuesta temporal de corrientes y par

La evolución temporal de corrientes y par del motor de inducción trifásico, cuando se sometió a los 13060 puntos de desequilibrio, en el motor 1 y en el motor 2, fue cualitativamente similares para todos ellos. En todos los casos se observa un desequilibrio de corrientes más acentuado que el observado en las tensiones que lo originan. Todos los puntos de desequilibrio determinan un rizado de par.

En la Fase I se escogió un punto, del total de 13060 puntos de desequilibrio analizados, como ejemplo significativo para mostrar la evolución de corriente y par. Las características del punto de desequilibrio seleccionado son: Tipo T5, $VUF = 3,5\%$, $\theta_{CVUF} = 107,6^\circ$ y $V_1 = 1,06$. Se seleccionó este punto porque provoca los valores más altos de CUF y TRF en el motor 1.

La Fig. 3.3 muestra la evolución temporal de las tensiones de fase. Los valores se muestran en pu, tomando como valor base el valor máximo de la tensión en condiciones nominales (4.1).

$$v_{pu} = \frac{v}{\sqrt{2} V_N} \quad (4.1)$$

La Fig. 3.3 también muestra la evolución temporal de las corrientes en pu, donde el valor base es la corriente máxima en condiciones nominales (4.2).

$$i_{pu} = \frac{i}{\sqrt{2} I_N} \quad (4.2)$$

Una comparación visual de las gráficas de tensiones y corrientes de la Fig. 3.3 muestra un desequilibrio de corriente mayor que el inicial desequilibrio de tensión. También se observa que el desequilibrio de tensión T5 se produce por las dos fases cuyo módulo está por encima del valor nominal, produciendo un tipo de desequilibrio diferente en las corrientes, donde las tres fases se ven afectadas en módulo.

La Fig. 3.3 también muestra la evolución temporal de par, en valores pu, tomando como valor base el par nominal (4.3).

$$T_{pu} = \frac{T}{T_N} \quad (4.3)$$

El par presenta un rizado alrededor de su valor nominal, perdiendo su distintivo valor constante cuando el motor es alimentado con un sistema de tensiones trifásico equilibrado. Este rizado causa vibraciones en el motor [34] y su frecuencia es igual a dos veces la frecuencia de la tensión del sistema.

A diferencia del par, la velocidad se mantiene próxima a su valor nominal, (Fig. 3.3) y no se observan grandes oscilaciones. Este comportamiento de la velocidad frente a un desequilibrio de tensión se repite con el resto de puntos de desequilibrio analizados.

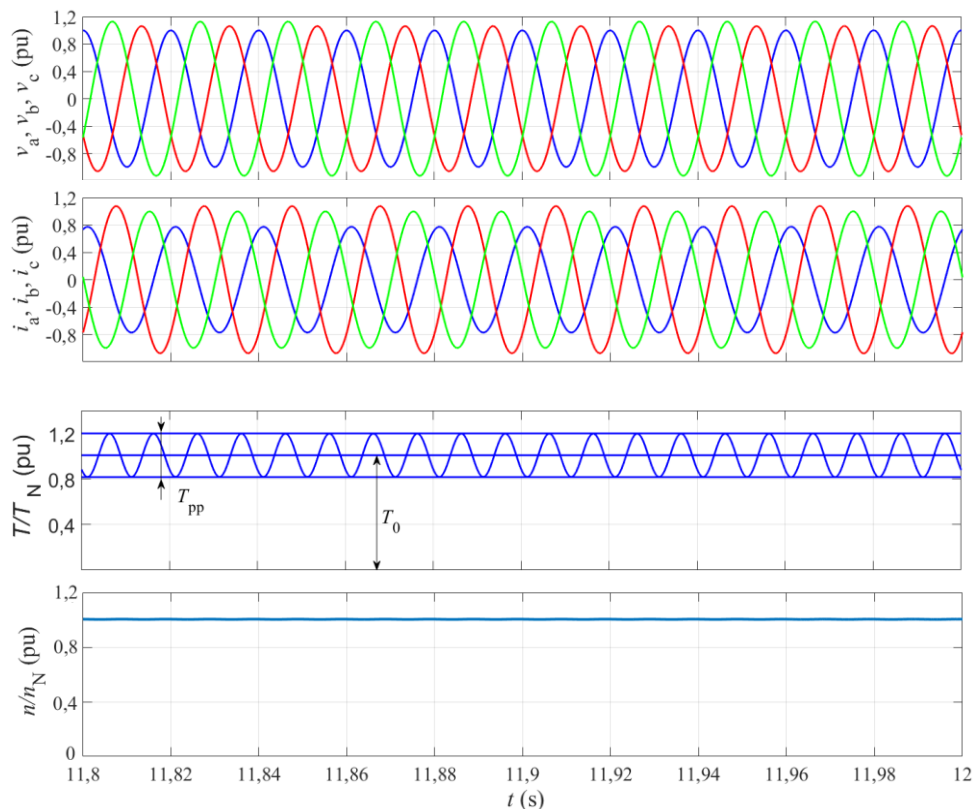


Fig. 3.3 Evolución temporal de las tensiones, corrientes, par y velocidad cuando el motor 1 está sometido a un desequilibrio de tensión tipo T5 con un $VUF = 3,5\%$ y $\theta_{CVUF} = 107,6^\circ$ y $V_1 = 1,06$ pu

3.3.2 Influencia de los parámetros de los desequilibrios en la corriente

En este apartado se explica cómo se comporta la corriente cuando el motor de inducción trifásico se somete a un desequilibrio definido por: tipo, VUF , θ_{CVUF} y V_1 . Esta influencia en la corriente se mide mediante los parámetros del factor del desequilibrio de la corriente $CCUF$: CUF y θ_{CCUF} .

Influencia del tipo de desequilibrio (q) en el CUF

En este apartado se muestra el efecto del tipo de desequilibrio (q) en el CUF .

La Fig. 3.4 muestra el *CUF* respecto al tipo de desequilibrio de tensión para el motor 1, para los 781 puntos con $VUF = 0,5\%$, los 1274 puntos con $VUF = 1,0\%$, los 1787 puntos con $VUF = 1,5\%$, los 2197 puntos con $VUF = 2,0\%$, los 2376 puntos con $VUF = 2,5\%$, los 2340 puntos con $VUF = 3,0\%$ y los 2305 puntos con $VUF = 3,5\%$. Todos los valores de *CUF* son cercanos al valor medio en cada caso, $2,40\%$, $4,82\%$, $7,27\%$, $9,69\%$, $11,97\%$, $14,34\%$ y $16,63\%$, respectivamente.

La Fig. 3.5 muestra el *CUF* respecto al tipo de desequilibrio de tensión para el motor 2, para los mismos puntos de desequilibrio aplicados al motor 1. Todos los valores de *CUF* son cercanos al valor medio en cada caso, $3,12\%$ ($VUF = 0,5\%$), $6,26\%$ ($VUF = 1,0\%$), $9,42\%$ ($VUF = 1,5\%$), $12,58\%$ ($VUF = 2,0\%$), $15,61\%$ ($VUF = 2,5\%$), $18,73\%$ ($VUF = 3,0\%$) y $21,76\%$ ($VUF = 3,5\%$).

En ambas Fig. 3.4 y Fig. 3.5 se observa que, independientemente del valor del *VUF*, las tipologías que determinan una disminución del valor eficaz de la tensión respecto el valor nominal (T1, T2 y T3), y por tanto valores de V_1 por debajo de la unidad, determinan menores valores de *CUF* y, simétricamente, las tipologías que determinan un aumento del valor eficaz de la tensión respecto el valor nominal (T4, T5 y T6), y por tanto valores de V_1 por encima de la unidad, determinan mayores valores de *CUF*. Las tipologías donde el desequilibrio es debido a un cambio en el ángulo de desfase de las tensiones (T7 y T8), pero el módulo de los fasores permanece constante e igual al nominal ($V_1 = 1$ pu), determinan valores de *CUF* entre los dos grupos anteriores.

Como se observará más tarde, la aparente influencia de la tipología de los desequilibrios (q) en el *CUF*, se debe a que este parámetro depende a su vez de V_1 : a los tipos T1, T2 y T3 les corresponden valores $V_1 < 1$; a los tipos T4, T5 y T6 valores $V_1 > 1$ y a los tipos T7 y T8 un valor $V_1 = 1$. Por tanto, el parámetro q no presenta influencia en el *CUF*.

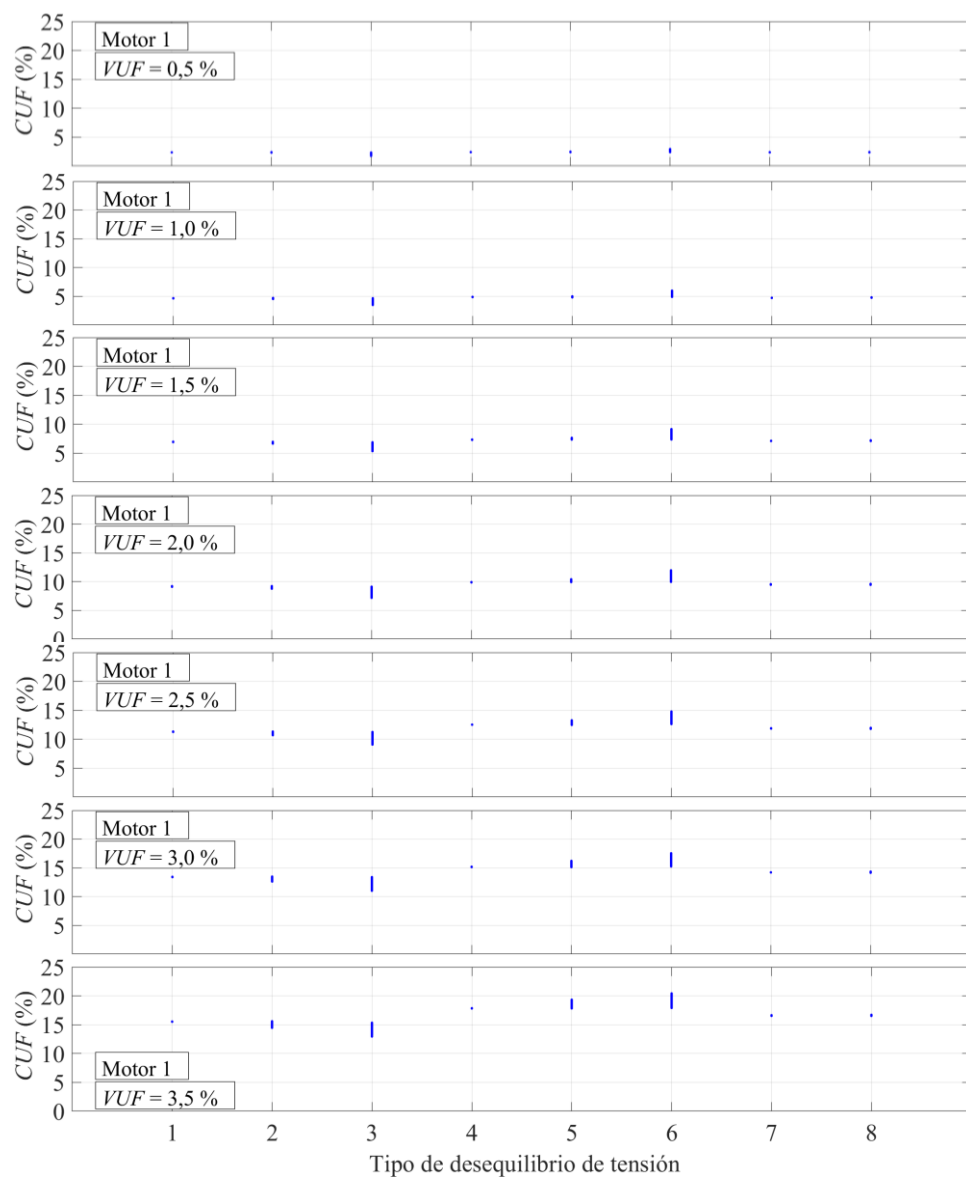


Fig. 3.4 CUF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%$, $1,0 \%$, $1,5 \%$, $2,0 \%$, $2,5 \%$, $3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 1

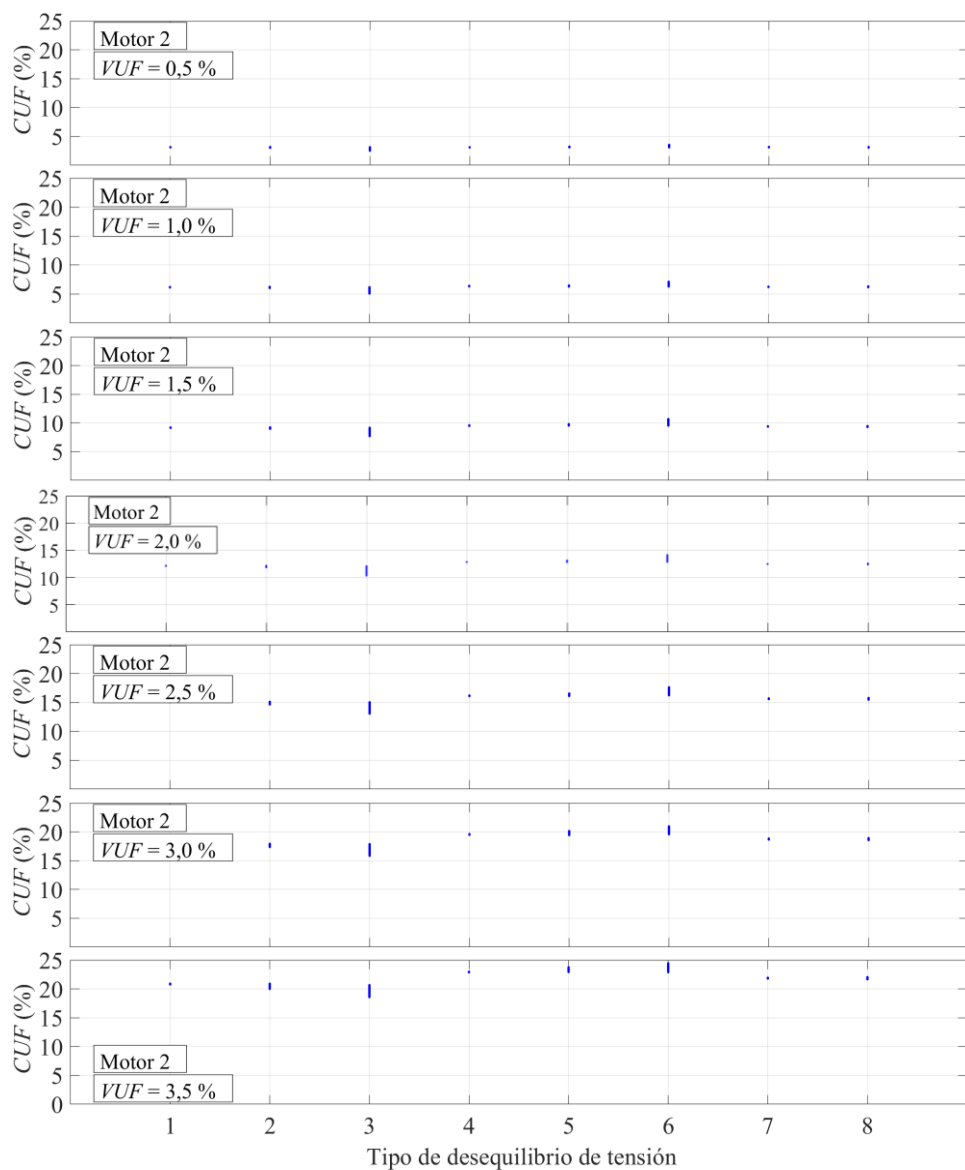


Fig. 3.5 CUF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con VUF = 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %, 3,0 % y 3,5 % para el motor 2

Influencia del tipo de desequilibrio (q) en el θ_{CCUF}

La influencia del tipo de desequilibrio (q) en el θ_{CCUF} para los motores 1 y 2 se muestra en la Fig. 3.6. Se observa que, para cada q , el valor de θ_{CCUF} varía entre su mínimo y su máximo, por lo tanto, q no tiene influencia sobre el θ_{CCUF} .

Influencia de V_1 en el CUF

Se estudió la influencia de V_1 en el CUF tomando valores constantes de VUF . Los valores de referencia de VUF tomados fueron: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 y 3,5 %. Para cada valor de V_1 se obtuvo su valor de CUF correspondiente.

El CUF respecto a V_1 se muestra en la Fig. 3.7, en la cual se observa una clara relación lineal, para cada valor de VUF , para los motores 1 y 2.

Sólo los parámetros VUF y V_1 tienen influencia en el CUF . El tipo de desequilibrio (q) y el θ_{CVUF} no tienen influencia en el CUF .

Influencia de V_1 en el θ_{CCUF}

En la Fig. 3.8 se muestran los valores que adquiere el θ_{CCUF} para cada valor de V_1 en los motores 1 y 2. Se observa una distribución homogénea de valores de θ_{CCUF} a lo largo de todos los valores de V_1 , por lo que se deduce que V_1 no influye en el θ_{CCUF} .

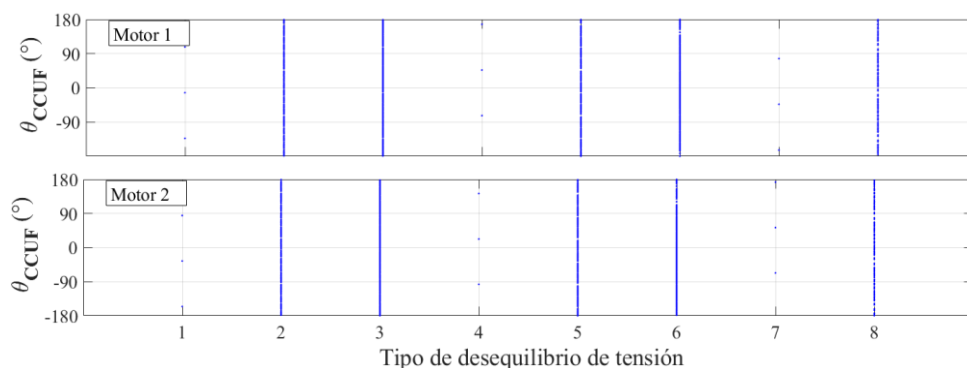


Fig. 3.6 θ_{CCUF} respecto al tipo de desequilibrio para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

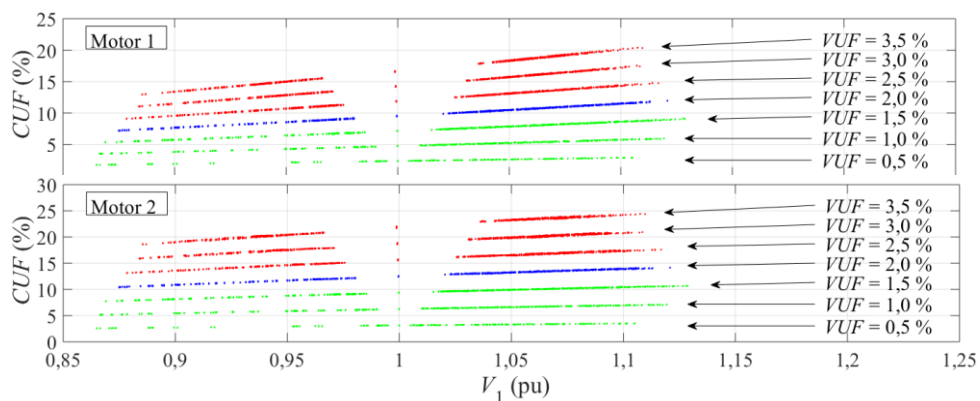


Fig. 3.7 CUF respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

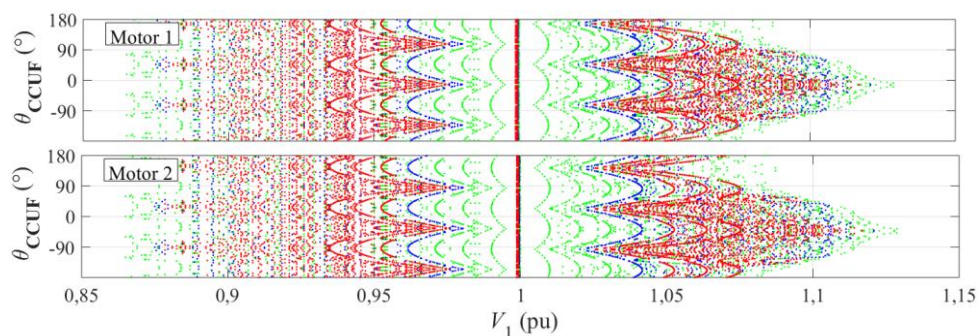


Fig. 3.8 θ_{CCUF} respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

Influencia del VUF en el CUF

Para analizar este apartado, de los 13060 puntos de desequilibrio generados se seleccionaron 4289, que son aquellos que presentan un valor de V_1 cercano a 5 valores de referencia: $0,90 \pm 0,005$ pu, $0,95 \pm 0,005$ pu, $1,00 \pm 0,005$ pu, $1,05 \pm 0,005$ pu y $1,10 \pm 0,005$ pu. Para cada valor de VUF se obtuvo su valor de CUF correspondiente.

Para un valor constante de V_1 se calculó un valor de CUF para cada valor de VUF , y se obtuvo una tendencia lineal entre ambos factores, que se puede observar en la Fig. 3.9. Esta tendencia se observa en los motores 1 y 2, siempre y cuando V_1 permanezca constante. Los

resultados gráficos obtenidos en ambos motores son muy similares cualitativa y cuantitativamente. Se observa una clara relación lineal entre VUF y CUF , cuando V_1 permanece constante.

Influencia del VUF en el θ_{CCUF}

Los resultados obtenidos, y mostrados gráficamente en la Fig. 3.10, no muestran ninguna relación entre el VUF y el θ_{CCUF} , ya que todos los valores de VUF determinan valores del ángulo de $CCUF$ comprendidos entre $-180^\circ < \theta_{CCUF} < 180^\circ$, y se observa una distribución uniforme de los puntos para todos los valores del mencionado ángulo.

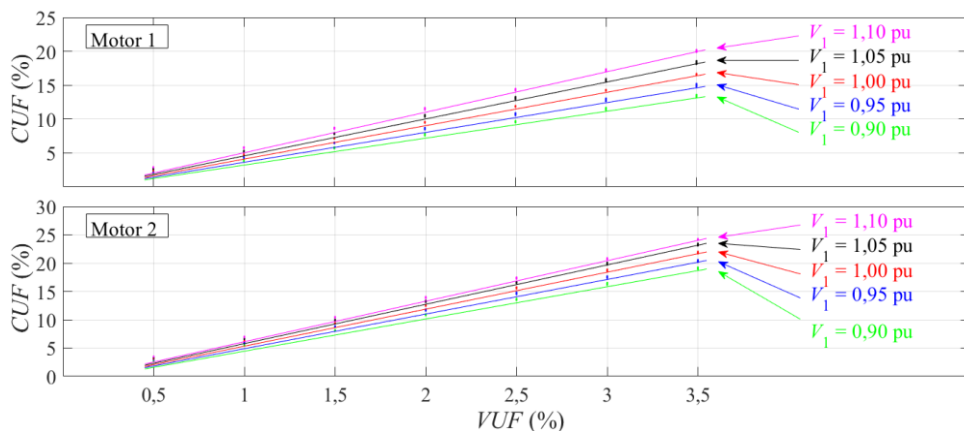


Fig. 3.9 CUF respecto a VUF para los 4289 puntos de desequilibrio para cada valor de V_1 para los motores 1 y 2

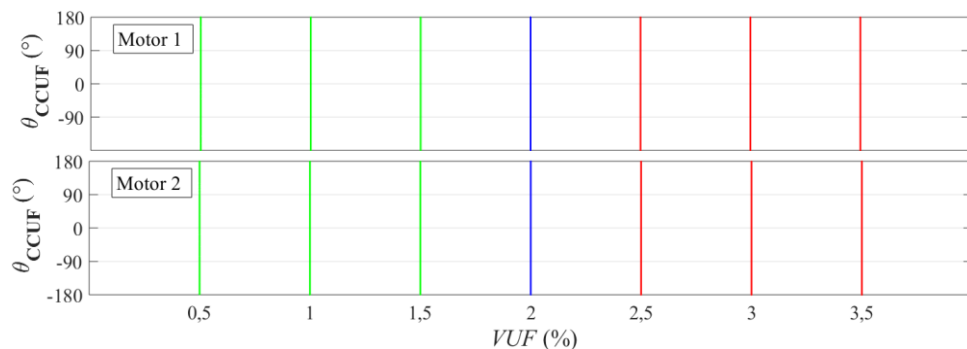


Fig. 3.10 θ_{CCUF} respecto a VUF para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

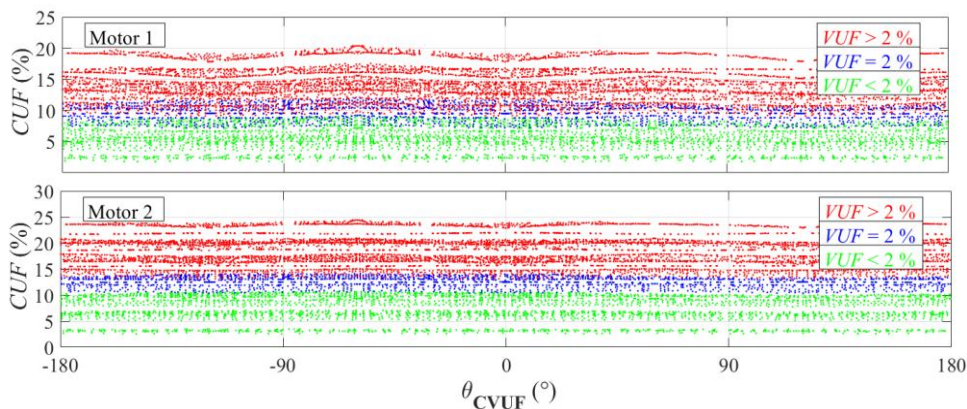


Fig. 3.11 CUF respecto a θ_{CVUF} para los 20197 puntos de desequilibrio con $VUF = 2,0\%$ para los motores 1 y 2

Influencia del θ_{CVUF} en el CUF

En la Fig. 3.11 se muestra los valores de CUF para cada θ_{CVUF} , para los motores 1 y 2. La franja de color verde corresponde a los θ_{CVUF} con $VUF < 2\%$, mientras que la franja azul corresponde a los θ_{CVUF} con $VUF = 2\%$, y la franja roja con $VUF > 2\%$.

Para $VUF < 2\%$ se obtienen los valores más bajos de CUF (entre 2,5 y 9%). Para $VUF > 2\%$ se obtienen los valores más altos de CUF (entre 10 y 20%); y para $VUF = 2\%$, se obtuvieron unos niveles intermedios de CUF (entre 8 y 11%). En los tres casos, no se observa ninguna influencia del θ_{CVUF} sobre el CUF , puesto que para diferentes valores de este ángulo (manteniendo constante el valor de VUF) no se aprecian cambios significativos en el valor de CUF .

Influencia de θ_{CVUF} en el θ_{CCUF}

Se analizó la influencia del θ_{CVUF} sobre el θ_{CCUF} para los motores 1 y 2. En la Fig. 3.12 se observa que para cualquier q existe una relación lineal entre θ_{CVUF} y θ_{CCUF} . Sin embargo, no se observa que el θ_{CVUF} tenga influencia sobre el θ_{CCUF} .

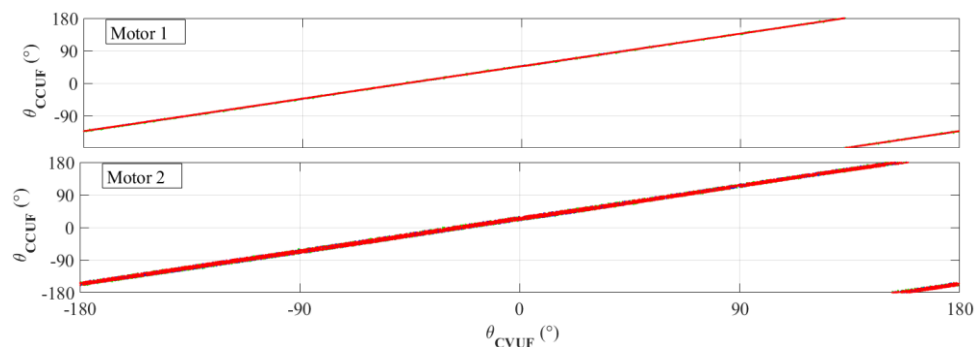


Fig. 3.12 θ_{CCUF} respecto a θ_{CVUF} para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

3.3.3 Influencia de los parámetros de los desequilibrios en el par

Influencia del tipo de desequilibrio en el TRF

En este apartado se muestra la influencia del tipo de desequilibrio en el TRF.

La Fig. 3.13 muestra el TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para el motor 1, para los 781 puntos con $VUF = 0,5\%$, los 1274 puntos con $VUF = 1,0\%$, los 1787 puntos con $VUF = 1,5\%$, los 2197 puntos con $VUF = 2\%$, los 2376 puntos con $VUF = 2,5\%$, los 2340 puntos con $VUF = 3,0\%$ y los 2305 puntos con $VUF = 3,5\%$. Todos los valores de TRF son cercanos al valor medio en cada caso, 4,82 %, 9,67 %, 14,59 %, 19,45 %, 24,02 %, 28,77 % y 33,35 %, respectivamente.

La Fig. 3.14 muestra el TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para el motor 2, para los mismos puntos de desequilibrio. Todos los valores de TRF son cercanos al valor medio en cada caso, 7,83 % ($VUF = 0,5\%$), 15,79 % ($VUF = 1,0\%$), 23,84 % ($VUF = 1,5\%$), 31,78 % ($VUF = 2\%$), 39,26 % ($VUF = 2,5\%$), 47,05 % ($VUF = 3,0\%$) y 54,55 % ($VUF = 3,5\%$).

En ambas Fig. 3.13 y Fig. 3.14 se observa que, independientemente del valor del VUF , las tipologías que determinan una disminución del valor eficaz de la tensión respecto el valor nominal (T1, T2 y T3), y por tanto valores de V_1 por debajo de la unidad, determinan menores valores de TRF y, simétricamente, las tipologías que determinan un aumento del valor eficaz de la tensión respecto el valor nominal (T4, T5 y T6), y por tanto valores de V_1 por encima de la unidad, determinan mayores valores de TRF. Las tipologías donde el desequilibrio es debido a un cambio en el ángulo de desfase de las tensiones (T7 y T8), pero el módulo de los fasores permanece constante, e igual al nominal ($V_1 = 1$), determinan valores de TRF entre los dos grupos anteriores. La misma correlación entre tipologías y CUF se observó en las Fig. 3.4 y Fig. 3.5.

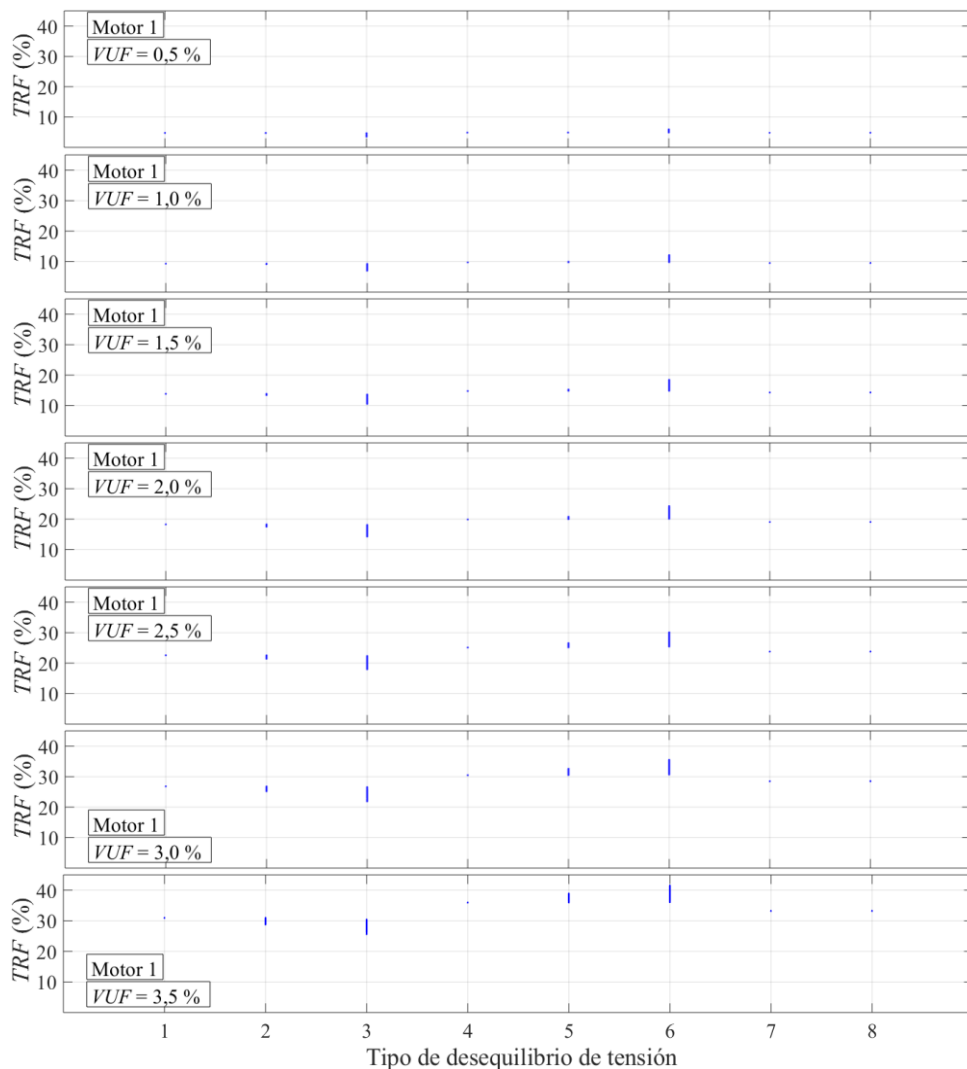


Fig. 3.13 TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con VUF = 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %, 3,0 % y 3,5 % para el motor 1

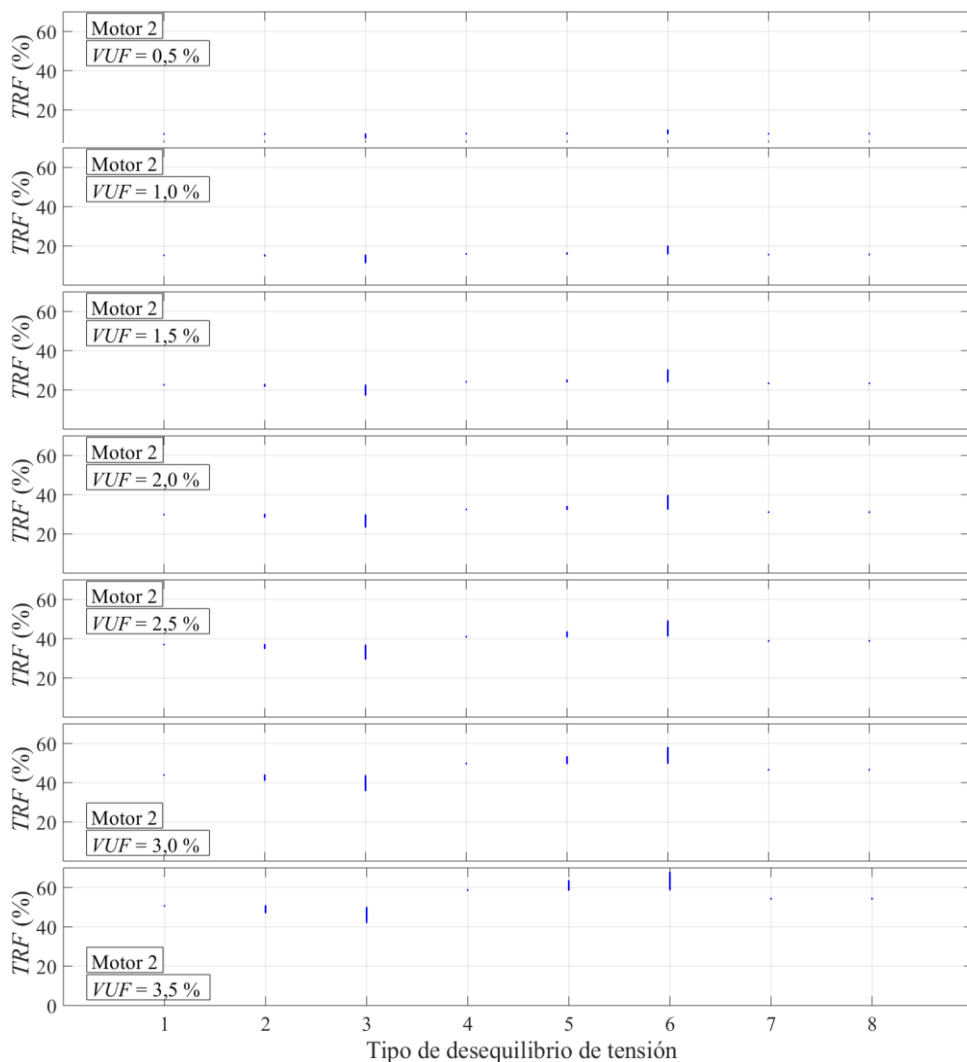


Fig. 3.14 TRF respecto al tipo de desequilibrio de tensión para los puntos de desequilibrio con $VUF = 0,5 \%$, $1,0 \%$, $1,5 \%$, $2,0 \%$, $2,5 \%$, $3,0 \%$ y $3,5 \%$ para el motor 2

Influencia de V_1 en el TRF

En este apartado se estudia la influencia de V_1 en el TRF para los 13060 puntos de desequilibrio, tomando valores constantes de VUF . Los valores de referencia de VUF tomados fueron: 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %, 3,0 % y 3,5 %. Para cada valor de V_1 se obtuvo su valor de TRF correspondiente.

El TRF respecto a V_1 se muestra en la Fig. 3.15, en la cual se observa una clara relación lineal, para cada valor de VUF , para los motores 1 y 2.

En resumen, únicamente los parámetros V_1 y VUF , de un sistema de tensiones trifásico desequilibrado, han presentado influencia en rizado de par.

Influencia del VUF en el TRF

Para analizar la influencia del VUF en el TRF , se seleccionaron 4289 puntos de los 13060 totales, los cuales presentan un valor de V_1 cercano a 5 valores de referencia: $0,90 \pm 0,005$ pu, $0,95 \pm 0,005$ pu, $1,00 \pm 0,005$ pu, $1,05 \pm 0,005$ pu y $1,10 \pm 0,005$ pu. Para cada valor de VUF se obtuvo su valor de TRF correspondiente.

Para un valor constante de V_1 se calculó un valor de TRF para cada valor de VUF , y se obtuvo una tendencia lineal entre ambos factores, que se puede observar en la Fig. 3.16. Esta tendencia se observa en los motores 1 y 2, siempre y cuando V_1 permanezca constante. Los resultados gráficos obtenidos en ambos motores son muy similares cualitativa y cuantitativamente. Se observa una clara relación lineal entre VUF y TRF , cuando V_1 permanece constante. Cualitativamente, los resultados obtenidos en la Fig. 3.9 son muy similares a los obtenidos en la Fig. 3.16.

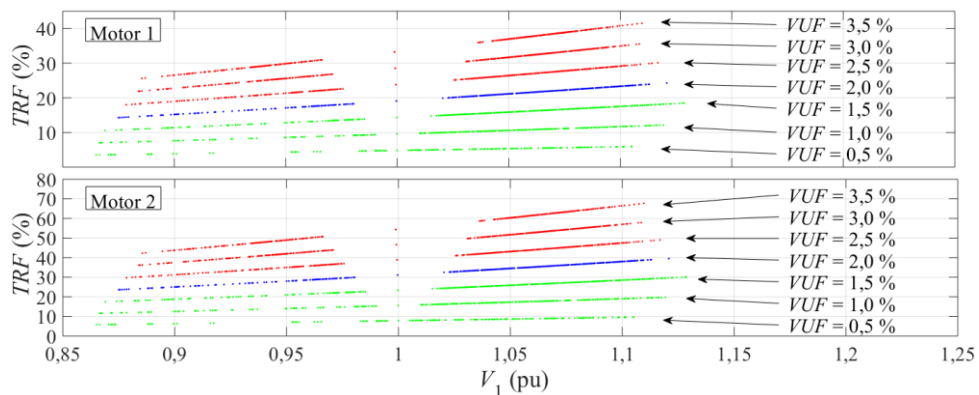


Fig. 3.15 TRF respecto a V_1 para los 13060 puntos de desequilibrio para los motores 1 y 2

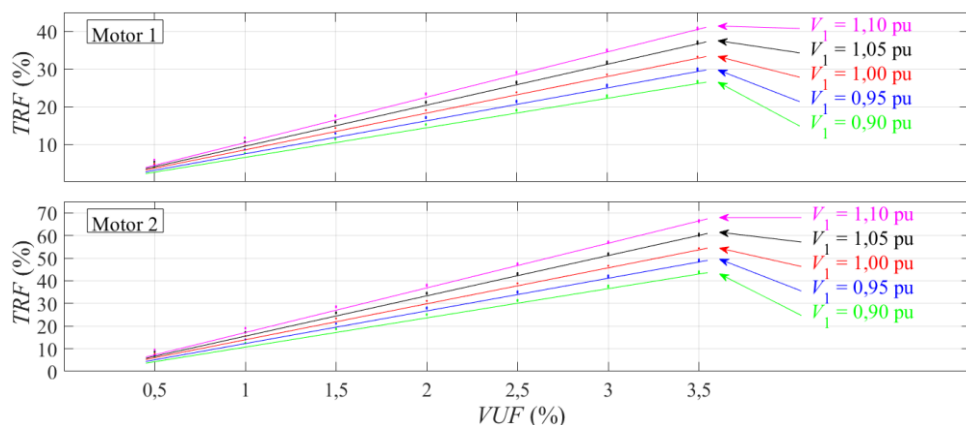


Fig. 3.16 TRF respecto a VUF, para los 4289 puntos de desequilibrio, para cada valor de V_1 y los motores 1 y 2

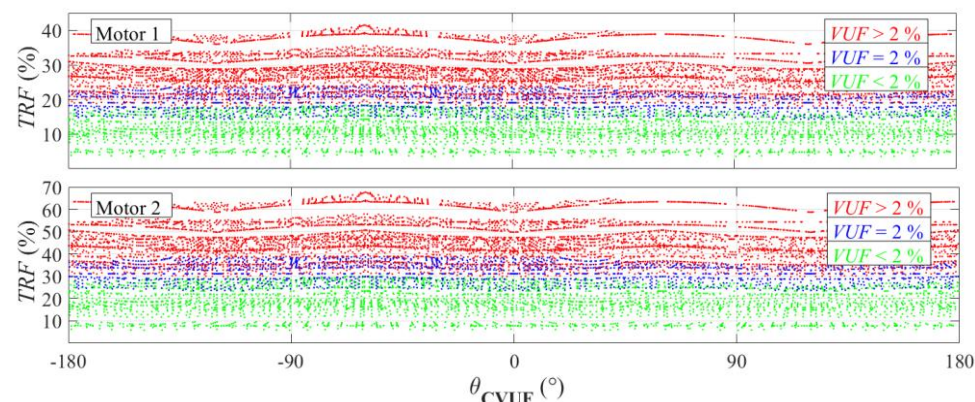


Fig. 3.17 TRF respecto a θ_{CVUF} para los 20197 puntos de desequilibrio con $VUF = 2,0\%$ para los motores 1 y 2

Influencia del θ_{CVUF} en el TRF

En la Fig. 3.17 se muestran los valores de TRF para cada θ_{CVUF} , para los motores 1 y 2. La franja de color verde corresponde a los θ_{CVUF} con $VUF < 2\%$, mientras que la franja azul corresponde a los θ_{CVUF} con $VUF = 2\%$, y la franja roja con $VUF > 2\%$.

Para $VUF < 2\%$ se obtienen los valores más bajos de TRF (entre 8 y 30%). Para $VUF > 2\%$ se obtienen los valores más altos de TRF (entre 10 y 20%); y para $VUF = 2\%$,

se obtuvieron unos niveles intermedios de TRF (entre 8 y 11 %). En los tres casos, no se observa ninguna influencia del θ_{CVUF} sobre el TRF , puesto que para diferentes valores de este ángulo (manteniendo constante el valor de VUF) no se aprecian cambios significativos en el valor de TRF .

3.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE II

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos con el motor 3 en el laboratorio y los resultados de las simulaciones que replicaban dichos ensayos.

3.4.1 Respuesta temporal de corrientes y par

La Fig. 3.18 muestra la evolución de las corrientes de las tres fases del motor 3 para un desequilibrio con $VUF = 1\%$ y $V_1 = 1$ pu, tanto para las mediciones experimentales (líneas continuas) como para las simulaciones (líneas discontinuas). Gráficamente se observan unos resultados similares con ambas metodologías.

La Fig. 3.18 también muestra el par mecánico desarrollado por el motor 3 para el mismo punto de desequilibrio, donde el valor experimental se representa mediante una línea continua, y el resultado de la simulación mediante línea discontinua. Como en el caso anterior, ambas metodologías muestran resultados bastante próximos.

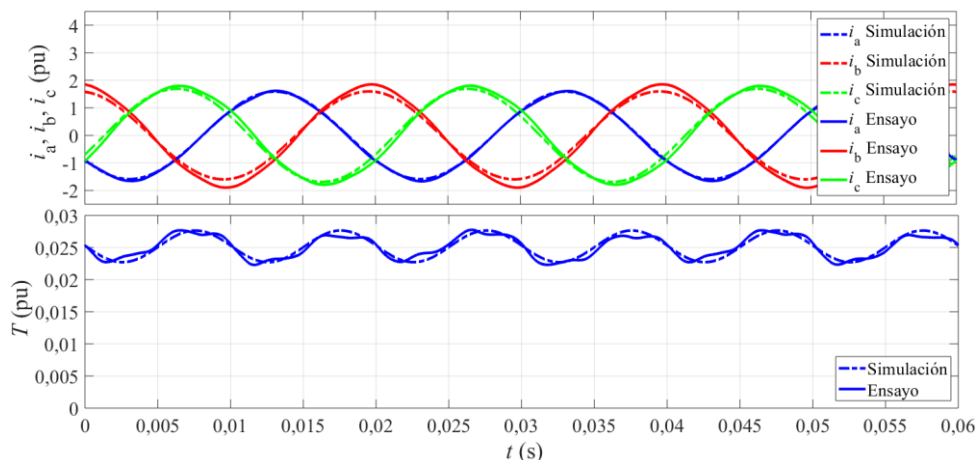


Fig. 3.18 Evolución temporal de las corrientes de línea y del par cuando el motor 3 está sometido a un desequilibrio de tensión definido por un $VUF = 1,0\%$ y $V_1 = 1$ pu

3.4.2 Influencia de V_1 y VUF en el CUF

En este apartado se analiza la influencia de los parámetros V_1 y VUF en el CUF del motor 3. En este caso, siguiendo las conclusiones de la Fase I, y para limitar el número final de ensayos experimentales a realizar, se descartó analizar la influencia de los parámetros q y θ_{CVUF} en el CUF . Como el parámetro θ_{CCUF} no se mostró afectado con ninguna pauta significativa en la Fase I, no ha sido estudiado en esta fase.

Las características CUF vs. V_1 obtenidas de los ensayos de laboratorio y en las simulaciones se muestran en la Fig. 3.19. Ambas figuras presentan valores muy similares para los 20 puntos de funcionamiento, en las cuales se pueden observar 5 relaciones lineales, para cada valor de VUF (1, 2, 3, 4 y 5 %).

Las características CUF vs. VUF obtenidas de los ensayos de laboratorio y en las simulaciones se muestran en la Fig. 3.20. Ambas figuras presentan valores muy similares para los 20 puntos de funcionamiento, en las cuales se pueden observar 4 relaciones lineales, para cada valor de V_1 (0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu).

En el apartado 3.3.2, en las Fig. 3.7 y Fig. 3.9 se obtuvieron las mismas relaciones lineales de CUF y VUF , y CUF y V_1 , donde se utilizaban dos motores diferentes, llamados motor 1 y motor 2.

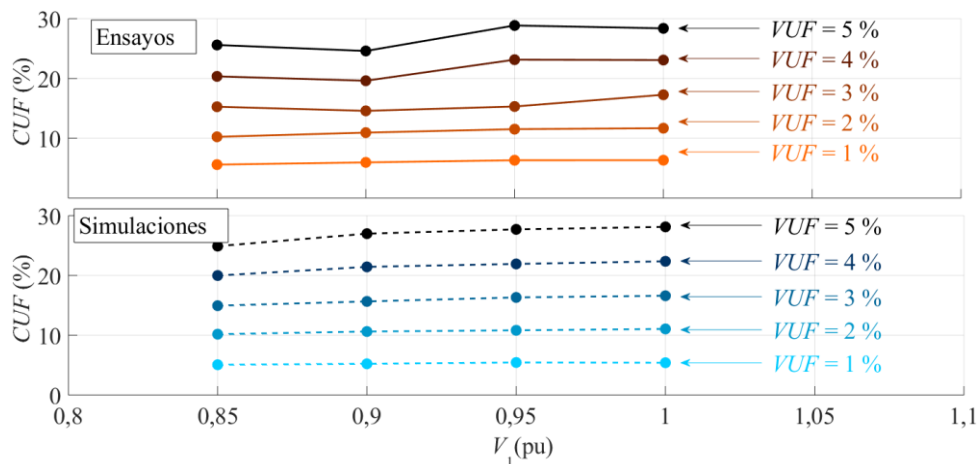


Fig. 3.19 Influencia de V_1 en el CUF cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para ensayos experimentales y simulaciones

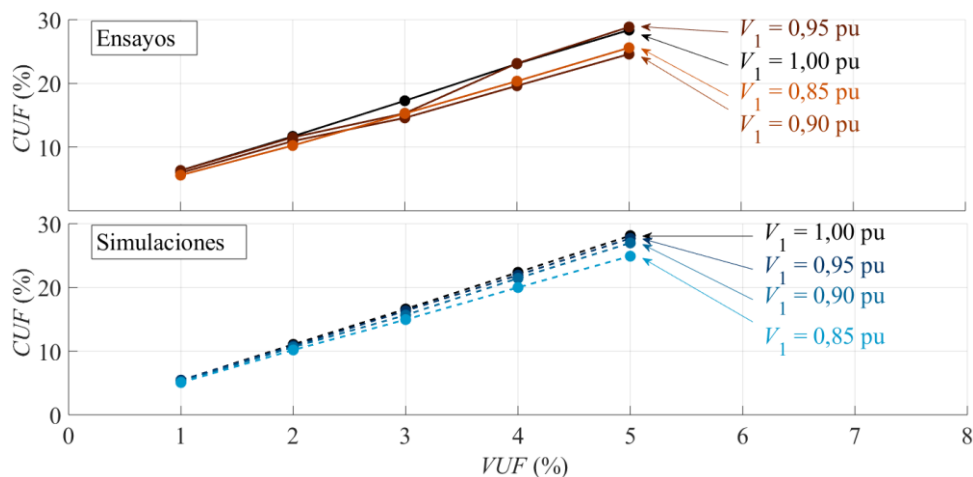


Fig. 3.20 Influencia del VUF en el CUF cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para ensayos experimentales y simulaciones

Para cuantificar la correlación entre los resultados de los ensayos de laboratorio y de simulación mostrados en las Fig. 3.19 y Fig. 3.20, se calculó el error de CUF, mediante (4.4).

$$e_{CUF} = \frac{CUF_{sim} - CUF_{lab}}{CUF_{lab}} 100 \quad (4.4)$$

Tabla 3.4 Error de CUF (%) entre resultados de simulación y de laboratorio para los veinte puntos de funcionamiento

	$V_1 = 0,85 \text{ pu}$	$V_1 = 0,90 \text{ pu}$	$V_1 = 0,95 \text{ pu}$	$V_1 = 1,00 \text{ pu}$
$VUF = 1 \%$	-9,3	-12,3	-13,8	-14,6
$VUF = 2 \%$	-0,6	-2,8	-6,0	-5,3
$VUF = 3 \%$	-2,1	7,4	6,7	3,8
$VUF = 4 \%$	-1,8	9,3	-5,2	-3,1
$VUF = 5 \%$	-2,7	9,7	-4,0	-0,9

Los errores calculados de CUF para los 20 puntos de funcionamiento se muestran en la Tabla 3.4, en la cual se observa que el error, en valor absoluto, está siempre por debajo del 15 %.

Tabla 3.5 Pendiente de las rectas de CUF vs VUF para cada valor de V_1 , obtenidas a partir de los datos experimentales

V_1 (pu)	0,85	0,90	0,95	1,00
Pendiente CUF	5,01	4,59	5,67	5,55

Tabla 3.6 Pendiente de las rectas de CUF vs V_1 para cada valor de VUF, obtenidas a partir de los datos experimentales

VUF (%)	1	2	3	4	5
Pendiente CUF	5,16	9,83	13,46	23,43	25,24

Para cada serie de las Fig. 3.19 y Fig. 3.20 perteneciente a los resultados obtenidos experimentalmente se obtuvieron las rectas de regresión lineal, cuya pendiente se muestra en las Tabla 3.5 y Tabla 3.6, respectivamente.

3.4.3 Influencia de los parámetros de los desequilibrios en el par

En este apartado se analiza la influencia de los parámetros VUF y V_1 en el par mecánico desarrollado por el motor 3. Tal como se realizó en la Fase I, se ha analizado dicha influencia mediante el parámetro TRF , que cuantifica el rizado provocado por el desequilibrio de tensión.

Las características TRF vs. V_1 obtenidas de los ensayos de laboratorio y de las simulaciones se muestran en la Fig. 3.21. Ambas figuras presentan valores muy similares para los 20 puntos de funcionamiento, en las cuales se pueden observar 5 relaciones lineales, para cada valor de VUF (1, 2, 3, 4 y 5 %).

Las características TRF vs. VUF obtenidas de los ensayos de laboratorio y en las simulaciones se muestran en la Fig. 3.22. Ambas figuras presentan valores muy similares para los 20 puntos de funcionamiento, en las cuales se pueden observar 4 relaciones lineales, para cada valor de V_1 (0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu).

En el apartado 3.3.3, en las Fig. 3.15 y Fig. 3.16, se obtuvieron las mismas relaciones lineales de TRF y VUF , y TRF y V_1 , donde se utilizaban el motor 1 y el motor 2.

Para cuantificar la correlación entre los resultados de los ensayos de laboratorio y de simulación mostrados en las Fig. 3.21 y Fig. 3.22, se calculó el error de TRF , mediante (4.5).

$$e_{TRF} = \frac{TRF_{sim} - TRF_{lab}}{TRF_{lab}} 100 \quad (4.5)$$

Los errores calculados de *TRF* para los 20 puntos de funcionamiento se muestran en la Tabla 3.7, en la cual se observa que el error absoluto está siempre por debajo del 20 %.

Para cada serie de las Fig. 3.21 y Fig. 3.22 perteneciente a los resultados obtenidos experimentalmente se obtuvieron las rectas de regresión lineal, mostradas en la Tabla 3.8 y la

Tabla 3.9, respectivamente.

Tabla 3.7 Error de *TRF* (%) entre resultados de simulación y de laboratorio para los veinte puntos de funcionamiento

	$V_1 = 0,85$ pu	$V_1 = 0,90$ pu	$V_1 = 0,95$ pu	$V_1 = 1,00$ pu
$VUF = 1 \%$	-28,6	-19,7	-16,4	-5,2
$VUF = 2 \%$	-9,9	-11,0	0,7	16,0
$VUF = 3 \%$	-12,8	9,5	17,3	16,8
$VUF = 4 \%$	-13,1	10,7	-0,3	15,1
$VUF = 5 \%$	-14,6	12,8	-2,4	14,1

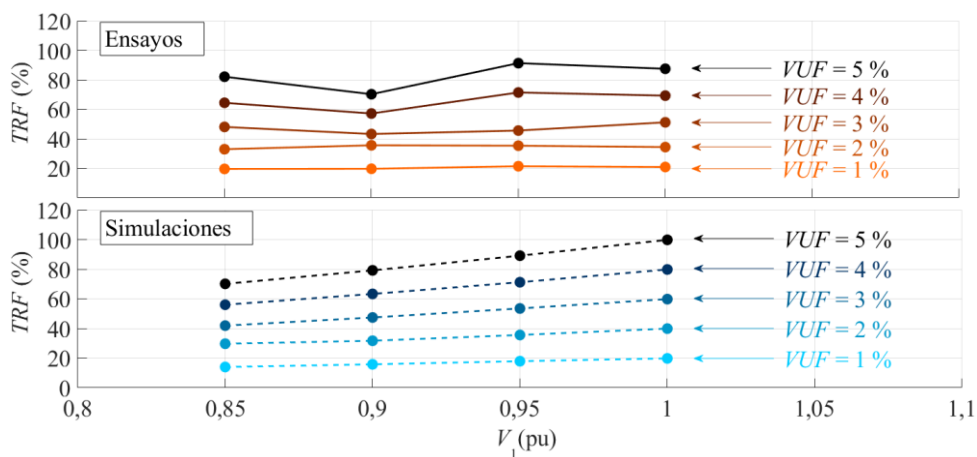


Fig. 3.21 Influencia de V_1 en el *TRF* cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de *VUF*

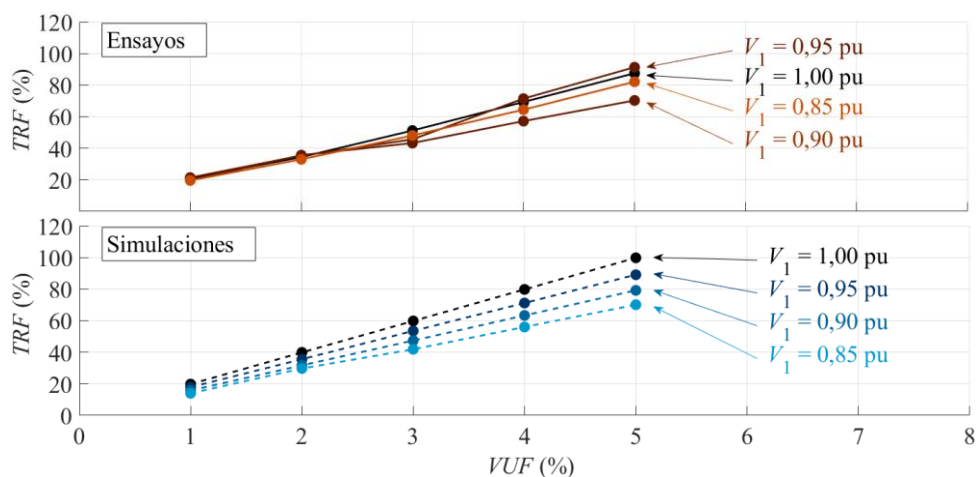


Fig. 3.22 Influencia de VUF en el TRF cuando el motor 3 está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1

Tabla 3.8 Pendiente de las rectas de TRF vs. VUF para cada valor de V_1 , obtenidas a partir de los datos experimentales

V_1 (pu)	0,85	0,90	0,95	1,00
Pendiente TRF	15,65	12,27	17,59	16,81

Tabla 3.9 Pendiente de las rectas de TRF vs. V_1 para cada valor de VUF, obtenidas a partir de los datos experimentales

VUF (%)	1	2	3	4	5
Pendiente TRF	11,20	8,10	23,39	57,60	74,48

3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en los de las Fases I y II (apartados 3.3 y 3.4). Se diferencian cuáles son los parámetros significativos de un desequilibrio de

tensión, respecto a su influencia en la corriente y el par de los motores de inducción trifásicos. Se analiza el efecto que tienen los desequilibrios en la corriente y en el par; se profundiza en cómo influye la severidad del VUF y V_1 en ambos. Finalmente, se comparan los resultados experimentales con los simulados.

3.5.1 Parámetros significativos del desequilibrio

Para determinar los desequilibrios a los que los motores de inducción fueron sometidos se utilizaron los siguientes factores: tipo de desequilibrio, V_1 , VUF y θ_{CVUF} . Analizando los resultados obtenidos se concluyó que únicamente los parámetros V_1 y VUF tienen influencia en el CUF y el TRF .

3.5.2 Efecto en la corriente

Analizando los resultados obtenidos en diferentes motores y con diferentes puntos de desequilibrio, se ha observado que el valor que adquiere el CUF es aproximadamente 5 veces el valor del VUF .

3.5.3 Efecto en el par

Se ha observado que cuando un motor es sometido a un desequilibrio de tensión, aparece un rizado en el par, cuya frecuencia es dos veces la frecuencia de alimentación, en este caso 100 Hz. El par se obtiene a partir de la potencia, y ésta es el producto de la tensión y la corriente. Al multiplicar dos ondas sinusoidales que tienen la misma frecuencia (50 Hz), se obtiene una onda sinusoidal de frecuencia doble (100 Hz).

3.5.4 Severidad de V_1 y VUF en los efectos

En la Tabla 3.10 se ha resumido la información mostrada en: Tabla 3.5, Tabla 3.6, Tabla 3.8 y

Tabla 3.9.

Se observa que cuando el VUF es constante, la pendiente de las rectas $CUF-V_1$ está en torno a 5, mientras que cuando V_1 es constante, la pendiente de las rectas $CUF-VUF$ varía entre 5 y 25 aproximadamente, por lo que V_1 produce cambios más severos de CUF que el VUF .

Análogamente, se observa que cuando V_1 es constante, la pendiente de las rectas $TRF-VUF$ está en torno a 15, mientras que cuando el VUF es constante, la pendiente de las rectas $TRF-V_1$ varía entre 11 y 75 aproximadamente, por lo que V_1 produce cambios generalmente más severos de TRF que el VUF .

Tabla 3.10 Pendiente de las rectas CUF- V_1 y TRF- V_1 , para valores constantes de VUF, y pendiente de las rectas CUF-VUF, y TRF-VUF para valores constantes de V_1

		<i>CUF</i>	<i>TRF</i>
V_1 constante	Pendiente <i>VUF</i>	≈ 5	≈ 15
<i>VUF</i> constante	Pendiente V_1	$\approx 5-25$	$\approx 11-75$

3.5.5 Comparación de resultados experimentales y simulados

En los apartados anteriores de este capítulo se han mostrado, por separado, los resultados obtenidos en las simulaciones y en los ensayos de laboratorio. En este apartado, se comparan ambos resultados mediante gráficas, y para valores concretos de V_1 o *VUF*.

En la Fig. 3.23 se muestra dicha comparación cuando se analiza la evolución del *CUF* en función del *VUF* para los cuatro valores de V_1 estudiados. En todas ellas se observa que los resultados son muy próximos, y ambos reflejan un comportamiento lineal entre las variables analizadas, mucho más evidente en los resultados de simulaciones.

En la Fig. 3.24 se comparan los resultados de las simulaciones con los de los ensayos en el laboratorio, cuando se analiza la evolución del *CUF* en función de V_1 para los cinco valores de *VUF* estudiados. En todas ellas se observa que los resultados son muy próximos, y ambos reflejan un comportamiento lineal entre las variables analizadas, mucho más evidente en los resultados de simulaciones.

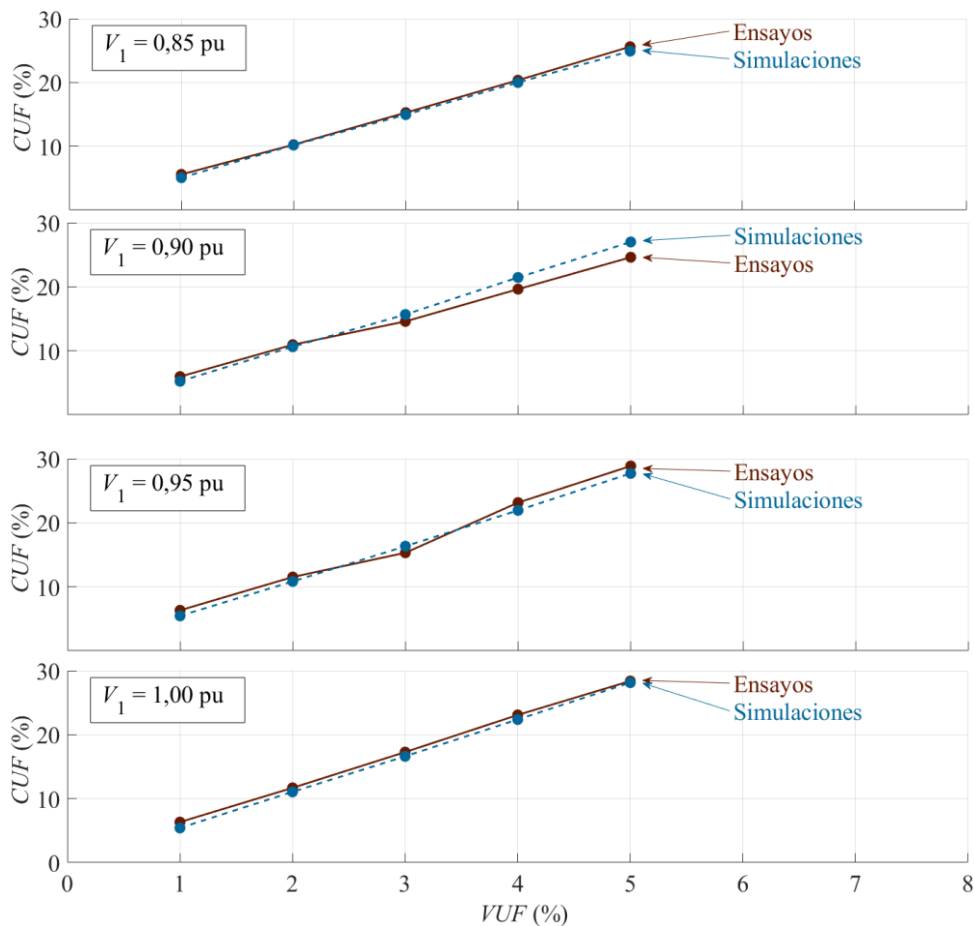


Fig. 3.23 Evolución del CUF en función del VUF para valores de V_1 de 0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu, para ensayos y simulaciones

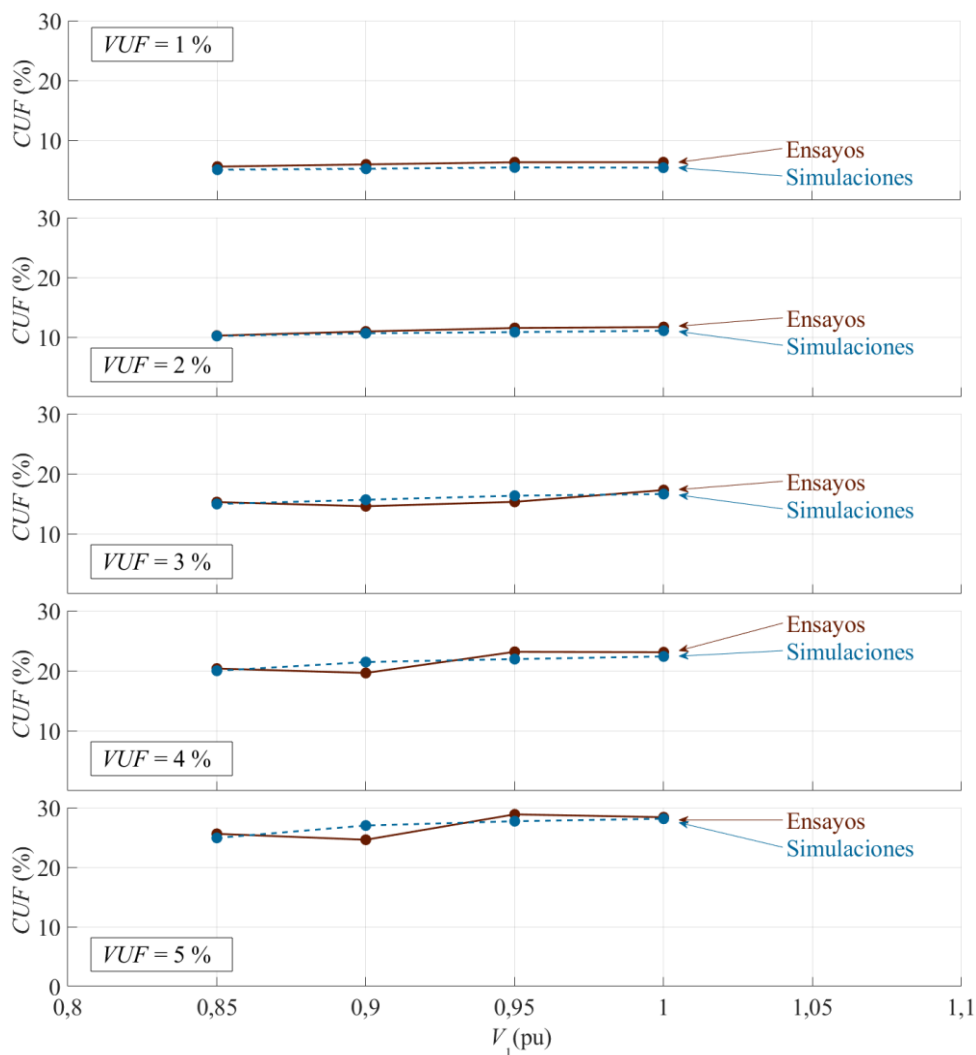


Fig. 3.24 Evolución del CUF en función de V_1 para valores de VUF de 1, 2, 3, 4 y 5 %, para ensayos y simulaciones

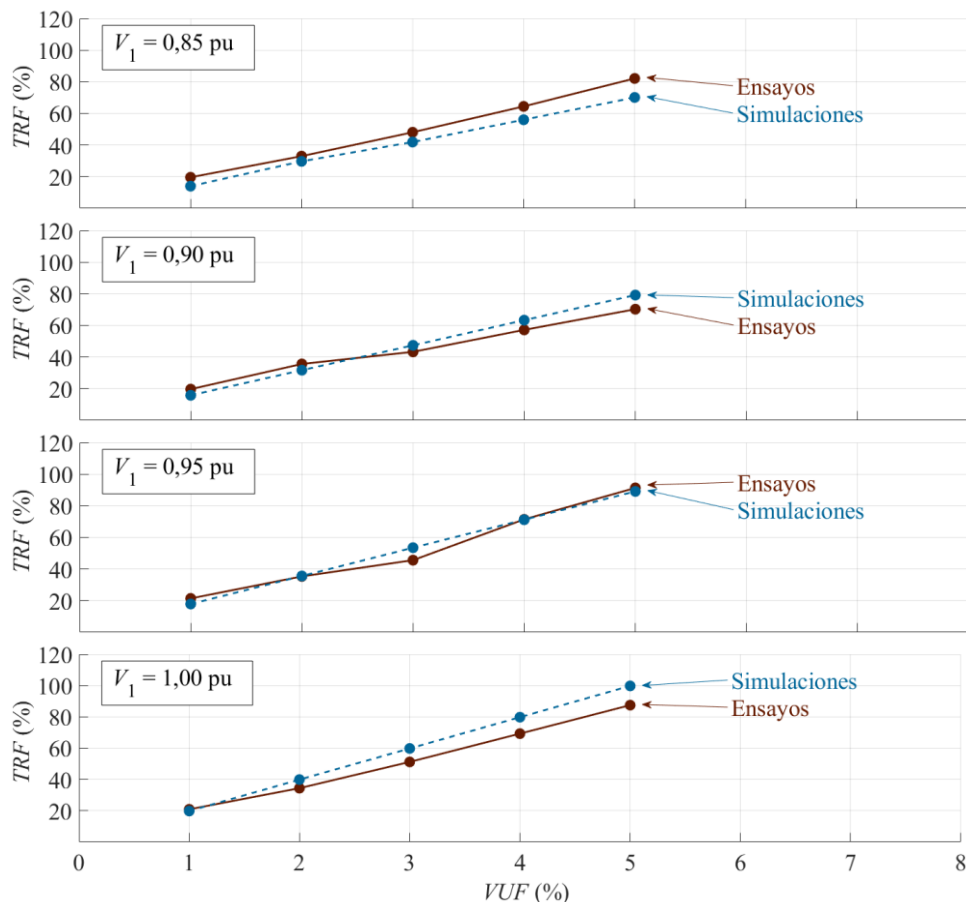


Fig. 3.25 Evolución del TRF en función del VUF para valores de V_1 de 0,85, 0,90, 0,95 y 1,00 pu, para ensayos y simulaciones

En la Fig. 3.25 se comparan los resultados de las simulaciones con los de los ensayos en el laboratorio, cuando se analiza la evolución del TRF en función del VUF para los cuatro valores de V_1 estudiados. En todas ellas se observa que los resultados son muy próximos, y ambos reflejan un comportamiento lineal entre las variables analizadas, mucho más evidente en los resultados de simulaciones.

En la Fig. 3.26 se comparan los resultados de las simulaciones con los de los ensayos en el laboratorio, cuando se analiza la evolución del TRF en función de V_1 para los cinco valores de VUF estudiados. En todas ellas se observa que los resultados son muy próximos, y ambos

reflejan un comportamiento lineal entre las variables analizadas, mucho más evidente en los resultados de simulaciones.

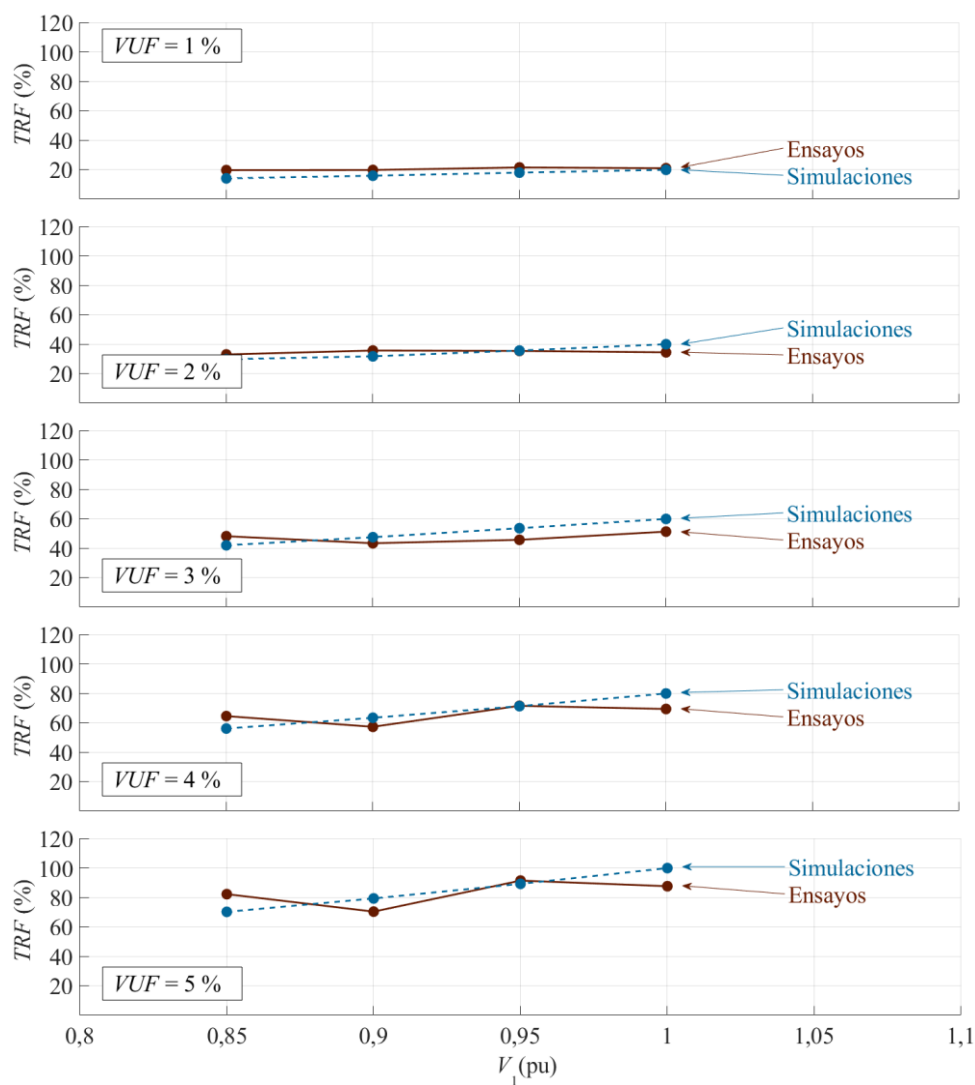


Fig. 3.26 Evolución del TRF en función de V_1 para valores de VUF de 1, 2, 3, 4 y 5 %, para ensayos y simulaciones

En resumen, los resultados obtenidos de respuesta temporal de corrientes y par obtenidos mediante simulación son cercanos a los obtenidos mediante ensayos en el laboratorio.

La influencia de los parámetros V_1 y VUF en la corriente y en el par obtenidos mediante ensayos en el laboratorio muestra unos resultados muy próximos a los obtenidos mediante simulaciones, y en ambos se observa una relación lineal entre factores de desequilibrio.

3.6 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este capítulo son:

- Mediante simulaciones se comprobó que los parámetros tipo de desequilibrio (q) y ángulo de $CVUF$ (θ_{CVUF}) no tienen influencia en los desequilibrios de la corriente y el rizado de par de los motores de inducción trifásicos.
- Mediante simulaciones se comprobó que los parámetros V_1 y VUF tienen influencia en el CUF y el TRF , pero no se observó influencia alguna en el θ_{CCUF} .
- Tanto por simulaciones como mediante ensayos experimentales, se comprobó que la relación entre el CUF y el V_1 es lineal, cuando VUF es constante. De igual modo, se comprobó que la relación entre el TRF y el VUF es lineal, cuando V_1 es constante.
- El parámetro V_1 muestra efectos más severos en el CUF y el TRF que el parámetro VUF , puesto que las pendientes de las características $CUF-V_1$ (para VUF constante) son superiores a las características $CUF-VUF$ (para V_1 constante), observándose el mismo comportamiento para el TRF .

4 EFECTOS DE LOS DESEQUILIBRIOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan los efectos de los desequilibrios en el transformador trifásico. Para ello, primero se describen los modelos matemáticos existentes de transformadores y el modelo matemático del transformador trifásico de tres columnas utilizado en el estudio. Se aplica la técnica del Teorema de la Dualidad [35] para obtener el circuito eléctrico equivalente a partir del circuito magnético. Posteriormente, se explican la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio de los efectos de desequilibrios en el transformador, el programa de simulación utilizado y el algoritmo de tratamiento de datos. Finalmente, se exponen los resultados obtenidos, analizando el efecto que tienen los desequilibrios de tensión del devanado primario en las corrientes de este devanado y en las tensiones y corrientes del devanado secundario mediante los factores de desequilibrio VUF y CUF [36].

4.2 MODELOS MATEMÁTICOS DEL TRANSFORMADOR

El modelado de transformadores es un tema ampliamente extendido. Representar una situación de régimen transitorio requiere de un modelo válido a muchas frecuencias, lo cual es complicado y en muchos casos, imposible [37], [38]. El desarrollo de estos modelos aún requiere bastantes avances [39]–[41]. La clasificación de rangos de frecuencia de transitorios según recomienda la norma CIGRE WG 33.02, es la siguiente [35], [42]:

- Transitorios lentos: desde 5 Hz hasta 1 kHz
- Transitorios de conmutación: desde la frecuencia fundamental hasta 10 kHz
- Transitorios rápidos: desde 10 kHz hasta 1 MHz
- Transitorios muy rápidos: desde 100 kHz hasta 50 MHz

La Tabla 4.1 muestra la importancia de diferentes parámetros y efectos para la anterior clasificación [42], [43].

Algunos ejemplos de transitorios lentos son oscilaciones torsionales, vibraciones de palas de turbina eólica, interacciones de controlador, interacciones de armónicos y resonancia.

Los transitorios de conmutación ocurren cuando se conectan y desconectan cargas. Los modelos a estas frecuencias son los adecuados para obtener las tensiones de recuperación. Dentro de los modelos de transformador a frecuencias de conmutación, existen modelos basados en el circuito magnético, en el circuito eléctrico, y en ambos.

Una de las principales causas de transitorios rápidos es la caída de relámpagos aguas arriba de las líneas de transmisión y de los transformadores. En los modelos de transitorios rápidos

se suelen considerar capacidades a tierra y entre arrollamientos y se suele despreciar la influencia del núcleo magnético.

Tabla 4.1 Importancia de parámetros y efectos para diferentes modelos de transformador

Parámetro o Efecto	Transitorios lentos	Transitorios de conmutación	Transitorios rápidos	Transitorios muy rápidos
Impedancia de cortocircuito	Muy importante	Muy importante	Importante	Despreciable
Saturación	Muy importante	Muy importante ⁽¹⁾	Despreciable	Despreciable
Pérdidas en el hierro	Importante ⁽²⁾	Importante	Despreciable	Despreciable
Corrientes Eddy	Muy importante	Importante	Despreciable	Despreciable
Acoplamiento capacitivo	Despreciable	Importante	Muy importante	Muy importante

(1) Sólo para fenómenos de energización del transformador. En el resto de los casos, importante.

(2) Sólo para fenómenos de resonancia.

Los transitorios muy rápidos suelen ocurrir en subestaciones con aislamiento de gas. Para frecuencias tan altas, se suele modelar el transformador como un condensador. Las inductancias de magnetización y de pérdidas se pueden despreciar a estas frecuencias.

Es importante adecuar el modelo al tipo de núcleo de transformador (de 3 columnas, de 5 columnas, acorazado, de grano orientado, al aire), puesto que los efectos del tipo del núcleo en el funcionamiento del transformador deben ser representados mediante dicho modelo.

Los modelos de transformadores para transitorios de baja y media frecuencia también se pueden clasificar de la siguiente manera [42], [44], [45]:

- **Modelo BCTRAN (Representación matricial)**

Ecuaciones:

- Opción $[R] - [\omega L]$

$$[v] = [R][i] + [L][di/dt] \tag{5.1}$$

- Opción $[A] - [R]$

$$[di/dt] = [L]^{-1}[v] - [L]^{-1}[R][i] \tag{5.2}$$

Características:

- Estos modelos incluyen acoplamientos entre fases y características de los terminales
- Sólo se pueden representar modelos lineales
- La excitación debe unirse externamente en los terminales en forma de elementos no lineales
- Son bastante precisos para frecuencias inferiores a 1 kHz

• **Modelo STC (Componente de Transformador Saturable)**

Ecuaciones:

$$[L]^{-1}[v] = [L]^{-1}[R][i] + [di/dt] \quad (5.3)$$

Características:

- No se puede utilizar para más de tres arrollamientos
- La inductancia de magnetización se conecta al neutro de la estrella
- Se puede producir inestabilidad numérica con modelos de tres arrollamientos

• **Modelos basados en la topología**

Ecuaciones:

- Modelos basados en la Dualidad: son derivados utilizando un enfoque basado en el circuito, sin una descripción matemática
- Modelos geométricos

$$[v] = [R][i] + [d\lambda/dt] \quad (5.4)$$

Características:

- Los modelos basados en la Dualidad incluyen los efectos de la saturación en cada columna del núcleo, de acoplamiento magnético entre fases, y de pérdidas
- La formulación matemática de modelos geométricos se basa en ecuaciones magnéticas y su acoplamiento a ecuaciones eléctricas, el cual se hace teniendo en cuenta la topología del núcleo. Los modelos difieren unos de otros por la forma en la que se derivan las ecuaciones magnéticas.

• **Modelo híbrido**

Ecuaciones:

- Modelos basados en la Dualidad

Características:

- Se utiliza la matriz $[A]$ para representar la inductancia de dispersión total y los acoplamientos núcleo-bobina
- Se utiliza una representación del núcleo topológicamente correcta basada en la teoría de la Dualidad
- Se utilizan resistencias de devanados dependientes de la frecuencia
- Se incluyen los efectos capacitivos, que se añaden externamente a los terminales del modelo

4.3 MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO

En este apartado se presenta el modelo matemático utilizado en el estudio de los efectos de desequilibrios en el transformador, así como los pasos seguidos para obtener el circuito equivalente de dicho modelo. El modelo de transformador utilizado fue escogido por ser uno de los más detallados que existen y, por tanto, adecuado para estudiar los efectos de perturbaciones. Así, el estudio de los efectos de desequilibrios en transformadores mediante este modelo es el punto de partida para un estudio futuro de otros tipos de perturbaciones (armónicos, flicker, etc.).

4.3.1 Teorema de la Dualidad

Todo circuito se puede transformar en un circuito equivalente con las correspondencias de elementos duales descritos en la Tabla 4.2 [35].

Para transformar un circuito aplicando el Teorema de la Dualidad [39], primero se toman los nodos del circuito y se traza una malla de nuevos elementos, uno nuevo por cada elemento que incide en el nodo, encerrando el nodo tratado. Se establece la correspondencia en dirección contraria a las agujas del reloj por convención. En la Fig. 4.1 se muestra la correspondencia de los elementos mediante una flecha que los une.

Después, por cada corriente de los conductores del nodo se asigna una tensión en el elemento correspondiente, utilizando el mismo criterio de polaridades (Fig. 4.2).

De la misma manera, se asigna la variable corriente al nuevo elemento, tomando la tensión del elemento antiguo y representándolo con una flecha dirigida hacia el + y haciéndola girar en la dirección escogida.

Por último, si el nuevo elemento estaba caracterizado por:

$$f(v_1, i_1) = 0 \tag{5.5}$$

Tabla 4.2 Pares duales de elementos

Electricidad	Magnetismo
$V = RI$	$\mathcal{F} = \mathfrak{R} \cdot \phi$
Resistencia (R)	Conductancia (G)
Inductancia (L)	Capacitancia (C)
Corriente (I)	Flujo (ϕ)
Fuerza electromotriz (V)	Fuerza magnetomotriz (\mathcal{F})
Fuente de tensión	Fuente de corriente
Conductividad (σ)	Permeabilidad (μ)
Nodo	Malla
Circuito serie	Circuito paralelo
Cortocircuito	Circuito abierto

El nuevo, queda caracterizado por:

$$f(i'_1, v'_1) = 0 \quad (5.6)$$

De esta forma, la ecuación de corrientes de nodo (5.7) encerrado será idéntica a la ecuación de tensiones de la malla resultante (5.8):

$$-i_2 + i_3 + i_1 = 0 \quad (5.7)$$

$$-v'_2 + v'_3 + v'_1 = 0 \quad (5.8)$$

Una vez terminado el proceso con un nodo, se suprime el nodo con todos sus elementos y se repite el procedimiento con el siguiente nodo. Para construir la nueva malla, se toman como base los nuevos elementos que ya fueron construidos. Al final se obtiene un circuito

equivalente al primero, y se dice que ambos son duales, ya que tienen las mismas ecuaciones y, por tanto, las mismas soluciones.

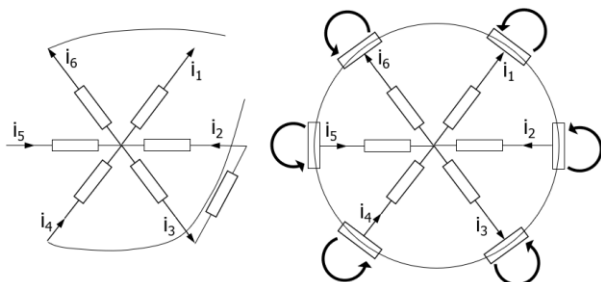


Fig. 4.1 Primer paso de transformación de un circuito aplicando el Teorema de la Dualidad

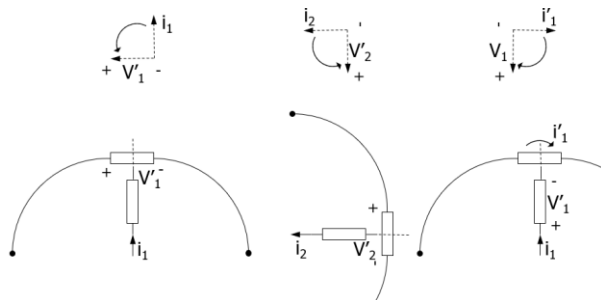


Fig. 4.2 Segundo paso de transformación de un circuito aplicando el Teorema de la Dualidad

El Teorema de la Dualidad fue utilizado para obtener el circuito eléctrico equivalente a partir del circuito magnético del transformador estudiado [39], [41], [46]–[48].

4.3.2 Descripción del núcleo y de los devanados

El núcleo del transformador está formado por tres columnas y cuatro yugos de igual sección transversal, como se muestra en la Fig. 4.3.

El devanado primario (P) se encuentra en el exterior y es el devanado de alta tensión. El devanado secundario (S) se encuentra rodeando al núcleo y es el devanado de baja tensión. Los flujos de cada columna se conocen como Φ_1 , Φ_2 y Φ_3 . También existe un flujo de dispersión entre la columna del núcleo y el devanado secundario. Además, existen otros dos flujos de dispersión: uno entre los devanados primario y secundario, y otro en el exterior del devanado primario.

4.3.3 Circuito magnético equivalente de Hopkinson

En la analogía de Hopkinson [41], [49], las reluctancias se representan mediante resistencias, las fuerzas magnetomotrices que se modelan como fuentes de tensión controlada y las corrientes circulando en este circuito análogo son equivalentes a los flujos magnéticos, según:

$$\mathcal{F} = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (5.9)$$

Donde \mathcal{F} es la fuerza magnetomotriz, \mathfrak{R} es la reluctancia y ϕ es el flujo magnético.

Para realizar el circuito magnético equivalente de Hopkinson se asume que el flujo de dispersión es despreciable. Según la ley de Ampère, la fuerza magnetomotriz de un devanado se calcula como:

$$\mathcal{F} = N \cdot i \quad (5.10)$$

Siendo i la corriente del devanado.

Teniendo en cuenta la ley de Faraday, en un arrollamiento se produce una fuerza contraelectromotriz si dicho arrollamiento se dispone en un campo magnético cuyo flujo varía con el tiempo, de forma que se opone a la variación del flujo magnético:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (5.11)$$

Donde e es la fuerza electromotriz y $\frac{d\phi}{dt}$ es la derivada del flujo magnético respecto al tiempo.

El circuito magnético equivalente de Hopkinson se obtiene a partir de la Fig. 4.3 y se ha representado en la Fig. 4.4.

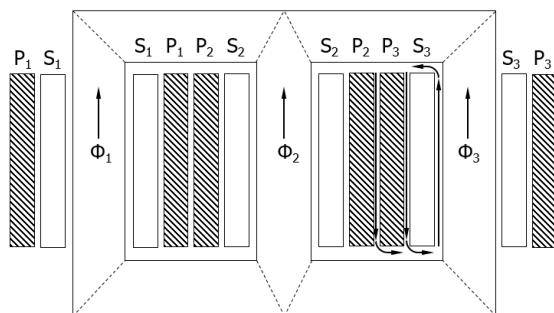


Fig. 4.3 Distribución del núcleo y de los devanados del transformador

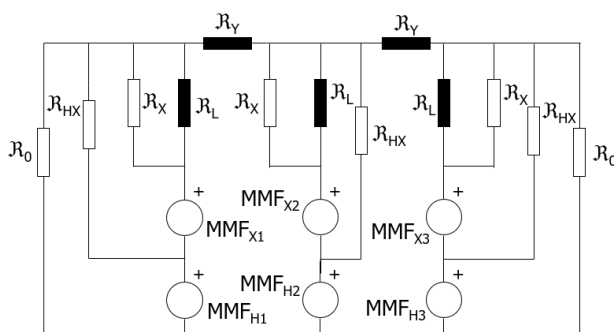


Fig. 4.4 Circuito magnético equivalente de Hopkinson

Los devanados se representan con fuentes de fuerza magnetomotriz (MMF). Las reluctancias debidas al flujo a través del núcleo de hierro son saturables y se representan mediante rectángulos negros, mientras que las reluctancias debidas al flujo entre devanados son lineales y se representan mediante rectángulos blancos. Los elementos llamados \mathfrak{R}_L son las reluctancias debidas a las columnas. Entre las columnas exteriores y la del medio hay un yugo, cuya reluctancia se representa mediante \mathfrak{R}_Y . Las pérdidas entre los devanado primario y secundario se representan mediante \mathfrak{R}_{HX} . Las pérdidas entre las columnas y el devanado secundario se representan mediante \mathfrak{R}_X y las pérdidas entre las columnas y el devanado primario, mediante \mathfrak{R}_0 .

4.3.4 Derivación dual del circuito equivalente

Mediante la técnica de transformación del Teorema de la Dualidad, los seis devanados del transformador de la Fig. 4.3 se convierten en fuentes de intensidad. Los flujos de dispersión entre devanados se representan mediante inductancias que se colocan entre las fuentes de intensidad (L_{H1X1} , L_{H2X2} y L_{H3X3}). L_M y L_Y son las inductancias de magnetización no lineales de las columnas y los yugos, respectivamente. Los elementos L_0 son las inductancias lineales debidas al flujo de dispersión fuera del devanado primario. El circuito equivalente se muestra en la Fig. 4.5.

En el modelo de la Fig. 4.5, sin embargo, no se representan las pérdidas reales de potencia. Para ello, se añaden resistencias en paralelo a cada inductancia de magnetización para aproximar las pérdidas en el núcleo. R_0 se añade en paralelo a L_0 para tener en cuenta las pérdidas debidas al flujo de dispersión fuera del devanado primario. Finalmente, las pérdidas de los devanados se representan añadiendo una resistencia para cada devanado. El circuito eléctrico equivalente y los condensadores que representan las capacidades presentes en el transformador se muestran en la Fig. 4.6.

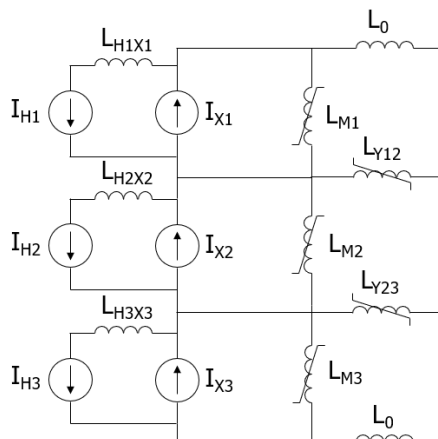


Fig. 4.5 Circuito equivalente transformado mediante la Teoría de la Dualidad

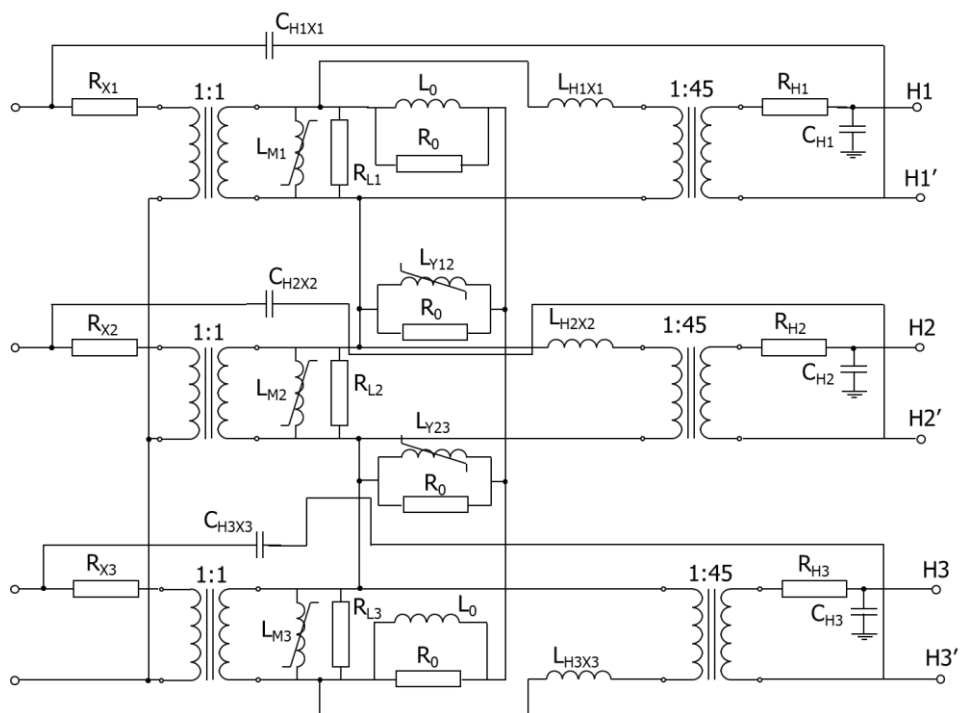


Fig. 4.6 Circuito equivalente eléctrico del transformador

Las fuentes de intensidad se sustituyen por transformadores ideales para tener en cuenta las vueltas de cada arrollamiento, y a la vez para aislar el núcleo de los devanados. El modelo completo se muestra en la Fig. 4.6, donde X1, X2 y X3 son los bornes de conexión de los devanados secundarios, siendo X0 el punto a tierra. La inductancia que representa las pérdidas entre el secundario y la columna del núcleo no se muestra, ya que no se aprecia diferencia de comportamiento del modelo teniendo ésta en cuenta [41], [46], [47],[48].

H1, H2 y H3 son los lados externos de los devanados de alta tensión, y H1', H2' y H3', los devanados internos. X1, X2 y X3 son los lados externos del devanado de baja tensión, y X0 es el lado interno.

Adición de los efectos capacitivos

Mediante las transformaciones del circuito magnético del transformador, se obtienen todos los elementos de la Fig. 4.6 excepto los condensadores, los cuales son añadidos a posteriori. Es necesario decidir qué efectos capacitivos son significativos para el funcionamiento del transformador. En la Fig. 4.7 se observan las capacidades de acoplamiento más grandes, entre arrollamientos y el núcleo. Esta información fue suministrada por el fabricante.

Los devanados de alta y baja tensión están separados por material aislante (aceite y papel), formando un condensador de placa paralela. Existen tres capacidades de este tipo en el transformador (H1-X1, H2-X2 y H3-X3). Estos condensadores se deben conectar de la parte exterior del devanado de baja tensión a la parte interior del devanado de alta tensión.

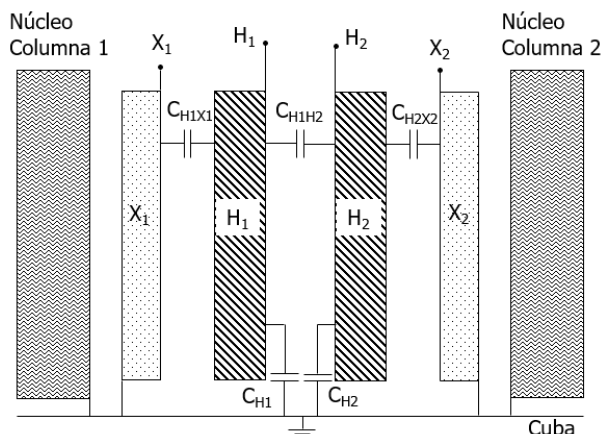


Fig. 4.7 Capacidades de acoplamiento del transformador

Además, dos devanados de alta tensión adyacentes están separados mediante aislamiento formando otra capacidad. Existen dos capacidades de este tipo en el transformador (H1-H2 y H2-H3). Éstas acoplan la parte externa de un devanado a la parte externa del otro devanado. La capacidad entre H1 y H3 es despreciable debido a la distancia entre ambos devanados y a la presencia de H2. Entre la cuba del transformador y el exterior del devanado de alta tensión hay aceite, que genera otra capacidad. Los condensadores H1-Cuba, H2-Cuba y H3-Cuba también deben añadirse. No hay efectos capacitivos entre la parte interna del devanado de baja tensión y el núcleo, ya que X0 está puesto a tierra. La colocación de los condensadores añadidos se muestra en la Fig. 4.7.

4.4 METODOLOGÍA

El estudio de efectos de desequilibrios en transformadores se ha llevado a cabo analizando los resultados obtenidos mediante simulaciones. Se seleccionó un transformador trifásico que fue sometido a 30 puntos de desequilibrio. Los puntos de desequilibrio fueron escogidos para cubrir diferentes valores de VUF y de V_1 .

Para llevar a cabo este estudio, primero se definieron los puntos de desequilibrio a los que se iba a someter el transformador. Posteriormente, se escogió el transformador que se iba a utilizar para cada simulación y el modelo matemático del mismo. Finalmente, mediante un algoritmo se trataron los datos obtenidos mediante simulaciones, y se analizaron los factores de desequilibrio descritos en el Capítulo 2: VUF en los devanados primario y secundario, y CUF en los devanados primario y secundario.

4.4.1 Puntos de desequilibrio

Para elegir los parámetros de cada punto de desequilibrio se tuvieron en cuenta los factores de desequilibrio explicados en el Capítulo 2, y las características del transformador. Para llevar a cabo el estudio de los efectos de desequilibrios en el transformador se escogieron puntos de desequilibrio con las siguientes características:

- V_1 : los valores seleccionados fueron 0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05 y 1,10 pu
- VUF : los valores seleccionados fueron 1, 2, 3, 4 y 5 %. Se seleccionaron alrededor del desequilibrio de tensión límite de la mayoría de normas: $VUF_{std} = 2 \%$.

El índice de carga en todos los casos fue igual a 1,00.

4.4.2 Transformador seleccionado

Para llevar a cabo las simulaciones de desequilibrios caracterizados por el VUF y V_1 se eligió un transformador trifásico de distribución con las siguientes características: de tres columnas, 500 kVA, 12470-480/277 V, conexión Dyn [46].

Modelo matemático y parámetros

En todas las simulaciones se utilizó el circuito equivalente de la Fig. 4.6 con 18 parámetros constantes (Tabla 4.3), 4 lineales (Tabla 4.4) y 5 no lineales (Tabla 4.5 y Tabla 4.6), validado por [46].

Tabla 4.3 Parámetros constantes del circuito equivalente del transformador utilizado

R_{H1}	6,696 Ω	R_0	834,279 Ω	C_{H1X1}	2,8 nF
R_{H2}	6,696 Ω	R_{Y12}	1,324 M Ω	C_{H2X2}	2,8 nF
R_{H3}	6,696 Ω	R_{Y23}	1,324 M Ω	C_{H3X3}	2,8 nF
R_{X1}	0,0027 Ω	R_{L1}	0,19 M Ω	C_{H1}	3 nF
R_{X2}	0,0027 Ω	R_{L2}	0,19 M Ω	C_{H2}	2,7 nF
R_{X3}	0,0027 Ω	R_{L3}	0,19 M Ω	C_{H3}	2,9 nF

Tabla 4.4 Parámetros lineales del circuito equivalente del transformador utilizado

L_{H1X1}	0,003 H
L_{H2X2}	0,003 H
L_{H3X3}	0,003 H
L_0	2,824538 H
L_1	0,001 H
L_2	0,001 H

Tabla 4.5 Curva no lineal de magnetización de L_{M1}, L_{M2} y L_{M3}

Flujo magnético, λ (V·s)	Corriente de magnetización, i (A)
0	0
0,1299	0,569698
0,15913	0,6215155
0,19355	0,679849
0,22592	0,756847
0,28875	0,7767365
0,43931	0,860358
0,60916	0,910017
0,95159	0,934255
1,34566	0,971835
2,02179	1,03337
2,90257	1,09167
4,05522	1,140615
5,87287	1,18457
6,71525	1,20693

Tabla 4.6 Curva de magnetización de L_{Y12} y L_{Y23}

Flujo magnético, λ (V·s)	Corriente de magnetización, i (A)
0	0
0,45111	0,57302
0,56916	0,626762
0,89317	0,678039
1,82424	0,731325
4,48833	0,829496
6,4747	0,876256
8,80576	0,934255
11,60692	0,971835
14,41116	1,03578
24,12142	1,08522
31,18799	1,132115
35,42936	1,16357

4.4.3 Programa de simulación

En la actualidad, existen diversos programas de simulación de funcionamiento de transformadores. Los más usados son:

- **Pspice:** permite analizar y simular circuitos eléctricos y electrónicos. Para transformadores, posee dos modelos: uno con núcleo magnético lineal y otro con núcleo magnético no lineal [50].
- **EMTP/ATP:** permite modelar sistemas eléctricos, tanto monofásicos como trifásicos, en régimen transitorio. Permite simular diferentes modelos de transformadores, a diferentes frecuencias, y permite estudiar el fenómeno de la ferresonancia [51].
- **Simulink:** programa desarrollado por MathWorks. Permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos multidominio, circuitos eléctricos y electrónicos. Es especialmente utilizado en control automático y procesamiento de señales [52].

- **PSIM:** permite simular circuitos eléctricos y electrónicos. Es utilizado especialmente en simulaciones de electrónica de potencia, y de comportamiento de motores y transformadores. Actualmente, está comenzando a ser utilizado en simulaciones de energías renovables (turbinas eólicas, baterías...) [53].

Los programas nombrados anteriormente poseen ventajas e inconvenientes a la hora de simular el comportamiento de un transformador. EMTP, ATP y Simulink tienen disponibles modelos matemáticos del transformador más complejos que el resto. Sin embargo, su programación es más compleja. Para el estudio del efecto de desequilibrios en el transformador descrito en el apartado 4.4.2 se escogió PSIM como programa de simulación, debido a su sencillez en la programación de la simulación, y la adecuación de los modelos matemáticos disponibles para este estudio.

4.4.4 Estructura de simulaciones y metodología

Para simular el comportamiento del transformador frente a desequilibrios de tensión se utilizó el modelo de transformador descrito en el apartado 4.3.4. Para alimentar el transformador se utilizó una fuente trifásica (Fig. 4.8). La tensión nominal de alimentación del primario fue de 12470 V. Para generar cada desequilibrio, se multiplicaba la tensión de alimentación por un factor en cada fase.

La Fig. 4.9 muestra el esquema simplificado del circuito utilizado en las simulaciones. El transformador trifásico estaba alimentado por el devanado primario mediante una fuente trifásica, y a su vez, el transformador estaba alimentando una carga trifásica resistiva conectada en estrella.

Las variables que se fijaron para llevar a cabo las simulaciones fueron:

- Puntos de desequilibrio descritos en el apartado 4.4.1 (índice de carga, valores de V_1 y valores de VUF).
- Se escogió una conexión Dyn, ya que los parámetros fueron estimados para este tipo de conexión. Además, se ha comprobado que cuando existe un desequilibrio, la conexión Dyn, junto a la Yyn, es el tipo de conexión que produce mayor propagación de desequilibrio en la tensión y en la corriente [25].
- Transformador conectado a una carga puramente resistiva.

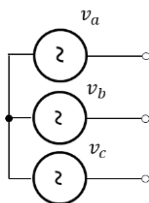


Fig. 4.8 Fuente de alimentación utilizada en las simulaciones

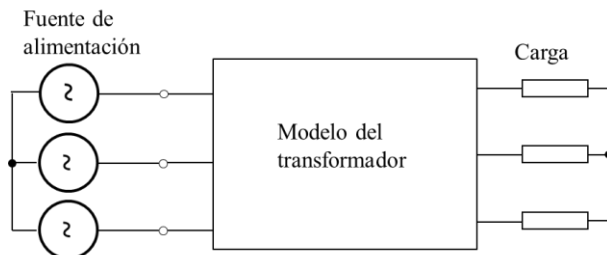


Fig. 4.9 Esquema del circuito utilizado en las simulaciones de desequilibrios

Teniendo en cuenta estas variables, se simularon un total de 120 puntos de desequilibrio de tensión.

En cada simulación, se alimentaba el transformador por el devanado primario con tensiones desequilibradas (definidas por VUF del primario, VUF_p , y V_1), y se tomaban medidas de tensiones y corrientes en los devanados primario y secundario. A partir de estas medidas, un algoritmo diseñado previamente calculaba los factores de desequilibrio: CUF en el devanado primario (CUF_p) y VUF y CUF en el devanado secundario (VUF_s y CUF_s , respectivamente).

4.4.5 Algoritmo de tratamiento de datos

Los datos obtenidos a partir de las simulaciones se analizaron mediante un algoritmo diseñado para tal fin. El diagrama de bloques se puede ver en la Fig. 4.10.

Como datos de entrada del algoritmo, se tomaron las medidas obtenidas en cada simulación de tensiones y corrientes en los devanados primario y secundario. A partir de estos datos, se obtenía una representación gráfica temporal de estas variables.

A partir de los datos de entrada del algoritmo, se calculaban los factores de desequilibrio VUF_p , CUF_p , VUF_s y CUF_s , descritos en el capítulo 2, y en el apartado 4.4.1. Por último, se representaban diferentes gráficas que comparaban la variación CUF_p , VUF_s y CUF_s respecto al VUF_p (para un valor constante de V_1), y respecto a V_1 (para un valor constante de VUF_p).

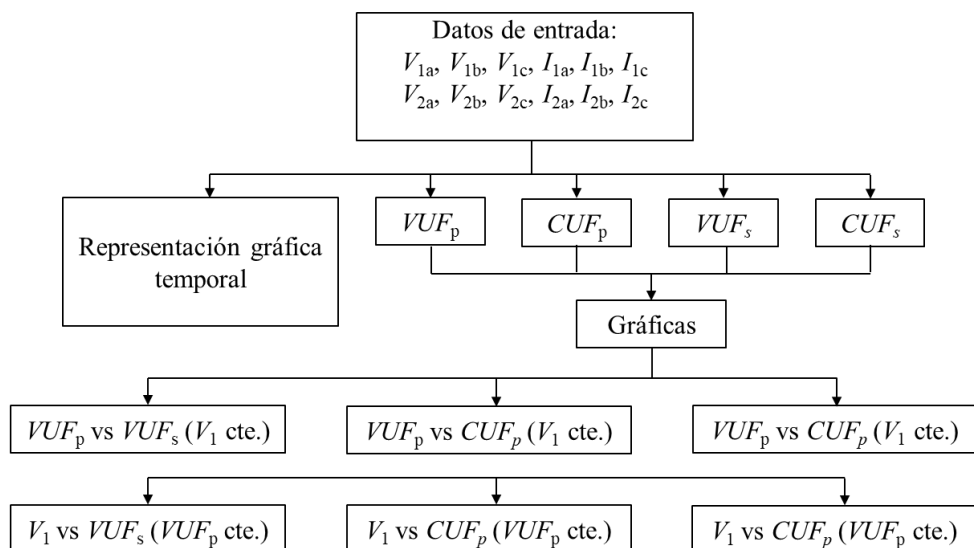


Fig. 4.10 Diagrama de bloques del algoritmo utilizado para el tratamiento de datos obtenidos a partir de las simulaciones

4.5 RESULTADOS OBTENIDOS

4.5.1 Respuesta temporal de tensiones y corrientes

La evolución temporal de corrientes y par del transformador trifásico, cuando fue sometido a los 30 puntos de desequilibrio, fue cualitativamente similar para todos ellos. Se escogió un punto de desequilibrio como ejemplo significativo para mostrar la evolución de las tensiones y de las corrientes. Características del punto de desequilibrio seleccionado: $VUF = 1\%$, $V_1 = 1$ pu y $C = 1$.

La Fig. 4.11 muestra las formas de onda de las tensiones (V_{1p} , V_{2p} y V_{3p}) y las corrientes (I_{1p} , I_{2p} y I_{3p}) en el devanado primario y la Fig. 4.12, las tensiones (V_{1s} , V_{2s} y V_{3s}) y las corrientes en el devanado secundario (I_{1s} , I_{2s} y I_{3s}).

Cuando se somete al transformador a un desequilibrio de tensión en el devanado primario, el desequilibrio se transmite a las tres fases del devanado primario (Fig. 4.11). Sin embargo, las corrientes en el devanado secundario muestran un desequilibrio menor que en el primario. Las tensiones y corrientes de las tres fases del devanado secundario se ven afectadas independientemente de la fase en la que ocurra el desequilibrio de tensión en el primario (Fig. 4.12). En el devanado secundario, puesto que la carga permanece constante, al disminuir el desequilibrio de tensión, el desequilibrio de corriente aumenta.

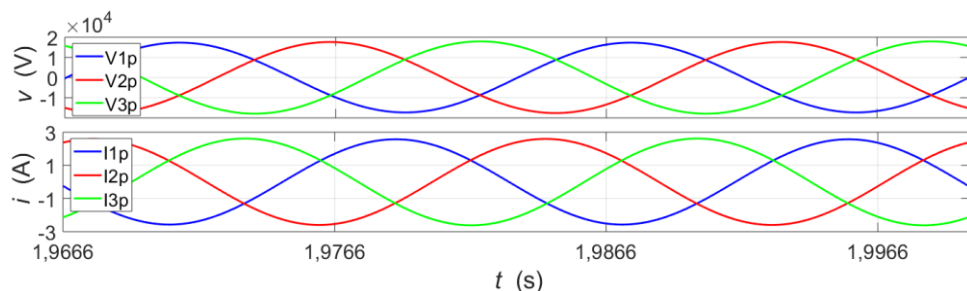


Fig. 4.11 Tensiones y corrientes en el devanado primario del transformador cuando se encuentra sometido a un desequilibrio con $VUF = 1\%$, $V_1 = 1\text{ pu}$ y $C = 1$

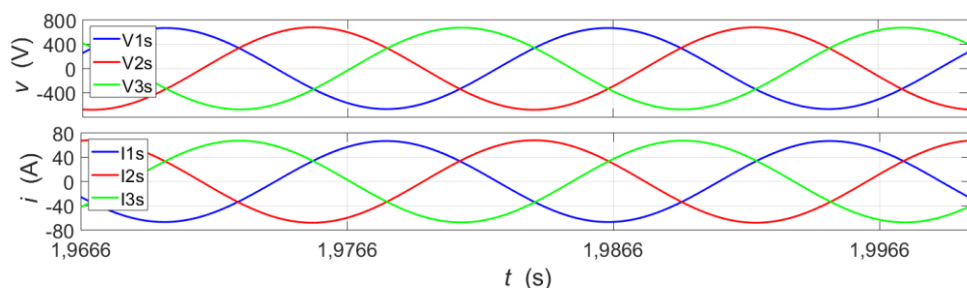


Fig. 4.12 Tensiones y corrientes en el devanado secundario del transformador cuando se encuentra sometido a un desequilibrio con $VUF = 1\%$, $V_1 = 1\text{ pu}$ y $C = 1$

4.5.2 Influencia de los parámetros de los desequilibrios en las tensiones

En este apartado se analiza la influencia de los parámetros VUF_p y V_1 en el desequilibrio de tensión en el secundario. Para ello, se ha analizado dicha influencia mediante el parámetro VUF_s . En todos los casos, como se explicó en el apartado 4.4.4, la conexión del transformador es Dyn, el índice de carga (C) es de 1,00, y el factor de potencia (FP) es de 1,00.

Influencia del VUF_p en el VUF_s

Las características VUF_s vs VUF_p obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.13. Para diferentes valores de V_1 (0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05 y 1,10 pu) se pueden observar valores prácticamente iguales. Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de V_1 .

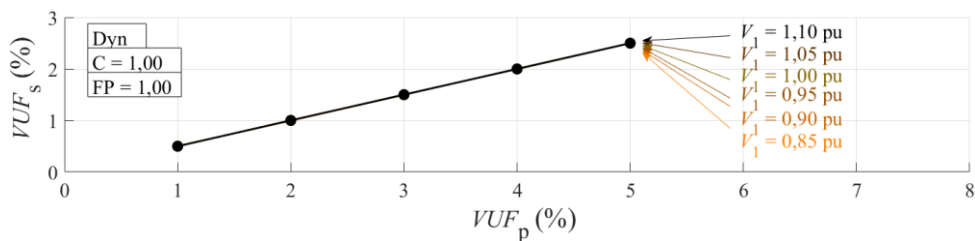


Fig. 4.13 Influencia del VUF_p en el VUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

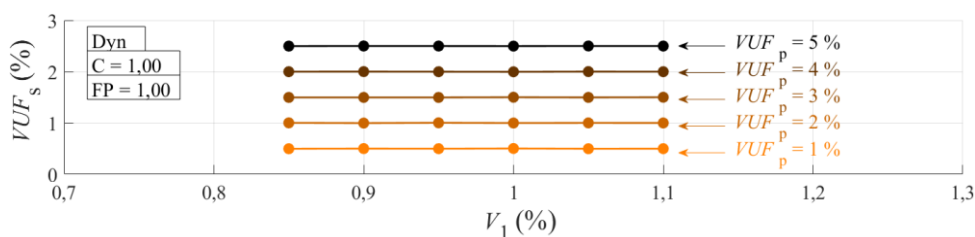


Fig. 4.14 Influencia de V_1 en el VUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

Influencia de V_1 en el VUF_s

Las características VUF_s vs V_1 obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.14. Para diferentes valores de VUF_p (1, 2, 3, 4 y 5 %) y mismo valor de V_1 se pueden observar valores prácticamente iguales de VUF_s . Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de VUF_p .

4.5.3 Influencia de los parámetros de los desequilibrios en las corrientes

En este apartado se analiza la influencia de los parámetros VUF_p y V_1 en el desequilibrio de corrientes del primario y del secundario. Para ello, se ha analizado dicha influencia mediante los parámetros CUF_p y CUF_s . En todos los casos la conexión del transformador es Dyn, el índice de carga (C) es de 1,00, y el factor de potencia (FP) es de 1,00.

Influencia del VUF_p en el CUF_p

Las características CUF_p vs VUF_p obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.15. Para diferentes valores de V_1 (0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05 y 1,10 pu) se pueden observar valores prácticamente iguales. Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de V_1 .

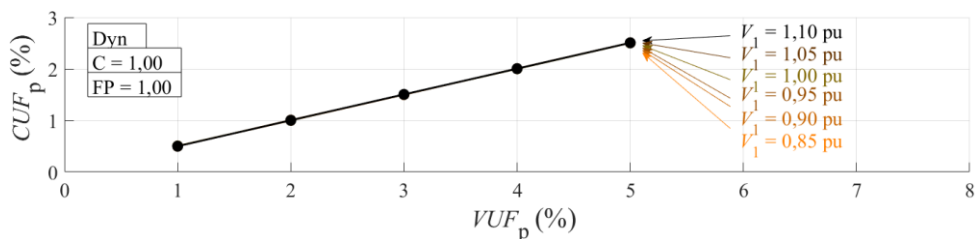


Fig. 4.15 Influencia del VUF_p en el CUF_p cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

Influencia del VUF_p en el CUF_s

Las características CUF_s vs VUF_p obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.16. Para diferentes valores de V_1 (0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05 y 1,10 pu) se pueden observar valores prácticamente iguales. Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de V_1 .

Influencia de V_1 en el CUF_p

Las características CUF_p vs V_1 obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.17. Para diferentes valores de VUF_p (1, 2, 3, 4 y 5 %) y mismo valor de V_1 se pueden observar valores prácticamente iguales de CUF_p . Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de VUF_p .

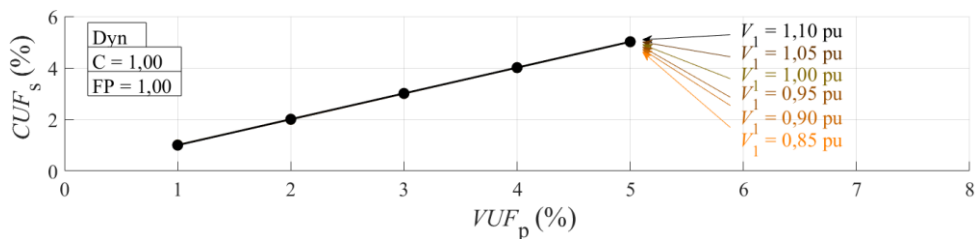


Fig. 4.16 Influencia del VUF_p en el CUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de V_1 , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

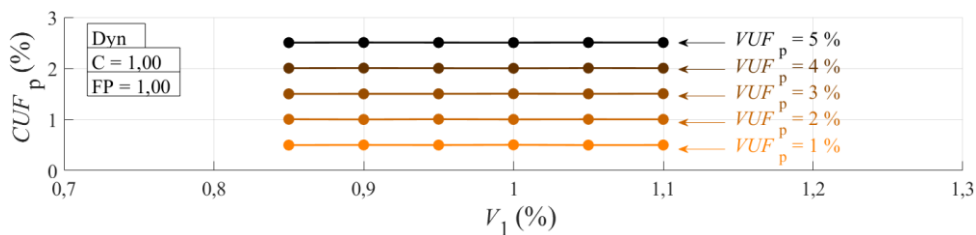


Fig. 4.17 Influencia de V_1 en el CUF_p cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

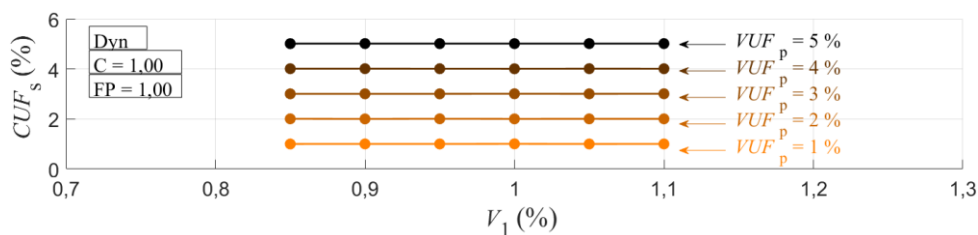


Fig. 4.18 Influencia de V_1 en el CUF_s cuando el transformador está sometido a desequilibrios de tensión, para diferentes valores de VUF_p , conexión Dyn, $C = 1,00$ y $FP = 1$

Influencia de V_1 en el CUF_s

Las características CUF_s vs V_1 obtenidas mediante simulaciones se muestran en la Fig. 4.18. Para diferentes valores de VUF_p (1, 2, 3, 4 y 5 %) y mismo valor de V_1 se pueden observar valores prácticamente iguales de CUF_s . Además, se observan 6 relaciones lineales para cada valor de VUF_p .

4.6 CONCLUSIONES

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en el apartado 4.5, es decir, el efecto que tienen los desequilibrios en las corrientes de los devanados primario y secundario, así como la tensión del devanado secundario, a través de los factores de desequilibrio.

Se observa una relación lineal entre VUF_s , CUF_p y CUF_s respecto a VUF_p para un valor constante de V_1 . También se observa una relación lineal entre VUF_s , CUF_p y CUF_s respecto a V_1 , para un valor constante de VUF_p . Por tanto, conociendo los factores de desequilibrio en un transformador sometido a un desequilibrio de tensión determinado, se pueden estimar los factores de desequilibrio en un caso diferente de desequilibrio.

Cuando se produce un desequilibrio de tensión en el devanado primario del transformador, el desequilibrio se transmite a las tensiones del devanado secundario, las cuales se ven afectadas. El VUF_s es menor que el VUF_p y el CUF_s es mayor que el CUF_p , ya que las corrientes en el secundario son mayores que la corriente nominal para la misma carga.

5 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

5.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es desarrollar una nueva técnica para la estimación de parámetros en un modelo matemático del transformador de 4 parámetros constantes. Se comparó esta técnica con la de estimación de parámetros a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito en un transformador monofásico [54].

5.2 TRANSFORMADOR

El modelo matemático del transformador seleccionado es el representado mediante el circuito equivalente Gamma (Fig. 5.1), donde V_1 es la tensión del devanado primario, V_2' es la tensión del devanado secundario referida al primario, I_1 es la corriente del devanado primario, I_2' es la corriente del devanado secundario referida al primario, I_0 es la corriente de vacío, I_{Fe} es la componente activa de I_0 , I_μ es la componente reactiva de I_0 , R_{cc} es la resistencia de cortocircuito, R_{Fe} es la resistencia asociada a las pérdidas en el núcleo, X_{cc} es la reactancia de cortocircuito y X_m es la reactancia de magnetización. Todos los valores del secundario están referidos al primario.

El transformador monofásico ensayado se muestra en la Fig. 5.2 y sus características en la Tabla 5.1.

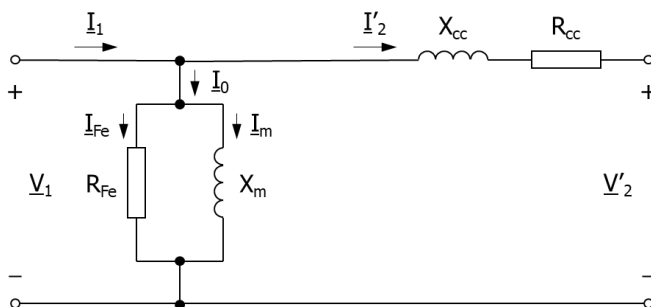


Fig. 5.1 Circuito equivalente del modelo de transformador utilizado

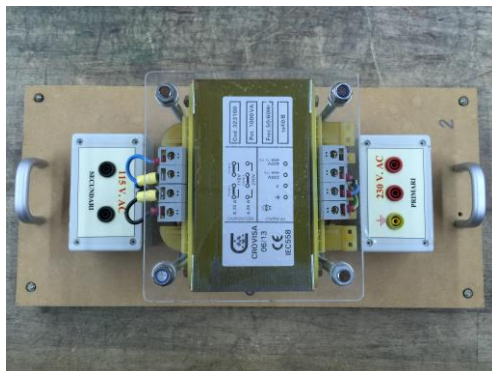


Fig. 5.2 Transformador monofásico

Tabla 5.1 Características del transformador monofásico

	Marca	CROVISA
Potencia (kVA)		1,00
Número de fases		1
Tensión nominal del primario (V)		115
Tensión nominal del secundario (V)		230
Corriente nominal del primario (A)		8,7
Corriente nominal del secundario (A)		4,35

5.3 METODOLOGÍA

Para desarrollar una nueva técnica de estimación de parámetros, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- 1) Ensayos de vacío y cortocircuito del transformador para obtener unos parámetros iniciales
- 2) Ensayos en carga del transformador, con diferentes índices y tipos de carga.
- 3) Diseño de un algoritmo que calcula unos parámetros finales, a partir de la información recogida en 1) y 2).

Cada uno de estos pasos se explica en profundidad en los siguientes apartados.

Tabla 5.2 Valores de consigna para el ensayo de carga del transformador monofásico

$\cos \varphi_2$	C	Tipo de carga
0,70	0,25	R
0,80	0,50	RL
0,90	0,75	
1,00	1,00	

5.3.1 Diseño de los ensayos

Primero se realizaron en el laboratorio ensayos de vacío y cortocircuito para calcular los parámetros iniciales del circuito equivalente del transformador.

Posteriormente se llevaron a cabo diferentes ensayos en carga. Para ello se establecieron los valores de índice de carga y factor de potencia de consigna y, posteriormente, en función de las cargas disponibles en el laboratorio, se determinaron las impedancias para cada uno de los puntos de trabajo que se ajustaban mejor a los valores de consigna.

Los valores de consigna de factor de potencia, índice de carga y tipo de carga se muestran en la Tabla 5.2, para los ensayos del transformador monofásico. La combinación de estos valores da lugar a los 28 puntos de ensayo.

La tensión de consigna durante los ensayos era la tensión nominal del secundario, 230 V. En cada ensayo se midieron: tensión del primario (V_1), corriente del primario (I_1), potencia activa del primario (P_1), potencia reactiva del primario (Q_1), potencia aparente del primario (S_1), factor de potencia del primario ($\cos \varphi_1$), tensión del secundario (V_2), corriente del secundario (I_2), potencia activa del secundario (P_2), potencia reactiva del secundario (Q_2), potencia aparente del secundario (S_2) y factor de potencia del secundario ($\cos \varphi_2$).

5.3.2 Procedimiento de estimación de los parámetros finales

El algoritmo diseñado para la estimación de parámetros del transformador monofásico pretende que las pérdidas eléctricas y la caída de tensión calculadas mediante los parámetros del circuito equivalente, presenten errores inferiores a los obtenidos cuando los parámetros R_{cc} y X_{cc} del circuito equivalente se obtienen mediante el ensayo de cortocircuito. Este hecho se pudo comprobar al ensayar transformadores en el laboratorio para diferentes puntos de carga.

Por tanto, se diseñó un algoritmo que estima los parámetros R_{cc} y X_{cc} del circuito equivalente a partir de los parámetros iniciales del ensayo de cortocircuito, y del ensayo en carga del transformador para diferentes puntos de funcionamiento.

Los parámetros R_{Fe} y X_m , se obtuvieron directamente a partir del ensayo de vacío.

El algoritmo, de forma previa al proceso iterativo, realiza diferentes cálculos: valores mínimo y máximo de los parámetros estimados; reducción de los valores del secundario al primario; cálculo de las pérdidas eléctricas en cada punto del ensayo en carga; cálculo de las pérdidas del circuito magnético; cálculo de la caída de tensión en cada punto del ensayo en carga.

En la primera iteración del algoritmo, los parámetros iniciales son los seleccionados para calcular una función de error, que depende de la caída de tensión y de las pérdidas eléctricas. A partir del error obtenido, el algoritmo calcula un nuevo conjunto de parámetros que en la segunda iteración disminuya el valor de dicho error. Este proceso se repite hasta que el error entre dos iteraciones consecutivas es menor a un error previo establecido, siendo el conjunto de parámetros de la última iteración el seleccionado como parámetros finales.

A continuación, se describe el algoritmo paso a paso:

- 1) Se adaptan las medidas del modelo de transformador utilizado, donde las magnitudes del secundario están referidas al primario, y están relacionadas mediante la relación de transformación m . Por lo tanto:

$$I'_2 = \frac{I_2}{m} \quad (7.1)$$

$$V'_2 = V_2 \cdot m \quad (7.2)$$

$$\bar{I}'_2 = I'_2 \cdot \cos \varphi_2 + j \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (7.3)$$

$$\Delta \bar{V}_{real} = \bar{V}_{1\ real} - \bar{V}'_2 \quad (7.4)$$

- 2) Antes de comenzar la iteración, se definen los límites superior e inferior de R_{cc} y Z_{cc} como:

$$R_{cc}(2) = \frac{R_{cc}(1)}{3} \quad (7.5)$$

$$R_{cc}(3) = R_{cc}(1) \cdot 3 \quad (7.6)$$

$$Z_{cc}(2) = \frac{Z_{cc}(1)}{3} \quad (7.7)$$

$$Z_{cc}(3) = Z_{cc}(1) \cdot 3 \quad (7.8)$$

Siendo $R_{cc}(1)$ y $Z_{cc}(1)$ los valores obtenidos mediante el ensayo de cortocircuito.

- 3) En el bucle iterativo se consideraron dos errores: el error de R_{cc} y el error de Z_{cc} . El error de R_{cc} se calculó mediante las pérdidas eléctricas de potencia P_{Cu} , que se obtienen como:

$$P_{Cu} = P_1 - P_2 - P_{Fe} \quad (7.9)$$

- 4) En cada iteración, para cada valor de R_{cc} , P_{Cu} se calcula como:

$$P_{Cu}(n) = R_{cc}(n) \cdot I_2'^2 \quad (7.10)$$

- 5) Y el error, eP_{Cu} es:

$$eP_{Cu}(n) = P_{Cu\ real} - P_{Cu}(n) \quad (7.11)$$

- 6) R_{cc} se calcula utilizando la primera y la segunda posición del error mínimo, llamadas $pos1$ y $pos2$, y es igual a:

$$R_{cc}(n) = \frac{2}{3} \cdot R_{cc}(pos1) + \frac{1}{3} \cdot R_{cc}(pos2) \quad (7.12)$$

- 7) El error en P_{Cu} , llamado $edifP_{Cu}$, se calcula como:

$$edifP_{Cu} = eP_{Cu}(n) - eP_{Cu}(n - 1) \quad (7.13)$$

- 8) El error en caída de tensión se calcula utilizando la caída de tensión entre el primario y el secundario del transformador:

$$\Delta \bar{V}_{calc} = Z_{cc} \cdot I_2' \cdot (\cos \varphi_{cc} + j \cdot \sin \varphi_{cc}) \quad (7.14)$$

- 9) Para calcular el error, ΔV , se calcula el módulo de $\Delta \bar{V}_{calc}(\Delta V_{calc})$. Por tanto:

$$e\Delta V(n) = \Delta V_{real} - \Delta V_{calc}(n) \quad (7.15)$$

- 10) De la misma manera que se calculó $R_{cc}(n)$, se calcula Z_{cc} para cada iteración:

$$Z_{cc}(n) = \frac{2}{3} \cdot Z_{cc}(pos1) + \frac{1}{3} \cdot Z_{cc}(pos2) \quad (7.16)$$

Donde pos1 y pos2 son en este caso la primera y segunda posición del mínimo error de ΔV , respectivamente.

11) El error edif ΔV es:

$$edif\Delta V = e\Delta V(n) - e\Delta V(n - 1) \quad (7.17)$$

La metodología seguida se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 5.3.

5.4 RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante el algoritmo al utilizar la metodología aplicada en el apartado 6.3, sobre el transformador descrito en el apartado 6.2. Se analizó la influencia de la técnica de estimación de parámetros del transformador en las pérdidas eléctricas y la caída de tensión.

5.4.1 Parámetros estimados

El algoritmo diseñado para estimar los parámetros del modelo matemático seleccionado se nutre de los parámetros estimados mediante la técnica convencional (ensayos de vacío y cortocircuito) y del ensayo del transformador en diferentes puntos de carga (28 puntos) [55].

La Tabla 5.3 muestra los parámetros iniciales y finales del transformador monofásico.

En los parámetros iniciales se observa que X_{cc} es mucho menor que R_{cc} , lo cual no es común en transformadores de estas características. Sin embargo, en los parámetros obtenidos con el algoritmo se observa que X_{cc} es mayor que R_{cc} .

5.4.2 Mejora en el cálculo de las pérdidas eléctricas

En la función de error del algoritmo se tuvo en cuenta el error de pérdidas eléctricas. Para obtener los valores R_{cc} y X_{cc} finales, el algoritmo minimizaba un error que era el sumatorio de los errores en las pérdidas eléctricas y en la caída de tensión (se explica con más detalle en el apartado 5.3.2).

Para analizar la mejora en el cálculo de las pérdidas eléctricas, se tomó como referencia el valor de éstas calculado directamente a partir de los ensayos del laboratorio en diferentes puntos de carga. Dichos valores se compararon con las pérdidas calculadas mediante los parámetros iniciales y finales.

La Fig. 5.4 muestra las pérdidas eléctricas para cada punto de funcionamiento ensayado. Para cualquier índice de carga, se observa que las pérdidas eléctricas calculadas con los

parámetros obtenidos mediante el algoritmo son más próximas a las obtenidas en los ensayos de laboratorio que las obtenidas a partir de los parámetros iniciales.

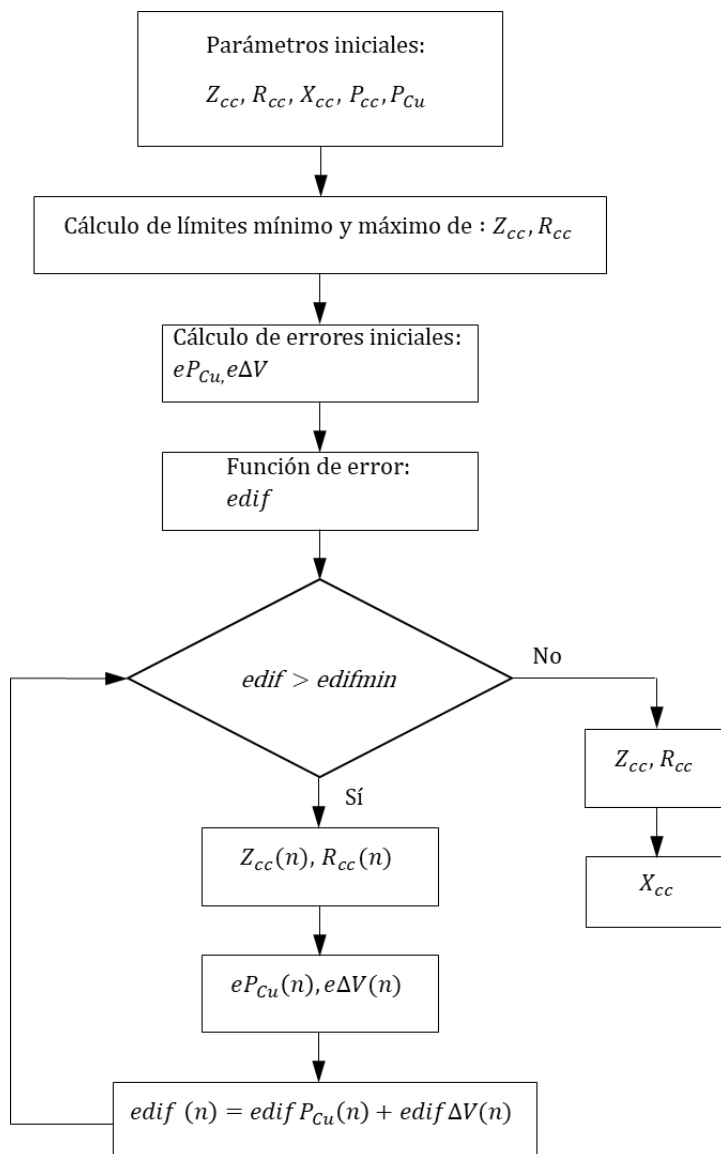


Fig. 5.3 Diagrama de flujo del algoritmo I de estimación de parámetros utilizado en el transformador monofásico

5.4.3 Mejora en el cálculo de la caída de tensión

Para analizar la mejora en el cálculo de la caída de tensión, se tomó como referencia el valor de ésta calculada directamente a partir de los ensayos del laboratorio en diferentes puntos de carga. Dichos valores se compararon con la caída de tensión calculada mediante los parámetros iniciales y finales.

La Fig. 5.4 muestra las caídas de tensión para cada punto de ensayo del transformador. En ella se observa que la caída de tensión calculada con los parámetros finales es más próxima a la real que la obtenida a partir de los parámetros iniciales.

Tabla 5.3 Valores iniciales y finales de R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} del transformador monofásico

	R_{cc}	X_{cc}	Z_{cc}
Inicial	1,786	0,647	2,018
Final	0,859	0,968	1,121

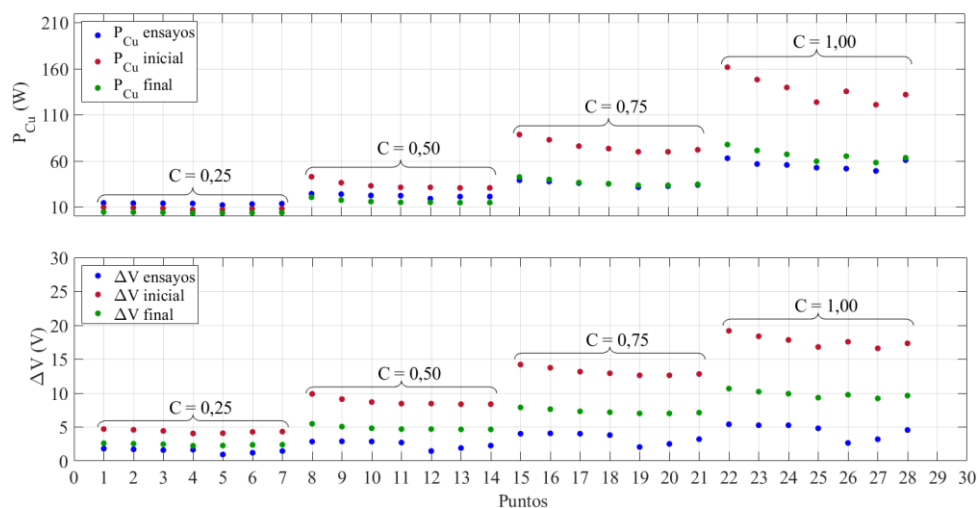


Fig. 5.4 Pérdidas eléctricas de potencia y caída de tensión en el transformador en cada ensayo, calculada a partir de los parámetros iniciales y de los parámetros finales

5.5 CONCLUSIONES

Es posible determinar los parámetros del modelo de transformador monofásico lineal a partir de ensayos de laboratorio utilizando un algoritmo diseñado. Dicho algoritmo, a través de iteraciones, obtiene parámetros más exactos que los calculados mediante los ensayos de vacío y cortocircuito. Se reducen los errores y el algoritmo utilizado es fiable y efectivo.

El método utilizado tiene buenos resultados, pero requiere el uso de diferentes valores y tipos de carga, lo cual no siempre es posible, en particular con transformadores de grandes potencias.

6 CONCLUSIONES

6.1 APORTACIONES

6.1.1 Desequilibrios de tensión

Los desequilibrios de tensión se pueden caracterizar por tipo, VUF , θ_{CVUF} y V_1 . Se ha observado que sólo el VUF y V_1 tienen influencia en el desequilibrio de corriente y en el rizado de par. El tipo y el θ_{CVUF} no tienen influencia.

6.1.2 Efectos de los desequilibrios en el motor de inducción trifásico

Los desequilibrios de tensión provocan desequilibrios en las corrientes del estátor, así como un rizado en el par.

Un desequilibrio de tensión se puede caracterizar únicamente mediante el VUF y V_1 , ya que estos factores de desequilibrio son los únicos que tienen influencia en el CUF y el TRF .

Los desequilibrios de corriente en motores de inducción se pueden caracterizar mediante el $CCUF$, cuyo módulo es CUF y su ángulo es θ_{CCUF} . Únicamente CUF es un parámetro significativo para analizar el efecto de desequilibrios de tensión en la corriente.

En motores de inducción trifásicos sometidos a desequilibrios de tensión existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto al VUF , para valores constantes de V_1 .

En motores de inducción trifásicos sometidos a desequilibrios de tensión existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto a V_1 , para valores constantes de VUF .

El parámetro V_1 tiene más influencia que el parámetro VUF en los efectos en el par y la corriente, ya que la pendiente de las rectas de tendencia que relaciona estos parámetros con el CUF y el TRF es mayor en las rectas de V_1 .

Los valores de CUF obtenidos en el estudio de los efectos de los desequilibrios en motores de inducción presentan un valor cercano a cinco veces el valor del VUF . Por tanto, pequeños desequilibrios de tensión pueden generar grandes desequilibrios de corriente.

6.1.3 Efectos de los desequilibrios en el transformador trifásico

Los desequilibrios de tensión en el devanado primario provocan desequilibrios en las tensiones del secundario y en las corrientes del primario y del secundario.

Los desequilibrios de tensión en el devanado primario se pueden caracterizar por tipo, VUF , θ_{CVUF} y V_1 . Se ha observado que sólo el VUF y V_1 tienen influencia en el desequilibrio de tensión del secundario, y los desequilibrios de corriente del primario y secundario. El tipo y el θ_{CVUF} no tienen influencia.

En transformadores trifásicos sometidos a desequilibrios de tensión existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto al VUF , para valores constantes de V_1 .

En transformadores trifásicos sometidos a desequilibrios de tensión existe una tendencia lineal entre el CUF y el TRF respecto a V_1 , para valores constantes de VUF .

6.1.4 Estimación de parámetros del transformador monofásico

Se pueden estimar los parámetros del modelo de transformador monofásico lineal a partir de ensayos de laboratorio utilizando un algoritmo diseñado.

Se puede diseñar un algoritmo de estimación de parámetros del modelo de transformador monofásico lineal que minimice diferentes errores, como las pérdidas eléctricas del transformador o la caída de tensión en el devanado secundario.

Los parámetros del modelo de transformador monofásico lineal estimados mediante los ensayos de vacío y cortocircuito dan lugar a unos datos de funcionamiento del transformador lejanos a la realidad.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Nueva posible caracterización de los desequilibrios, a partir del VUF y V_1 [30], [56].

En motores de inducción, estudio del efecto de los desequilibrios a partir del modelo de doble jaula [57].

En transformadores trifásicos, estudio de efecto de desequilibrios con diferentes configuraciones de cargas resistivas, inductivas y capacitivas.

En transformadores trifásicos, estudio de efecto de desequilibrios según el tipo de conexión del transformador.

En transformadores trifásicos, estudio de efecto de desequilibrios con cargas no lineales.

En transformadores trifásicos, estudio cuantitativo de cómo cada fase del devanado secundario es afectada por un desequilibrio en el devanado primario.

Estudio del efecto de los desequilibrios en transformadores y motores de inducción cuando el transformador es sometido al desequilibrio y está alimentando al motor de inducción.

Estudio del efecto de los desequilibrios sobre un generador de inducción doblemente alimentado por un transformador trifásico, y sobre el convertidor (posible desarrollo de un sistema de control que actúe para mitigar el efecto de estos desequilibrios sobre el motor) [58].

Estudio del efecto de desequilibrios en transformadores conectados a una microrred híbrida AC/DC [59].

Estimación de parámetros del modelo de transformador lineal en transformadores trifásicos.

Estimación de parámetros del modelo de transformador lineal con carga RLC.

Diseño de un algoritmo de estimación de parámetros que tenga en cuenta en la función de error la corriente del primario, el factor de potencia, el rendimiento y la tensión del devanado primario.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. J. Shin, E. J. Powers, M. Grady, y A. Arapostathis, «Power quality indices for transient disturbances», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, n.º 1, pp. 253-261, 2006.
- [2] S. Elphick, V. Gosbell, V. Smith, S. Perera, P. Ciufu, y G. Drury, «Methods for Harmonic Analysis and Reporting in Future Grid Applications», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, n.º 2, pp. 989-995, 2017.
- [3] AENOR, «IEC 61000-4-30 Compatibilidad electromagnética». p. 41, 2015.
- [4] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York, 2009.
- [5] M. H. J. Bollen y I. Y. H. Gu, *Signal processing on power quality disturbances*. IEEE Press Series on Power Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [6] W. E. Kazibwe, R. J. Ringlee, G. W. Woodzell, y H. M. Sendaula, «Power Quality: A Review», *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 3, n.º 1, pp. 39-42, 1990.
- [7] D. Ivan, G. Lazaroiu, G. Ungureanu, y O. Udrea, «Influence on the power quality of the connection of wind power into the electricity grid transmission», *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, pp. 743-746, 2014.
- [8] L. Monjo, H. Kojooyan-Jafari, F. Corcoles, y J. Pedra, «Squirrel-cage induction motor parameter estimation using a variable frequency test», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, n.º 2, pp. 550-557, 2015.
- [9] M. Z. Fortes, V. H. Ferreira, y A. P. F. Coelho, «The Induction Motor Parameter Estimation Using Genetic Algorithm», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 11, n.º 5, pp. 1273-1278, 2014.
- [10] M. Anwari y A. Hiendro, «New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under-and overvoltage unbalance», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, n.º 3, pp. 619-625, 2010.
- [11] M. Campbell y G. Arce, «Effect of Motor Voltage Unbalance on Motor Vibration: Test and Evaluation», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, n.º 1, pp. 905-911, 2018.
- [12] J. L. Gonzalez-Cordoba, R. A. Osornio-Rios, D. Granados-Lieberman, R. D. J. Romero-Troncoso, y M. Valtierra-Rodriguez, «Thermal-Impact-Based Protection of Induction Motors under Voltage Unbalance Conditions», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, n.º 4, pp. 1748-1756, 2018.
- [13] S. X. Duarte y N. Kagan, «A power-quality index to assess the impact of voltage harmonic distortions and unbalance to three-phase induction motors», *IEEE Trans.*

- Power Deliv.*, vol. 25, n.º 3, pp. 1846-1854, 2010.
- [14] M. Al-Badri, P. Pillay, y P. Angers, «A Novel Technique for in Situ Efficiency Estimation of Three-Phase im Operating with Unbalanced Voltages», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, n.º 4, pp. 2843-2855, 2016.
- [15] V. Sousa, P. R. Viego, J. R. Gómez, E. C. Quispe, y M. Balbis, «Shaft Power Estimation in Induction Motor Operating under Unbalanced and Harmonics Voltages», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, n.º 5, pp. 2309-2315, 2016.
- [16] A. Ferrero y S. Salicone, «An easy VI program to detect transient disturbances in the supply voltage», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, n.º 4, pp. 1471-1474, 2005.
- [17] E. F. Fuchs y M. A. S. Masoum, *Power Conversion of Renewable Energy Systems*. New York, 2011.
- [18] P. S. Moses y M. A. S. Masoum, «Three-phase asymmetric transformer aging considering voltage-current harmonic interactions, unbalanced nonlinear loading, magnetic couplings, and hysteresis», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, n.º 2, pp. 318-327, 2012.
- [19] J. Fraile Mora, *Maquinas Electricas*, 5.ª ed. Aravaca (Madrid): Mc Graw Hill, 2003.
- [20] Y. J. Wang, «Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, n.º 3, pp. 270-275, 2001.
- [21] M. Yang, R. Kazemi, S. Jazebi, D. Deswal, y F. De Leon, «Retrofitting the BCTRAN transformer model with nonlinear magnetizing branches for the accurate study of low-frequency deep saturating transients», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n.º 5, pp. 2344-2353, 2018.
- [22] A. von Jouanne, «Assessment of Voltage Unbalance», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, n.º 4, pp. 1176-1177, 2002.
- [23] R. F. Woll, «Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors», *Ind. Appl. IEEE Trans.*, vol. IA-11, n.º 1, pp. 38-42, 1975.
- [24] M. M. Berndt y N. L. Schmitz, «Derating of Polyphase Induction Motors Operated with Unbalanced Line Voltages», *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 81, n.º 3, 1962.
- [25] A. D. Kolagar, P. Hamedani, y A. Shoulaie, «The effects of transformer connection type on voltage and current unbalance propagation», *2012 3rd Power Electron. Drive Syst. Technol. PEDSTC 2012*, n.º June, pp. 308-313, 2012.

- [26] L. Guasch-Pesquer, L. Youb, F. González-Molina, y E.-R. Zeppa-Durigutti, «Effects of voltage unbalance on torque and current of the induction motors», en *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2012*, 2012, pp. 647-652.
- [27] K. S. Sandhu y V. Chaudhary, «Steady state modelling of induction motor operating with unbalanced supply system», *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 8, n.º 2, pp. 197-206, 2009.
- [28] M. D. de Castro e Silva, A. L. Ferreira Filho, A. B. F. Neves, y M. V. B. Mendonça, «Effects of sequence voltage components on torque and efficiency of a three-phase induction motor», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 942-949, 2016.
- [29] A. Craciunescu, G. S. Ciumbulea, y C. N. Dumitrica, «Space phasor geometrical loci in polar coordinates as voltage unbalance monitoring tool», *2013 - 8th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2013*, pp. 0-3, 2013.
- [30] L. F. Filho De Anésio, M. A. De Oliveira, y S. P. Marcos G. Da, «A computational tool to analyze, quantify and classify voltage imbalance in electrical power systems», *2006 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. TDC'06*, vol. 00, 2006.
- [31] J. Pedra, I. Candela, y L. Sainz, «Modelling of squirrel-cage induction motors for electromagnetic transient programs», *IET Electr. Power Appl.*, vol. 3, n.º 2, pp. 111-122, 2009.
- [32] A. A. Jaramillo Matta, «Estimación de parámetros y efectos de los huecos de tensión en la máquina de inducción trifásica», Universitat Rovira i Virgili, 2010.
- [33] L. Guasch-Pesquer, F. González-Molina, A.-A. Jaramillo-Matta, L. Youb, y J. A. Barrado-Rodrigo, «Análisis del cálculo directo de los parámetros del circuito equivalente en una amplia muestra de motores de inducción trifásicos», en *Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial*, 2015.
- [34] J. Faiz, H. Ebrahimpour, y P. Pillay, «Influence of Unbalanced Voltage on the Steady-State Performance of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor», vol. 19, n.º 4, pp. 657-662, 2004.
- [35] N. Chiesa, «Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation», Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [36] S. Garcia-Rios, J. A. Barrado-Rodrigo, F. Gonzalez-Molina, y L. Guasch-Pesquer, «Voltage and current performance of a three- phase transformer under unbalanced voltage supply», en *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering*, 2018, n.º November.
- [37] M. Steurer, K. Fröhlich, y S. Member, «The Impact of Inrush Currents on the

- Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils», vol. 17, n.º 1, pp. 155-160, 2002.
- [38] A. Avendaño, B. A. Mork, D. Ishchenko, y F. Gonzalez, «Advanced Leakage Inductance Model for Transformer Transient Simulation», en *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018.
- [39] C. M. Arturi, «Transient simulation and analysis of a three-phase five-limb step-up transformer», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, n.º 1, 1991.
- [40] T. Henriksen, «How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models», vol. 17, n.º 2, pp. 516-522, 2002.
- [41] B. A. Mork, «Five-Legged Wound-Core Transformer Model: Derivation, Parameters, Implementation, and Evaluation», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, n.º 4, 1999.
- [42] B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, D. L. Stuehm, y J. Mitra, «Hybrid Transformer Model for Transient Simulation — Part I: Development and Parameters», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, n.º 1, pp. 248-255, 2007.
- [43] D. Deswal y F. De Leon, «Generalized Circuit Model for Eddy Current Effects in Multi-Winding Transformers», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, n.º 2, pp. 1-1, 2019.
- [44] J. A. Martinez y B. A. Mork, «Transformer Modeling for Low- and Mid-Frequency Transients — A Review», vol. 20, n.º 2, pp. 1625-1632, 2005.
- [45] Q. Wu, T. Hong, S. Jazebi, y F. de Leon, «Experimentally Validated Method to Measure the λ -i Characteristics of Asymmetric Three-Phase Transformers», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, n.º 4, pp. 1-9, 2019.
- [46] A. C. Devasthale, «Transient modelling of three-legged amorphous core transformer», Michigan Technological University, 1996.
- [47] B. A. Mork, D. Ishchenko, F. Gonzalez, y S. D. Cho, «Parameter Estimation Methods for Five-Limb Magnetic Core Model», vol. 23, n.º 4, pp. 2025-2032, 2008.
- [48] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, y N. Chiesa, «Implementation and verification of the Hybrid Transformer model in ATPDraw», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, n.º 3, pp. 454-459, 2009.
- [49] M. Lambert, J. Mahseredjian, y M. Mart, «Magnetic Circuits Within Electric Circuits : Critical Review of Existing Methods and New Mutator Implementations», *Trans. Power Deliv.*, vol. 30, n.º 6, pp. 2427-2434, 2015.
- [50] *PSpice Reference guide*. Cadence Design Systems, 2000.

- [51] H. W. Dommel, S. Bhattacharya, V. Brandwajn, H. K. Lauw, y L. Martí, *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory book*, 2nd ed. Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1992.
- [52] *Matlab & Simulink user's guide*. 2019.
- [53] *PSIM User's guide*. 2016.
- [54] R. Kazemi, S. Jazebi, D. Deswal, y F. De León, «Estimation of design parameters of single-phase distribution transformers from terminal measurements», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, n.º 4, pp. 2031-2039, 2017.
- [55] S. Garcia-Rios, L. Guasch-Pesquer, y F. Gonzalez-Molina, «Parameters Estimation of a Transformer from the Load Test», en *Graduate Students Meeting on Electronics Engineering*, 2016.
- [56] A. L. Ferreira Filho, D. C. Garcia, F. A. O. Nascimento, y J. A. A. Cormane, «Study of voltage unbalance conditions based on the behavior of the Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF)», en *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA 2010*, 2011, n.º 1, pp. 184-189.
- [57] L. Guasch-Pesquer, A.-A. Jaramillo-Matta, F. Gonzalez-Molina, y S. Garcia-Rios, «Analysis of Current Unbalance and Torque Ripple generated by simulations of Voltage Unbalance in induction motors», *Appl. Comput. Sci. Eng. Springer*, vol. 742, pp. III-IV, 2017.
- [58] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, y S. Farhangi, «Improved fault ride through strategy for doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults», *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, n.º 8, pp. 1114-1122, 2016.
- [59] L. Meegahapola, I. . Nutkani, y B. McGrath, «Investigation of ride-through capability of ACDC microgrids during AC network faults», *IEEE*, pp. 5-9, 2018.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO I: CÁLCULO DEL *CUF* A PARTIR DEL MODELO DE RÉGIMEN PERMANENTE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN TRIFÁSICA

En el capítulo 4 se estudian los efectos de los desequilibrios de tensión en la máquina de inducción trifásica. En concreto, se analiza el efecto del *VUF* en el *CUF* y en el *TRF*.

A partir de los datos obtenidos en ensayos de laboratorio, se obtienen las corrientes que circulan por cada fase y, con ellas, se calcula el *CUF* para cada punto de desequilibrio. A partir de simulaciones, se puede calcular el *CUF* para los mismos puntos de desequilibrio.

En este anexo, se explica paso a paso una forma alternativa de obtener el *CUF*: a partir del modelo de régimen permanente.

Partiendo de los valores de tensiones de fase en pu, se obtienen las componentes directa e inversa de la tensión, mediante la transformación de Fortescue:

$$\bar{V}_{1F} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{an} + a\bar{V}_{bn} + a^2\bar{V}_{cn}) \quad (8.1)$$

$$\bar{V}_{2F} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{an} + a^2\bar{V}_{bn} + a\bar{V}_{cn}) \quad (8.2)$$

A partir de \bar{V}_1 y \bar{V}_2 , se puede obtener el *VUF* de fase:

$$VUF_F = \left| \frac{\bar{V}_{2F}}{\bar{V}_{1F}} \right| 100 \quad (8.3)$$

El circuito equivalente con cinco parámetros constantes del modelo de jaula sencilla del motor de inducción de la Fig. 2.3 se puede descomponer en dos circuitos, el circuito de componente directa y el circuito de componente inversa, siendo $k = \{1,2\}$. Este circuito se muestra en la Fig. 8.1.

Los valores de deslizamiento de secuencia directa e inversa son:

$$s_1 = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (8.4)$$

$$s_1 = \frac{-n_s - n_n}{-n_s} \quad (8.5)$$

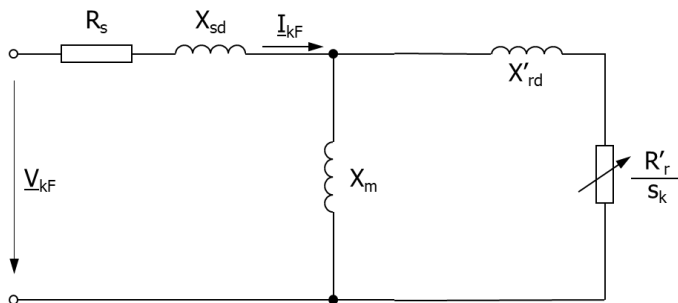


Fig. 8.1 Circuito equivalente con cinco parámetros constantes del modelo de jaula sencilla del motor de inducción de componentes directa e inversa

Resolviendo cada uno de estos circuitos se obtienen los valores de \bar{I}_{1F} e \bar{I}_{2F} , y a partir de ellos se calcula el CUF de fase:

$$CUF_F = \left| \frac{\bar{I}_{2F}}{\bar{I}_{1F}} \right| 100 \quad (8.6)$$

Para poder comparar el CUF obtenido mediante este método con el CUF obtenido en las simulaciones hechas con los datos del motor de laboratorio, se ha de obtener el CUF de línea. Para ello se calculan las corrientes de fase a partir de \bar{I}_{1F} e \bar{I}_{2F} :

$$\begin{aligned} \bar{I}_{aF} &= \bar{I}_{1F} + \bar{I}_{2F} \\ \bar{I}_{bF} &= a^2 \bar{I}_{1F} + a \bar{I}_{2F} \\ \bar{I}_{cF} &= a \bar{I}_{1F} + a^2 \bar{I}_{2F} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Después se calculan las corrientes de línea a partir de las corrientes de fase:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{aF} - \bar{I}_{bF} \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_{bF} - \bar{I}_{cF} \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_{cF} - \bar{I}_{aF} \end{aligned} \quad (8.8)$$

A partir de ellas, se calculan las componentes directa e inversa de las corrientes de línea, y con ellas, el CUF de línea:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (8.9)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (8.10)$$

$$CUF = \left| \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} \right| 100 \quad (8.11)$$

En la Tabla 8.1 se muestran los valores de CUF obtenidos mediante simulación de desequilibrios del motor de inducción del laboratorio (CUF_s), los valores de CUF obtenidos a partir de los datos recogidos en los ensayos de laboratorio del mismo motor (CUF_e) y los valores de CUF obtenidos a partir del método explicado en este anexo (CUF_{rp}).

Tabla 8.1 Valores de CUF obtenidos de diferentes maneras: CUF_e , mediante ensayos de laboratorio, CUF_s , mediante simulaciones, CUF_{rp} , mediante el modelo de régimen permanente, para cada valor de V_{IF} y de VUF

V_{IF}	VUF	CUF_e	CUF_s	CUF_{rp}
0,85	1,00	5,59	5,07	4,54
0,90	1,00	5,96	5,23	4,57
0,95	1,00	6,32	5,45	4,55
1,00	1,00	6,33	5,41	4,59
0,85	2,00	10,24	10,18	9,15
0,90	2,00	10,94	10,63	9,11
0,95	2,00	11,52	10,83	9,15
1,00	2,00	11,68	11,06	9,12
0,85	3,00	15,27	14,95	13,67
0,90	3,00	14,58	15,66	13,67
0,95	3,00	15,31	16,33	13,67
1,00	3,00	17,27	16,61	13,70
0,85	4,00	20,35	19,99	18,26
0,90	4,00	19,62	21,44	18,27
0,95	4,00	23,14	21,93	18,25
1,00	4,00	23,08	22,37	18,24
0,85	5,00	25,60	24,91	22,82
0,90	5,00	24,60	26,99	22,84
0,95	5,00	28,86	27,71	22,83
1,00	5,00	28,38	28,13	22,82



UNIVERSITAT
ROVIRA i VIRGILI