

LISTAS DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS

SF6	Hexafluoruro de Azufre
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
EMTP	Electromagnetic Transients Program
ATP	Alternative Transients Program
TTR	Tensión Transitoria de Restablecimiento
SR	Sin reignición
CR	Con reignición
IEC	International Electrotechnical Commission

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{arco}	Resistencia del arco
G	Conductancia
$P(i)$	Presión interna
Q	Constante de tiempo
N_e	Densidad de electrones
γ	Coefficiente de difusión
β_{e-i}	Coefficiente de recombinación
η	Coefficiente de acoplamiento
α	Coefficiente de ionización
N_+	Densidad de iones positivos
N_-	Densidad de iones negativos
P	Presión
C_i, C_e	Constantes
I_d	Corriente admisible
I_t	Límite de corriente térmica
RRRV	Velocidad de aumento de la TTR
$V=v(t)$	Tensión instantánea
$I=i(t)$	Corriente instantánea
P_o	Potencia de pérdida
U_o	Tensión de Cassie
$f(\dots)$	Operador función
m	Subíndice para valores medidos
c	Subíndice para valores calculados
a	Subíndice para valores aproximados
e	Subíndice para valores estimados
$P_o(g)$	Potencia en función de la conductancia
$U_o(g)$	Tensión en función de la conductancia
$Q(g)$	Constante de tiempo en función de la conductancia
A_p	Coefficiente de la función exponencial para la tensión o la potencia
B_p	Exponente de la función exponencial para la tensión o la potencia
A_q	Coefficiente de la función exponencial para la constante de tiempo
B_q	Exponente de la función exponencial para la constante de tiempo

II-55	Evolución de la tensión de la fórmula de Cassie, según el método de cálculo	II-35
II-56	Evolución de Tita de la fórmula de Cassie, según el método de cálculo	II-36
II-57	Evolución de la potencia de la fórmula de Mayr, según el método de cálculo	II-36
II-58	Evolución de Tita de la fórmula de Mayr, según el método de cálculo	II-37
II-59	Evolución de la tensión de la fórmula de Cassie, según el método de cálculo	II-37
II-60	Evolución de Tita de la fórmula de Cassie, según el método de cálculo	II-38
II-61	Generalización de valores constantes para la potencia de Mayr	II-38
II-62	Generalización de valores variables para la potencia de Mayr	II-39
II-63	Generalización de valores constantes para la constante de tiempo de Mayr	II-39
II-64	Generalización de valores variables para la constante de tiempo de Mayr	II-40
II-65	Generalización de valores constantes para la tensión de Cassie	II-40
II-66	Generalización de valores variables para la tensión de Cassie	II-41
II-67	Generalización de valores constantes para la constante de tiempo de Cassie	II-41
II-68	Generalización de valores variables para la constante de tiempo de Cassie	II-42

I-34	Aproximación para la potencia	I-31
I-35	Aproximación para la constante de tiempo	I-32
I-36	Aproximación para la potencia y la tensión	I-33
I-37	Aproximación para la constante de tiempo	I-33
I-38	Aproximación para la derivada de la conductancia	I-34
I-39	Aproximación para la conductancia	I-35

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL APÉNDICE II

II-1	Posibilidades para representar al arco eléctrico	II-3
II-2	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr	II-10
II-3	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr	II-10
II-4	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr	II-11
II-5	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr	II-11
II-6	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr	II-12
II-7	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-12
II-8	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-13
II-9	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie	II-13
II-10	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-14
II-11	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie	II-14
II-12	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-15
II-13	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas malas)	II-15
II-14	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas buenas)	II-16
II-15	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-16
II-16	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr	II-17
II-17	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr	II-17
II-18	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-18
II-19	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-18
II-20	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr	II-19
II-21	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-19
II-22	Dispersión de valores para la potencia de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-20
II-23	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-20
II-24	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-21
II-25	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie	II-21
II-26	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-22
II-27	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie	II-22
II-28	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie (curvas malas)	II-23
II-29	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie (curvas buenas)	II-23
II-30	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas malas)	II-23
II-31	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas buenas)	II-24
II-32	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-24
II-33	Dispersión de valores para potencia de la fórmula de Mayr	II-25
II-34	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-26
II-35	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-26
II-36	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas malas)	II-26
II-37	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas buenas)	II-27
II-38	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-27
II-39	Dispersión de valores para potencia de la fórmula de Mayr	II-28
II-40	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas malas)	II-28
II-41	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Mayr (curvas buenas)	II-29
II-42	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas malas)	II-29
II-43	Dispersión de valores para la tensión de la fórmula de Cassie (curvas buenas)	II-30
II-44	Dispersión de valores para Tita de la fórmula de Cassie	II-30
II-45	Comparación entre valores de la potencia de la fórmula de Mayr	II-31
II-46	Comparación entre valores de Tita de la fórmula de Mayr	II-31
II-47	Comparación entre valores de la tensión de la fórmula de Cassie	II-32
II-48	Comparación entre valores de Tita de la fórmula de Cassie	II-32
II-49	Comparación entre valores de la potencia de la fórmula de Mayr	II-33
II-50	Comparación entre valores de Tita de la fórmula de Mayr	II-33
II-51	Comparación entre valores de la tensión de la fórmula de Cassie	II-33
II-52	Comparación entre valores de Tita de la fórmula de Cassie	II-34
II-53	Evolución de la potencia de la fórmula de Mayr, según el método de cálculo	II-34
II-54	Evolución de Tita de la fórmula de Mayr, según el método de cálculo	II-35

6-36	Curva límite del interruptor	6-38
6-37	Comparación entre distintos interruptores	6-39
6-38	Comparación entre distintas corrientes	6-40

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 7

7-1	Evolución de las variables eléctricas empleando todo el tiempo	7-7
7-2	Evolución de las variables eléctricas seleccionando el tiempo útil	7-9
7-3	Detalle del circuito eléctrico usado en los ensayos	7-10
7-4	Determinación de los parámetros para el intervalo ± 1 [μs]	7-11
7-5	Resultado de simular el ensayo, con parámetros calculados entre ± 1 [μs]	7-13
7-6	Determinación del nuevo intervalo de tiempo	7-13
7-7	Determinación de los parámetros para el intervalo ± 10 [μs]	7-14
7-8	Resultado de simular el ensayo, con parámetros calculados entre $-10 / +7$ [μs]	7-16
7-9	Resultado de simular el ensayo, con parámetros calculados entre $-30 / +7$ [μs]	7-17
7-10	Comportamiento del modelo de Mayr con parámetros constantes, para simular una apertura	7-20
7-11	Detalle de la apertura con parámetros constantes	7-21
7-12	Comportamiento del modelo de Mayr con parámetros variables, para simular una apertura	7-21
7-13	Detalle de la apertura con parámetros variables	7-22
7-14	Comportamiento del modelo de Cassie con parámetros constantes, para simular una apertura	7-23
7-15	Detalle de la apertura con parámetros constantes	7-23
7-16	Comportamiento del modelo de Cassie con parámetros variables, para simular una apertura	7-24
7-17	Detalle de la apertura con parámetros variables	7-24

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL APÉNDICE I

I-1	Ejemplo de dos oscilogramas, uno con y el otro sin reignición	I-3
I-2	Detalle de los sentidos de recorrido de la curva	I-5
I-3	Detalle del paso por cero de la corriente	I-5
I-4	Errores porcentuales y absolutos según el sentido de digitalización	I-6
I-5	Diagrama de flujo de los programas desarrollados	I-8
I-6	Ejemplo de un archivo de entrada	I-11
I-7	Ejemplo de la presentación en pantalla	I-12
I-8	Ejemplo de un archivo de salida	I-13
I-9	Variación de la tensión durante la reignición del arco	I-14
I-10	Variación de la tensión durante la reignición del arco	I-14
I-11	Variación de la potencia del arco durante la reignición del arco	I-15
I-12	Variación de la conductancia durante la reignición del arco	I-15
I-13	Variación de la resistencia durante la reignición del arco	I-16
I-14	Variación de la derivada de la conductancia durante la reignición del arco	I-16
I-15	Variación de la derivada de la corriente durante la reignición del arco	I-17
I-16	Variación de la derivada de la tensión durante la reignición del arco	I-17
I-17	Variación de la potencia como función de la conductancia	I-18
I-18	Variación de la constante de tiempo como función de la conductancia	I-18
I-19	Potencias calculada y aproximada como funciones de la conductancia	I-19
I-20	Constantes de tiempo calculada y aproximada como funciones de la conductancia	I-20
I-21	Potencias calculada y aproximada en función del tiempo	I-20
I-22	Variación de la constante de tiempo en función del tiempo	I-21
I-23	Derivada de la conductancia calculada y aproximada como función del tiempo	I-21
I-24	Variación de la conductancia en función del tiempo	I-22
I-25	Influencia del coeficiente de suavizado sobre el valor de los parámetros. Ejemplo	I-23
I-26	Influencia del coeficiente de suavizado sobre la aproximación según el modelo. Ejemplo	I-24
I-27	Determinación de la cantidad mínima de puntos de las tablas internas	I-26
I-28	Aproximación para la potencia y la tensión	I-27
I-29	Aproximación para la constante de tiempo	I-28
I-30	Aproximación para la potencia	I-29
I-31	Aproximación para la constante de tiempo	I-29
I-32	Aproximación para la derivada de la conductancia	I-30
I-33	Aproximación para la conductancia	I-31

5-8	Variables eléctricas calculadas y aproximadas para los modelos	5-11
5-9	Dispersión obtenida para el modelo de Mayr	5-18
5-10	Dispersión obtenida para el modelo de Cassie	5-18
5-11	Detalle del circuito eléctrico usado en los ensayos	5-20
5-12	Simulación de una apertura usando el modelo de Mayr con parámetros constantes	5-22
5-13	Simulación de una apertura usando el modelo de Cassie con parámetros constantes	5-23
5-14	Simulaciones variando los parámetros del modelo de Cassie con parámetros constantes	5-24
5-15	Simulación de una apertura usando el modelo combinado con parámetros constantes	5-25
5-16	Simulación de una reignición usando el modelo de Mayr con parámetros constantes	5-26
5-17	Simulación de una reignición usando el modelo de Cassie con parámetros constantes	5-27
5-18	Simulación de una reignición usando el modelo combinado con parámetros constantes	5-28
5-19	Simulación de una apertura usando el modelo de Mayr con parámetros variables	5-29
5-20	Simulación de una apertura usando el modelo de Cassie con parámetros variables	5-30
5-21	Simulación de una reignición usando el modelo de Mayr con parámetros variables	5-31
5-22	Simulación de una reignición usando el modelo de Cassie con parámetros variables	5-32
5-23	Comparación entre modelos para simular una reignición	5-33
5-24	Comparación entre modelos para simular una apertura	5-34
5-25	Circuito utilizado en las simulaciones	5-35
5-26	Simulación de la apertura exitosa del interruptor	5-36
5-27	Detalle de la apertura exitosa del interruptor	5-37
5-28	Simulación de la apertura fallida del interruptor	5-38
5-29	Detalle de la apertura fallida del interruptor	5-38
5-30	Variables eléctricas registradas durante el ensayo	5-40

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 6

6-1	Vista general del IPSEP	6-5
6-2	Detalle del osciloscopio principal y de respaldo utilizados	6-6
6-3	Ejemplo de archivo de salida del osciloscopio empleado	6-6
6-4	Ejemplo de archivo de salida del “UNO”	6-7
6-5	Evolución de la tensión y la corriente durante el ensayo	6-7
6-6	Evolución de la tensión y la corriente en la parte seleccionada	6-8
6-7	Evolución de las variables eléctricas durante un ensayo	6-10
6-8	Detalle del circuito eléctrico y de medición empleados en los ensayos	6-10
6-9	Oscilograma con ángulo de conexión igual a 75°	6-11
6-10	Oscilograma con ángulo de conexión igual a 120°	6-13
6-11	Oscilograma con ángulo de conexión igual a 54°	6-16
6-12	Oscilograma de un ensayo con reignición	6-18
6-13	Gráfica de $P_o = f(Q)$ para los dos ángulos de conexión	6-19
6-14	Evolución de las potencias para todos los ensayos de repetición	6-20
6-15	Evolución de la constante de tiempo para todos los ensayos de repetición	6-20
6-16	Gráfica de $U_o = f(Q)$ para los dos ángulos de conexión	6-21
6-17	Evolución de las tensiones para todos los ensayos de repetición	6-21
6-18	Evolución de la constante de tiempo para todos los ensayos de repetición	6-22
6-19	Gráfica de $P_o = f(Q)$ para las dos corrientes	6-22
6-20	Gráfica de $U_o = f(Q)$ para las dos corrientes	6-23
6-21	Gráfica de $P_o = f(Q)$ para todos los ángulos de conexión	6-23
6-22	Evolución de las potencias para todos los ángulos de conexión	6-24
6-23	Evolución de la constante de tiempo para todos los ángulos de conexión	6-24
6-24	Gráfica de $U_o = f(Q)$ para todos los ángulos de conexión	6-25
6-25	Evolución de las tensiones para todos los ángulos de conexión	6-25
6-26	Evolución de la constante de tiempo para todos los ángulos de conexión	6-26
6-27	Simulación de los ensayos usando el modelo de Mayr con parámetros constantes	6-30
6-28	Simulación de los ensayos usando el modelo de Mayr con parámetros variables	6-30
6-29	Simulación de los ensayos usando el modelo de Cassie con parámetros constantes	6-31
6-30	Simulación de los ensayos usando el modelo de Cassie con parámetros variables	6-32
6-31	Comparación entre las simulaciones y la tensión obtenida para todo el tiempo registrado	6-33
6-32	Comparación entre las simulaciones y la corriente obtenida para todo el tiempo registrado	6-34
6-33	Comparación entre las simulaciones y la tensión obtenida para la región próxima al cero	6-35
6-34	Comparación entre las simulaciones y la corriente obtenida para la región próxima al cero	6-36
6-35	Curva límite del interruptor	6-37

3-30	Aproximación obtenida empleando parámetros variables y método de Amsinck	3-47
------	--	------

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 4

4-1	Circuito eléctrico típico según el método de inyección de corriente	4-6
4-2	Detalle de las zonas de la simulación del ensayo. Valores correspondientes al arco eléctrico	4-8
4-3	Simulación del interruptor con el ATP	4-8
4-4	Apertura simulada con el modelo de Mayr con parámetros constantes	4-10
4-5	Reignición simulada con el modelo de Mayr con parámetros constantes	4-11
4-6	Evolución de los parámetros del modelo de Mayr	4-12
4-7	Detalle de la apertura del arco eléctrico	4-13
4-8	Detalle de la reignición del arco eléctrico	4-13
4-9	Apertura simulada con el modelo de Cassie con parámetros constantes	4-14
4-10	Reignición simulada con el modelo de Cassie con parámetros constantes	4-15
4-11	Evolución de los parámetros del modelo de Cassie	4-16
4-12	Detalle de la apertura del arco eléctrico	4-17
4-13	Detalle de la reignición del arco eléctrico	4-17
4-14	Apertura simulada con el modelo de Mayr+Cassie con parámetros constantes	4-18
4-15	Reignición simulada con el modelo de Mayr+Cassie con parámetros constantes	4-19
4-16	Evolución de los parámetros del modelo combinado	4-20
4-17	Detalle de la apertura del arco eléctrico	4-21
4-18	Detalle de la reignición del arco eléctrico	4-21
4-19	Comportamiento del modelo de Mayr+Cassie para la apertura del arco en el segundo paso por cero de la corriente	4-22
4-20	Comportamiento de las conductancias del modelo	4-23
4-21	Detalle del comportamiento de las conductancias del modelo durante la apertura del arco eléctrico	4-24
4-22	Detalle del comportamiento de las conductancias del modelo durante la reignición del arco eléctrico	4-24
4-23	Comportamiento de las tensiones del modelo	4-25
4-24	Detalle del comportamiento de las tensiones del modelo durante la apertura del arco eléctrico	4-26
4-25	Detalle del comportamiento de las tensiones del modelo durante la reignición del arco eléctrico	4-27
4-26	Comportamiento de las potencias del modelo	4-28
4-27	Detalle del comportamiento de las potencias del modelo durante la apertura del arco eléctrico	4-28
4-28	Detalle del comportamiento de las potencias del modelo durante la apertura del arco eléctrico	4-29
4-29	Apertura simulada con el modelo de Mayr con parámetros variables	4-30
4-30	Reignición simulada con el modelo de Mayr con parámetros variables	4-31
4-31	Evolución de los parámetros del modelo durante la apertura	4-32
4-32	Evolución de los parámetros del modelo durante la reignición	4-33
4-33	Detalle de la apertura del arco eléctrico	4-34
4-34	Detalle de la reignición del arco eléctrico	4-34
4-35	Apertura simulada con el modelo de Cassie con parámetros variables	4-35
4-36	Reignición simulada con el modelo de Cassie con parámetros variables	4-36
4-37	Evolución de los parámetros del modelo durante la apertura	4-37
4-38	Evolución de los parámetros del modelo durante la reignición	4-37
4-39	Detalle de la apertura del arco eléctrico	4-38
4-40	Detalle de la reignición del arco eléctrico	4-38

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 5

5-1	Detalle del oscilograma D1-4949	5-6
5-2	Detalle del oscilograma D2-P817	5-7
5-3	Variables eléctricas registradas durante el ensayo	5-8
5-4	Variables eléctricas calculadas a partir de los datos	5-9
5-5	Variables eléctricas derivadas de los cálculos	5-10
5-6	Variables eléctricas aproximadas calculadas a partir de los datos	5-10
5-7	Variables eléctricas calculadas y aproximadas	5-11

INDICE DE FIGURAS

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 1

1-1	Relación entre tensión nominal y tipo de interruptor	1-6
-----	--	-----

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 2

2-1	Determinación del límite de reignición térmica del interruptor	2-9
2-2	Determinación del límite de reignición dieléctrica del interruptor	2-10
2-3	Determinación del límite de operación exitosa del interruptor	2-11
2-4	Comparación de las RRRV= $f(di/dt)$ para el aire y el SF6	2-12
2-5	Comparación de las RRRV= $f(p)$ para el aire y el SF6	2-12
2-6	Funcionamiento de un interruptor convencional en el ATP	2-16
2-7	Funcionamiento de un interruptor controlado en el ATP	2-17
2-8	Funcionamiento de un interruptor de medición en el ATP	2-18
2-9	Funcionamiento de un interruptor controlado por MODELS en el ATP	2-19

FIGURAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 3

3-1	Representación esquemática del método de Amsinck	3-13
3-2	Representación esquemática del método Generalizado	3-15
3-3	Representación esquemática del método de Ruppe	3-18
3-4	Formato del tipo de datos de los oscilogramas	3-21
3-5	Diagrama de flujo general de los programas desarrollados	3-22
3-6	Posibles resultados para un paso de cálculo del método Simplex	3-24
3-7	Comparación entre las aproximaciones de los programas desarrollados y un software comercial	3-27
3-8	Determinación de la potencia como parámetro constante	3-31
3-9	Determinación de la potencia como función de la conductancia	3-32
3-10	Determinación de la constante de tiempo como parámetro constante	3-32
3-11	Determinación de la constante de tiempo como función de la conductancia	3-33
3-12	Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros constantes	3-34
3-13	Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros variables con la conductancia	3-34
3-14	Comparación entre parámetros constantes y variables usando la ecuación de Cassie	3-35
3-15	Aproximación obtenida con el método de Amsinck para parámetros constantes	3-35
3-16	Aproximación obtenida con el Método Asturiano para parámetros constantes	3-36
3-17	Aproximación obtenida con el método Generalizado para parámetros constantes	3-36
3-18	Aproximaciones obtenidas para los tres métodos usando parámetros variables	3-37
3-19	Aproximaciones obtenidas usando el modelo de Mayr para los tres métodos, considerando constantes a los parámetros	3-38
3-20	Aproximaciones obtenidas usando el modelo de Mayr para los tres métodos, considerando variables a los parámetros	3-39
3-21	Gráfico de la potencia calculada como función de la conductancia para el método Generalizado	3-40
3-22	Gráfico de la tensión calculada como función de la conductancia para el método Generalizado	3-41
3-23	Gráfico de la diferencia entre las derivadas de las conductancias para los dos ensayos	3-41
3-24	Gráfico de la potencia y de la diferencia entre las derivadas de las conductancias para los dos ensayos	3-42
3-25	Conductancia del arco para un ensayo con reignición	3-44
3-26	Aproximación obtenida empleando el modelo de Mayr y parámetros constantes	3-45
3-27	Aproximación obtenida empleando el modelo de Cassie y parámetros constantes	3-46
3-28	Aproximación obtenida empleando parámetros variables	3-46
3-29	Aproximación obtenida empleando parámetros constantes y método de Amsinck	3-47

6-6	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-14
6-7	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-14
6-8	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-15
6-9	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-15
6-10	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-16
6-11	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-17
6-12	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-17
6-13	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-18
6-14	Resumen de valores de los parámetros para los ensayos de repetición	6-26
6-15	Resumen de valores de los parámetros para los ensayos de repetición con corriente de 350 [A]	6-27
6-16	Resumen de valores de los parámetros para los ensayos de repetición con corriente de 850 [A]	6-27
6-17	Resumen de valores de los parámetros para los ensayos de variación del ángulo de conexión	6-28
6-18	Valores de los parámetros usados en las simulaciones	6-29

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 7

7-1	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo ± 1 [μs]	7-12
7-2	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo $-10 / +7$ [μs]	7-15
7-3	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo $-30 / +7$ [μs]	7-17
7-4	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo $-30 / +7$ [μs]	7-18
7-5	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo $-10 / +7$ [μs]	7-19
7-6	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo ± 1 [μs]	7-19

TABLAS CORRESPONDIENTES AL APÉNDICE I

I-1	Resumen de los programas desarrollados	I-7
I-2	Parámetros correspondientes a la cuarta línea	I-9
I-3	Lista de parámetros correspondientes a la graficación	I-10
I-4	Influencia del coeficiente de suavizado en los valores de los parámetros considerados como variables	I-24
I-5	Influencia del coeficiente de suavizado en los valores de los parámetros considerados como constantes	I-25
I-6	Variación de los valores de los coeficientes de la función potencial en función de la cantidad de valores de las tablas internas de los programas	I-26

TABLAS CORRESPONDIENTES AL APÉNDICE II

II-1	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D1	II-4
II-2	Valores de los parámetros variables para el interruptor D1	II-4
II-3	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D1	II-5
II-4	Valores de los parámetros variables para el interruptor D1	II-5
II-5	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D1	II-5
II-6	Valores de los parámetros variables para el interruptor D1	II-5
II-7	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D1	II-6
II-8	Valores de los parámetros variables para el interruptor D1	II-6
II-9	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D2	II-6
II-10	Valores de los parámetros variables para el interruptor D2	II-7
II-11	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D2	II-7
II-12	Valores de los parámetros variables para el interruptor D2	II-7
II-13	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D2	II-8
II-14	Valores de los parámetros variables para el interruptor D2	II-8
II-15	Valores de los parámetros constantes para el interruptor D2	II-9
II-16	Valores de los parámetros variables para el interruptor D2	II-9
II-17	Resumen de valores de los parámetros para interruptores de SF6	II-43

INDICE DE TABLAS

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 2

2-1	Tipos de reignición del arco eléctrico	2-6
2-2	Campo de aplicación de las técnicas de estudio aplicables a interruptores	2-14
2-3	Posibilidades de representación de interruptores en el ATP	2-15

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 3

3-1	Comparación entre los modelos básicos del arco eléctrico	3-6
3-2	Resumen de los modelos avanzados del arco eléctrico	3-8
3-3	Algunas familias de funciones matemáticas	3-13
3-4	Resumen de los programas desarrollados	3-22
3-5	Resumen de los valores de los parámetros según el método escogido	3-28
3-6	Comparación entre los valores de P_0 dados y calculados	3-28
3-7	Comparación entre los valores de T_{ita} de la fórmula de Mayr, dados y calculados	3-29
3-8	Comparación entre los valores de U_0 dados y calculados	3-29
3-9	Comparación entre los valores de T_{ita} de la fórmula de Cassie, dados y calculados	3-29

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 4

4-1	Detalle de las zonas representadas en la simulación	4-7
-----	---	-----

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 5

5-1	Valores de parámetros constantes para el interruptor D1	5-12
5-2	Valores de parámetros variables para el interruptor D1	5-12
5-3	Valores de parámetros constantes para el interruptor D1	5-13
5-4	Valores de parámetros variables para el interruptor D1	5-13
5-5	Valores de parámetros constantes para el interruptor D1	5-13
5-6	Valores de parámetros variables para el interruptor D1	5-13
5-7	Valores de parámetros constantes para el interruptor D1	5-14
5-8	Valores de parámetros variables para el interruptor D1	5-14
5-9	Valores de parámetros constantes para el interruptor D2	5-14
5-10	Valores de parámetros variables para el interruptor D2	5-15
5-11	Valores de parámetros constantes para el interruptor D2	5-15
5-12	Valores de parámetros variables para el interruptor D2	5-15
5-13	Valores de parámetros constantes para el interruptor D2	5-16
5-14	Valores de parámetros variables para el interruptor D2	5-16
5-15	Valores de parámetros constantes para el interruptor D2	5-17
5-16	Valores de parámetros variables para el interruptor D2	5-17
5-17	Resumen de los valores de los parámetros para el interruptor D1	5-19
5-18	Resumen de los valores de los parámetros para el interruptor D2	5-19
5-19	Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo ± 4 [μ s]	5-20
5-20	Calidad de las simulaciones	5-34
5-21	Comparación de los valores de los parámetros para distintas mezclas de gases	5-41

TABLAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 6

6-1	Tipos de interruptores ensayados	6-6
6-2	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-11
6-3	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-12
6-4	Valores obtenidos para el modelo de Mayr	6-12
6-5	Valores obtenidos para el modelo de Cassie	6-13

II-6.1.2	Modelo de Cassie	II-35
II-6.2	Interruptor D2	II-36
II-6.2.1	Modelo de Mayr	II-36
II-6.2.2	Modelo de Cassie	II-37
II-7	Generalización de valores de parámetros para interruptores de SF6	II-38
II-7.1	Modelo de Mayr	II-38
II-7.1.1	Potencia	II-38
II-7.1.2	Constante de tiempo	II-39
II-7.2	Modelo de Cassie	II-40
II-7.2.1	Tensión	II-40
II-7.2.2	Constante de tiempo	II-41
II-8	Resumen de valores calculados para interruptores de SF6	II-42

APÉNDICE III: ARTÍCULOS PUBLICADOS EN CONGRESOS INTERNACIONALES

III-1	Introducción	III-3
-------	--------------------	-------

I-5.2.5	Derivada de la conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia	I-34
I-5.2.6	Conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia	I-34

APÉNDICE II: GENERALIZACIÓN DE RESULTADOS PARA ± 4 [μ s]

II-1	Introducción	II-3
II-2	Resultados numéricos de emplear la metodología desarrollada	II-4
III.2.1	Interruptor D1	II-4
III.2.1.1	Método de Amsinck	II-4
III.2.1.1.1	Modelo de Mayr	II-4
III.2.1.1.2	Modelo de Cassie	II-5
III.2.1.2	Método Asturiano	II-5
III.2.1.2.1	Modelo de Mayr	II-5
III.2.1.2.2	Modelo de Cassie	II-6
III.2.2	Interruptor D2	II-6
III.2.2.1	Método de Amsinck	II-6
III.2.2.1.1	Modelo de Mayr	II-6
III.2.2.1.2	Modelo de Cassie	II-7
III.2.2.2	Método Asturiano	II-8
III.2.2.2.1	Modelo de Mayr	II-8
III.2.2.2.2	Modelo de Cassie	II-9
II-3	Generalización de los resultados obtenidos	II-9
II-3.1	Interruptor D1	II-10
II-3.1.1	Modelo de Mayr	II-10
II-3.1.1.1	Parámetros constantes	II-10
II-3.1.1.2	Parámetros variables	II-11
II-3.1.1.2.1	Método de Amsinck	II-11
II-3.1.1.2.2	Método Asturiano	II-11
II-3.1.2	Modelo de Cassie	II-13
II-3.1.2.1	Parámetros constantes	II-13
II-3.1.2.2	Parámetros variables	II-14
II-3.1.2.2.1	Método de Amsinck	II-14
II-3.1.2.2.2	Método Asturiano	II-15
II-3.2	Interruptor D2	II-17
II-3.2.1	Modelo de Mayr	II-17
II-3.2.1.1	Parámetros constantes	II-17
II-3.2.1.2	Parámetros variables	II-18
II-3.2.1.2.1	Método de Amsinck	II-18
II-3.2.1.2.2	Método Asturiano	II-19
II-3.2.2	Modelo de Cassie	II-21
II-3.2.2.1	Parámetros constantes	II-21
II-3.2.2.2	Parámetros variables	II-22
II-3.2.2.2.1	Método de Amsinck	II-22
II-3.2.2.2.2	Método Asturiano	II-23
II-4	Comparación entre los propios resultados del Método Asturiano	II-25
II-4.1	Interruptor D1	II-25
II-4.1.1	Modelo de Mayr	II-25
II-4.1.2	Modelo de Cassie	II-26
II-4.2	Interruptor D2	II-28
II-4.2.1	Modelo de Mayr	II-28
II-4.2.2	Modelo de Cassie	II-29
II-5	Comparación entre los resultados del Amsinck y del Asturiano (*CR)	II-30
II-5.1	Interruptor D1	II-31
II-5.1.1	Modelo de Mayr	II-31
II-5.1.2	Modelo de Cassie	II-32
II-5.2	Interruptor D2	II-33
II-5.2.1	Modelo de Mayr	II-33
II-5.2.2	Modelo de Cassie	II-33
II-6	Comparación y unión entre los resultados según los métodos	II-34
II-6.1	Interruptor D1	II-34
II-6.1.1	Modelo de Mayr	II-34

7.1	Introducción	7-5
7.2	El ensayo del interruptor de Vacío	7-6
7.3	Simulaciones de los ensayos	7-9
7.3.1	El circuito utilizado	7-9
7.3.2	Intervalo ± 1 [μ s]	7-10
7.3.2.1	Determinación de los valores de los parámetros	7-10
7.3.2.2	Resultado de la simulación	7-12
7.3.3	Intervalo $-10/+7$ [μ s]	7-13
7.3.3.1	Determinación de los valores de los parámetros	7-14
7.3.3.2	Resultado de la simulación	7-15
7.3.4	Intervalo $-30/+7$ [μ s]	7-16
7.3.4.1	Determinación de los valores de los parámetros	7-16
7.3.4.2	Resultado de la simulación	7-17
7.4	Determinación de los parámetros	7-18
7.5	Variación de los valores de los parámetros	7-19
7.5.1	Modelo de Mayr	7-20
7.5.2	Modelo de Cassie	7-22
7.6	Conclusiones	7-25
7.7	Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 7	7-26

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES, APORTES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

	Resumen	8-3
8.1	Conclusiones generales	8-5
8.2	Aportes realizados	8-6
8.3	Futuras líneas de investigación	8-8

APÉNDICE I: METODOLOGÍA DESARROLLADA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS

I-1	Introducción	I-3
I-2	Digitalización de oscilogramas	I-4
I-2.1	Determinación del mejor sentido de digitalización de un oscilograma	I-4
I-3	Programas para la determinación de los parámetros	I-6
I-3.1	El archivo de entrada	I-8
I-3.2	Presentación en pantalla	I-11
I-3.3	El archivo de salida	I-12
I-3.4	Opciones de graficación	I-13
I-4	Optimización del funcionamiento de los programas	I-22
I-4.1	Optimización del coeficiente de suavizado	I-22
I-4.2	Optimización de la cantidad de puntos de la tabla de entrada	I-25
I-5	Comparación gráfica y numérica entre los resultados de los programas para el mismo oscilograma	I-27
I-5.1	Parámetros constantes	I-27
I-5.1.1	Potencia y tensión calculada y aproximada como funciones de la conductancia	I-27
I-5.1.2	Constante de tiempo calculada y aproximada como función de la conductancia	I-28
I-5.1.3	Potencia calculada y aproximada como función del tiempo	I-28
I-5.1.4	Constante de tiempo como función del tiempo	I-29
I-5.1.5	Derivada de la conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia	I-30
I-5.1.6	Conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia	I-30
I-5.2	Parámetros variables	
I-5.2.1	Potencia y tensión calculada y aproximada como funciones de la conductancia	I-31
I-5.2.2	Constante de tiempo calculada y aproximada como función de la conductancia	I-32
I-5.2.3	Potencia calculada y aproximada como función del tiempo	I-32
I-5.2.4	Constante de tiempo como función del tiempo	I-33

5.6.2.1.2	Utilizando el modelo de Cassie	5-22
5.6.2.1.3	Utilizando el modelo combinado	5-24
5.6.2.2	Simulación de una reignición	5-25
5.6.2.2.1	Utilizando el modelo de Mayr	5-25
5.6.2.2.2	Utilizando el modelo de Cassie	5-27
5.6.2.2.3	Utilizando el modelo combinado	5-28
5.6.3	Empleando parámetros variables	5-29
5.6.3.1	Simulación de una apertura	5-29
5.6.3.1.1	Utilizando el modelo de Mayr	5-29
5.6.3.1.2	Utilizando el modelo de Cassie	5-30
5.6.3.2	Simulación de una reignición	5-30
5.6.3.2.1	Utilizando el modelo de Mayr	5-31
5.6.3.2.2	Utilizando el modelo de Cassie	5-31
5.7	Resumen del comportamiento de los modelos	5-32
5.8	Aplicaciones prácticas	5-34
5.9	Aplicaciones especiales	5-39
5.9.1	Estudio de un interruptor de SF6 y 245 [kV]	5-39
5.9.2	Estudio de un interruptor de 245 [kV] y distintas mezclas de gases	5-40
5.10	Conclusiones	5-41
5.11	Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 5	5-43

CAPÍTULO 6: SIMULACION DE UN INTERRUPTOR DE AIRE EN BAJA TENSION

	Resumen	
6.1	Introducción	6-5
6.2	Los ensayos	6-5
6.3	Metodología empleada	6-6
6.4	Los ensayos realizados	6-10
6.4.1	Ensayos de repetición variando el ángulo de conexión	6-10
6.4.1.1	Repetición con ángulo de 75°	6-11
6.4.1.2	Repetición con ángulo de 120°	6-12
6.4.2	Ensayos de repetición variando la corriente	6-13
6.4.2.1	Corriente igual a 350 [A]	6-14
6.4.2.2	Corriente igual a 850 [A]	6-14
6.4.3	Ensayos de variación del ángulo de conexión	6-15
6.4.4	Ensayos con reigniciones	6-17
6.5	Resultados obtenidos	6-18
6.5.1	Ensayos de repetición variando el ángulo de conexión	6-18
6.5.1.1	Modelo de Mayr	6-19
6.5.1.2	Modelo de Cassie	6-20
6.5.2	Ensayos de repetición variando la corriente	6-22
6.5.3	Ensayos de variación del ángulo de conexión	6-23
6.5.3.1	Modelo de Mayr	6-23
6.5.3.2	Modelo de Cassie	6-24
6.5.4	Resumen de resultados	6-26
6.6	Simulaciones	6-28
6.6.1	Descripción del funcionamiento de los modelos	6-29
6.6.2	Resultados de las simulaciones para todo el ensayo	6-32
6.6.3	Resultados de las simulaciones para la región próxima al cero	6-34
6.7	Aplicaciones	6-36
6.7.1	Determinación de la curva límite de operación del interruptor	6-36
6.7.2	Determinación de la calidad del interruptor	6-38
6.7.3	Comparación entre distintos interruptores	6-39
6.7.4	Comparación entre distintas corrientes	6-40
6.8	Conclusiones	6-41
6.9	Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 6	6-43

CAPÍTULO 7: SIMULACIÓN DE UN INTERRUPTOR DE VACÍO EN MEDIA TENSION

	Resumen	7-3
--	---------------	-----

3.5.1.2	Procedimiento a partir de un ensayo con reigñición	3-24
3.5.1.3	Procedimiento a partir de dos ensayos con apertura	3-25
3.5.1.4	Procedimiento a partir de un único ensayo	3-26
3.5.2	Verificación de las aproximaciones que realizan los programas	3-26
3.5.3	Verificación de los resultados de los programas	3-28
3.6	Comparación gráfica entre las posibilidades para la determinación de los parámetros	3-30
3.6.1	Comparación gráfica entre parámetros constantes y variables	3-30
3.6.2	Comparación gráfica entre los métodos de determinación de parámetros	3-35
3.6.2.1	Análisis en particular del método Generalizado	3-39
3.6.2.2	Análisis comparativo entre el método de Amsinck y el Asturiano	3-43
3.6.3	Comparación gráfica entre los modelos de Mayr y Cassie	3-45
3.7	Conclusiones	3-47
3.8	Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 3	3-50

CAPÍTULO 4: SIMULACION DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA CON EL ATP

	Resumen	4-3
4.1	Introducción	4-5
4.2	El ensayo del interruptor de potencia	4-6
4.2.1	Simulación del ensayo	4-6
4.2.2	Simulación del interruptor	4-8
4.3	Descripción del funcionamiento de los modelos de arco con parámetros constantes	4-9
4.3.1	Modelo de Mayr	4-9
4.3.2	Modelo de Cassie	4-14
4.3.3	Modelo combinado de Mayr+Cassie	4-15
4.3.3.1	Separación del modelo combinado	4-22
4.4	Descripción del funcionamiento de los modelos de arco con parámetros variables	4-29
4.4.1.	Modelo de Mayr	4-29
4.4.2.	Modelo de Cassie	4-35
4.5	Conclusiones	4-39
4.6	Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 4	4-40

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN DE UN INTERRUPTOR DE SF6 EN ALTA TENSION

	Resumen	5-3
5.1	Introducción	5-5
5.2	Oscilogramas empleados	5-6
5.3	Resultados numéricos empleando la metodología desarrollada	5-12
5.3.1	Interruptor D1	5-12
5.3.1.1	Método de Amsinck	5-12
5.3.1.1.1	Modelo de Mayr	5-12
5.3.1.1.2	Modelo de Cassie	5-13
5.3.1.2	Método Asturiano	5-13
5.3.1.2.1	Modelo de Mayr	5-13
5.3.1.2.2	Modelo de Cassie	5-14
5.3.2	Interruptor D2	5-14
5.3.2.1	Método de Amsinck	5-14
5.3.2.1.1	Modelo de Mayr	5-14
5.3.2.1.2	Modelo de Cassie	5-15
5.3.2.2	Método Asturiano	5-16
5.3.2.2.1	Modelo de Mayr	5-16
5.3.2.2.2	Modelo de Cassie	5-17
5.4	Análisis de los resultados	5-17
5.4.1	Observación del grado de dispersión obtenido	5-17
5.4.2	Rango de variación de los valores de los parámetros	5-18
5.5	Generalización de valores para el intervalo ± 4 [μ s]	5-19
5.6	Simulaciones de los ensayos	5-20
5.6.1	Circuito utilizado	5-20
5.6.2	Empleando parámetros constantes	5-21
5.6.2.1	Simulación de una apertura	5-21
5.6.2.1.1	Utilizando el modelo de Mayr	5-21

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Resumen	1-3
1.1 Introducción	1-5
1.2 Justificación e importancia del trabajo	1-7
1.3 Objetivos del trabajo	1-8
1.3.1. Objetivos intrínsecos	1-9
1.4 Estructura de la tesis doctoral	1-9
1.5 Publicaciones en Congresos Internacionales	1-10
1.6 Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 1	1-12

CAPÍTULO 2: REPRESENTACIÓN DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

Resumen	2-3
2.1 El arco eléctrico	2-5
2.2 Herramientas disponibles para el estudio de interruptores	2-6
2.2.1 Modelos tipo “Black Box”	2-7
2.2.2 Modelos físicos del arco eléctricos	2-7
2.2.3 Modelos basados en diagramas	2-9
2.2.4 Ventajas e inconvenientes de las técnicas disponibles	2-13
2.3 Campo de aplicación de las técnicas disponibles	2-13
2.4 El EMTP/ATP	2-14
2.5 Representación del interruptor en el ATP	2-15
2.6 Ejemplos de utilización de interruptores en el ATP	2-16
2.6.1 Interruptor convencional	2-16
2.6.2 Interruptor controlado	2-17
2.6.3 Interruptor estadístico	2-17
2.6.4 Interruptor sistemático	2-18
2.6.5 Interruptor de medición	2-18
2.6.6 Interruptor controlado	2-18
2.7 Conclusiones	2-19
2.8 Referencias bibliográficas correspondientes al Capítulo 2	2-21

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PARA LA MODELIZACIÓN DE INTERRUPTORES

Resumen	3-3
3.1 Introducción	3-5
3.2 Los modelos básicos del arco eléctrico	3-6
3.3 Los modelos avanzados del arco eléctrico	3-7
3.4 El proceso de simulación	3-9
3.4.1 Modelos tipo “Caja Negra”	3-9
3.4.2 Parámetros de la ecuación del modelo	3-10
3.4.3 Determinación de los parámetros de la ecuación del modelo	3-11
3.4.3.1 Métodos para la determinación de los parámetros	3-11
3.4.3.1.1 Método a partir de un ensayo con reignición	3-13
3.4.3.1.2 Método Generalizado	3-15
3.4.3.1.3 Método a partir de varios ensayos de apertura	3-17
3.4.3.1.4 Método Asturiano	3-18
3.4.3.2 Métodos especiales para la determinación de parámetros	3-19
3.4.3.2.1 Circuito especial de inyección de corriente	3-19
3.4.3.2.2 Método de Zuckler	3-20
3.5 Metodología desarrollada para la obtención de los parámetros de la ecuación del modelo de arco	3-20
3.5.1 Programas para la determinación de los parámetros	3-21
3.5.1.1 Procedimientos utilizados según el método escogido	3-23

CONTENIDO

TESIS DOCTORAL	i
Título	i
Resumen	i
Autor	i
Director de Tesis	i
Tutor	i
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO.....	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE FIGURAS	xiv
LISTAS DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	xx
Lista de abreviaturas	xx
Lista de símbolos	xx