

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ELECTRICIDAD**

**INFLUENCIA DEL ARROLLAMIENTO TERCIARIO ANTE CORRIENTES DE
CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES ESTRELLA-ESTRELLA.**

Autor: Borja Sánchez García
Tutor: Ángel Ramos Gómez

Leganés, Junio de 2011



Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	12
1.1 INTRODUCCIÓN	12
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 ESTRUCTURA.....	16
2. EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	18
2.1 EL NÚCLEO MAGNÉTICO	18
2.1.1 <i>Chapa magnética</i>	19
2.1.2 <i>Tipos de núcleos magnéticos</i>	20
2.2 ARROLLAMIENTOS	22
2.2.1 <i>Tipos de conductores</i>	23
2.2.2 <i>Tipos de arrollamientos</i>	25
2.2.3 <i>Disposición de los arrollamientos</i>	28
3. EL ARROLLAMIENTO TERCIARIO.....	30
3.1 NECESIDAD	30
3.2 PROBLEMAS.....	34
3.3 CIRCUITOS EQUIVALENTES	35
3.3.1 <i>Circuito de secuencia directa e inversa</i>	37
3.3.2 <i>Circulación de corrientes de secuencia homopolar</i>	38
3.3.3 <i>Circulación de flujos de secuencia homopolar</i>	39
3.3.4 <i>Circuito de secuencia homopolar</i>	41
4. CORTOCIRCUITOS EN TRANSFORMADORES	44
4.1 RÉGIMEN TRANSITORIO.....	46
4.2 RÉGIMEN PERMANENTE. TIPOS DE CORTOCIRCUITOS	48
4.2.1 <i>Cortocircuito trifásico</i>	48
4.2.2 <i>Cortocircuito monofásico a tierra</i>	49



4.2.3	Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con los neutros de AT y BT puestos a tierra.....	52
4.2.4	Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con uno de los neutros aislados ...	56
4.2.5	Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con ambos neutros aislados.....	58
4.3	EFFECTOS DE UN CORTOCIRCUITO EN UN TRANSFORMADOR	59
5.	ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO	62
5.1	TIPOS DE FUERZAS.....	65
5.1.1	Fuerzas radiales	66
5.1.2	Fuerzas axiales.....	67
5.2	MODOS DE FALLO DE UN TRANSFORMADOR PRODUCIDOS POR LAS FUERZAS DE CORTOCIRCUITO .	69
5.2.1	Tilting.....	69
5.2.2	Bending.....	71
5.2.3	Buckling	72
5.2.4	Fallo por fuerzas radiales de tracción.....	73
6.	RESULTADOS.....	74
6.1	PROGRAMA INFORMÁTICO USADO	75
6.2	TRANSFORMADORES EN ESTUDIO	77
6.3	ESTUDIO PARAMÉTRICO	80
6.3.1	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red.....	81
6.3.1.1	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red en el caso de cortocircuito trifásico en BT.....	82
6.3.1.2	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red sobre la corriente de cortocircuito en caso de cortocircuitos monofásicos en transformadores sin Terciario.....	84
6.3.1.3	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red sobre la corriente de cortocircuito en caso de cortocircuitos monofásicos en transformadores con Terciario.....	87
6.3.2	Influencia del régimen de neutro.....	96
6.3.2.1	Resultados de cortocircuito trifásico en BT.....	96
6.3.2.2	Resultados de cortocircuito monofásico en AT en transformadores con Terciario	97
6.3.2.3	Resultados de cortocircuito monofásico en BT en transformadores con Terciario	100
6.3.2.4	Resultados de cortocircuito monofásico en transformadores sin Terciario	102
6.3.3	Influencia del ratio de impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa ..	106
6.3.3.1	Resultados de cortocircuito trifásico en BT en transformadores con variación de ratio Z_0/Z_1	107
6.3.3.2	Resultados de cortocircuito monofásico para transformadores sin Terciario con variación de ratio Z_0/Z_1	107
6.3.3.3	Resultados de cortocircuito monofásico para transformadores con Terciario con variación de ratio Z_0/Z_1	111
6.3.4	Análisis de la influencia del reparto de la impedancia homopolar Z_{0AB} entre los arrollamientos de AT y de BT en transformadores sin Terciario	114
6.3.4.1	Resultados de cortocircuito trifásico en BT con reparto de la impedancia Z_{0AB}	116
6.3.4.2	Resultados de cortocircuito monofásico en AT con reparto de la impedancia Z_{0AB}	116
6.3.5	Análisis de la influencia de la impedancia magnetizante de secuencia homopolar en transformadores sin Terciario.....	122
6.3.5.1	Resultados de cortocircuito trifásico en BT variando Z_{0M}	123
6.3.5.2	Resultados de cortocircuitos monofásicos variando Z_{0M}	124
6.3.6	Análisis de la influencia de la impedancia homopolar de BT en transformadores con Terciario.....	126
6.3.6.1	Cortocircuito trifásico en BT variando Z_{0BT}	126
6.3.6.2	Cortocircuitos monofásico variando Z_{0BT}	127



6.3.7	Análisis de la influencia del reparto de la impedancia Z_{0AB} entre AT y BT en transformadores con Terciario.....	129
6.3.7.1	Resultados de cortocircuito trifásico en BT variando el reparto Z_{0AB}	130
6.3.7.2	Cortocircuitos monofásico variando el reparto Z_{0AB}	130
7.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	138
7.1	RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO	138
7.2	PRINCIPALES CONCLUSIONES OBTENIDAS	140
7.2.1	Presencia o ausencia del arrollamiento de estabilización	140
7.2.2	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red.....	141
7.2.3	Influencia del régimen de neutro.....	142
7.2.4	Influencia del ratio de impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa .	142
7.2.5	Transformadores Yy: Influencia de la división de la impedancia homopolar Z_{0AB} en sus dos sumandos.....	143
7.2.6	Transformadores Yyd: Influencia de la división de la impedancia homopolar Z_{0AB} en sus dos sumandos.....	143
7.2.7	Influencia del valor de la impedancia magnetizante de secuencia homopolar.....	144
7.2.8	Influencia del valor de la impedancia homopolar de BT.....	144
7.3	SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	144
	REFERENCIAS	146



Índice de figuras

FIGURA 1.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	13
FIGURA 2.2. UNIÓN MEDIANTE TÉCNICA <i>STEP-LAP</i>	19
FIGURA 2.3. CHAPAS MAGNÉTICAS.....	20
FIGURA 2.4. TRANSFORMADORES DE FLUJOS LIBRES.....	21
FIGURA 2.5. TRANSFORMADOR DE FLUJOS LIGADOS.....	22
FIGURA 2.6. BOBINADO DE UN DEVANADO.....	23
FIGURA 2.7. CABLE CONTINUAMENTE TRANSPUESTO.....	24
FIGURA 2.8. DEVANADO POR CAPAS.....	25
FIGURA 2.9. DEVANADO HELICOIDAL.....	26
FIGURA 2.10. DEVANADO POR DISCO.....	27
FIGURA 2.11. DISCOS ENTRELAZADOS.....	28
FIGURA 3.12. ESQUEMA FASORIAL DE SOBRETENSIONES EN FASES.....	31
FIGURA 3.13. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	35
FIGURA 3.14. DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE UN TRANSFORMADOR.....	36
FIGURA 3.15. CIRCUITOS DE SECUENCIA.....	38
FIGURA 3.16. CAMINO COMÚN PARA EL FLUJO HOMOPOLAR EN TRANSFORMADORES ACORAZADOS.....	40
FIGURA 3.17. CAMINO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN UN TRANSFORMADOR DE NÚCLEO TRIFÁSICO.....	41
FIGURA 3.18. DIAGRAMAS DE SECUENCIA ZERO CON Terciario.....	42
FIGURA 3.19. DIAGRAMAS DE SECUENCIA ZERO SIN Terciario.....	43
FIGURA 4.20. ESQUEMA MONOFÁSICO DE UN CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.....	46
FIGURA 4.21. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.....	49
FIGURA 4.22. CIRCUITO PARA HALLAR LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.....	49
FIGURA 4.23. CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO.....	50
FIGURA 4.24. CIRCUITO EQUIVALENTE DE SECUENCIAS EN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO.....	51
FIGURA 4.25. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YNYN.....	53
FIGURA 4.26. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YNYND.....	53
FIGURA 4.27. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YNY.....	56
FIGURA 4.28. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YNYD.....	57
FIGURA 4.29. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YYN.....	57
FIGURA 4.30. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YYND.....	58



FIGURA 4.31. CIRCUITO DE UN CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN UN TRANSFORMADOR YY Y YD.....	59
FIGURA 5.32. ESFUERZOS DE ATRACCIÓN Y REPULSIÓN.....	63
FIGURA 5.33. FLUJO COMÚN (ϕ_M) Y DISPERSO (ϕ_{L1} Y ϕ_{L2}) EN UN TRANSFORMADOR.	63
FIGURA 5.34. TRANSITORIO DE CORRIENTE Y FUERZAS.	64
FIGURA 5.35. LÍNEAS DE FLUJO Y FUERZAS EN LOS DEVANADOS.....	65
FIGURA 5.36. DISTRIBUCIÓN DE LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ (F.M.M.).....	67
FIGURA 5.37. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS AXIALES.....	68
FIGURA 5.38. TILTING.	70
FIGURA 5.39. BENDING.	71
FIGURA 5.40. BUCKLING LIBRE.	72
FIGURA 5.41. BUCKLING FORZADO.....	73
FIGURA 5.42. FUERZAS DE TRACCIÓN.	73
FIGURA 6.43. CIRCUITOS EQUIVALENTES UTILIZADOS.	76
FIGURA 6.44. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DE LOS TRANSFORMADORES EN ESTUDIO CON VARIACIÓN EN SU POTENCIA DE CORTOCIRCUITO.	83
FIGURA 6.45. CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA CORTOCIRCUITOS MONOFÁSICOS.	84
FIGURA 6.46. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN LOS TRANSFORMADORES EN ESTUDIO SIN TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	85
FIGURA 6.47. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A SIN TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	86
FIGURA 6.48. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	87
FIGURA 6.49. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT EN EL TRANSFORMADOR B.....	89
FIGURA 6.50. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR B CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	89
FIGURA 6.51. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR D CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	90
FIGURA 6.52. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT EN EL TRANSFORMADOR K.....	91
FIGURA 6.53. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR K CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	92
FIGURA 6.54. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT EN EL TRANSFORMADOR B.....	93
FIGURA 6.55. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR B CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	94
FIGURA 6.56. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR D CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	94
FIGURA 6.57. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT PARA EL TRANSFORMADOR K.....	95
FIGURA 6.58. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K CON TERCIARIO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	95
FIGURA 6.59. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	97
FIGURA 6.60. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT EN EL TRANSFORMADOR C.....	98
FIGURA 6.61. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR C (220/66 kV BATR) CON TERCIARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	99
FIGURA 6.62. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR E (220/21 kV BART) CON TERCIARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	99
FIGURA 6.63. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR F (136/21 kV TBAR) CON TERCIARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	99



FIGURA 6.64. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR I (45/15 kV TBAR) CON TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	100
FIGURA 6.65. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT EN EL TRANSFORMADOR C.....	101
FIGURA 6.66. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C (220/66 kV BATR) CON TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	101
FIGURA 6.67. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR E (220/21 kV BART) CON TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	102
FIGURA 6.68. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR F (136/21 kV TBAR) CON TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	102
FIGURA 6.69. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR I (45/15 kV TBAR) CON TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	102
FIGURA 6.70. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR C (220/66 kV BATR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	103
FIGURA 6.71. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR E (220/21 kV BART) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	104
FIGURA 6.72. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR F (136/21 kV TBAR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	104
FIGURA 6.73. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR I (45/15 kV TBAR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	104
FIGURA 6.74. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C (220/66 kV BATR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	105
FIGURA 6.75. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR E (220/21 kV BART) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	105
FIGURA 6.76. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR F (136/21 kV TBAR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	105
FIGURA 6.77. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR I (45/15 kV TBAR) SIN TERCARIO VARIANDO EL RÉGIMEN DE NEUTRO.	106
FIGURA 6.78. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT EN EL TRANSFORMADOR B.....	108
FIGURA 6.79. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	109
FIGURA 6.80. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR D SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	109
FIGURA 6.81. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR H SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	109
FIGURA 6.82. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR J SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	110
FIGURA 6.83. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR D SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	110
FIGURA 6.84. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR J SIN TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	110
FIGURA 6.49. CIRCUITO PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT EN EL TRANSFORMADOR B.....	111
FIGURA 6.85. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A CON TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	112
FIGURA 6.86. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR D CON TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	112
FIGURA 6.87. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR H CON TERCARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	113



FIGURA 6.88. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR J CON TERCIARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	113
FIGURA 6.89. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR D CON TERCIARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	114
FIGURA 6.90. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR J CON TERCIARIO CON VARIACIÓN DEL RATIO Z_0/Z_1	114
FIGURA 6.91. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT EN EL TRANSFORMADOR J CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	116
FIGURA 6.92. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	117
FIGURA 6.93. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR B CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	117
FIGURA 6.94. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR C CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	117
FIGURA 6.95. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR D CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	118
FIGURA 6.96. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR E CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	118
FIGURA 6.97. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR F CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	118
FIGURA 6.98. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR G CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	119
FIGURA 6.99. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR H CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	119
FIGURA 6.100. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR I CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	119
FIGURA 6.101. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR J CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	120
FIGURA 6.102. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR K CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	120
FIGURA 6.103. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR B CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	121
FIGURA 6.104. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	121
FIGURA 6.105. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR D CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	121
FIGURA 6.106. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR J CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	122
FIGURA 6.107. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K CON REPARTO DE LA IMPEDANCIA Z_{0AB}	122
FIGURA 6.108. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO Z_{0M}	123
FIGURA 6.109. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0M}	124
FIGURA 6.110. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO Z_{0M}	124
FIGURA 6.111. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0M}	125
FIGURA 6.112. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO Z_{0M}	125
FIGURA 6.113. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0M}	125
FIGURA 6.114. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR F VARIANDO Z_{0BT}	127
FIGURA 6.115. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0BT}	127
FIGURA 6.116. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR F VARIANDO Z_{0BT}	128
FIGURA 6.117. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0BT}	128
FIGURA 6.118. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO Z_{0BT}	128



FIGURA 6.119. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	130
FIGURA 6.120. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR A VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	131
FIGURA 6.121. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR B VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	131
FIGURA 6.122. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	131
FIGURA 6.123. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR D VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	132
FIGURA 6.124. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR E VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	132
FIGURA 6.125. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR F VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	132
FIGURA 6.126. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR J VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	133
FIGURA 6.127. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	133
FIGURA 6.128. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR G VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	134
FIGURA 6.129. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR H VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	134
FIGURA 6.130. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN AT DEL TRANSFORMADOR I VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	134
FIGURA 6.131. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR B VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	135
FIGURA 6.132. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR C VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	136
FIGURA 6.133. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR D VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	136
FIGURA 6.134. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR J VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	136
FIGURA 6.135. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BT DEL TRANSFORMADOR K VARIANDO EL REPARTO DE Z_{0AB} .	137



Índice de tablas

TABLA 3.1. DIFERENCIAS PORCENTUALES ENTRE TENENCIA O NO DE Terciario.	34
TABLA 4.2. TABLA 4 DE LA NORMA IEC 60076-PARTE5.....	48
TABLA 6.3. CARACTERÍSTICAS BASE DE LOS TRANSFORMADORES EN ESTUDIO.	78
TABLA 6.4. IMPEDANCIAS DEL CIRCUITO DE SECUENCIA DIRECTA E IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO DE LOS TRANSFORMADORES EN ESTUDIO.	79
TABLA 6.5. EQUIPOS EN EL ESTUDIO DE VARIACIÓN DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO DE LA RED.	81
TABLA 6.6. EQUIPOS EN EL ESTUDIO DE VARIACIÓN DEL RÉGIMEN DE NEUTRO.	96
TABLA 6.7. EQUIPOS EN EL ESTUDIO DE VARIACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR.	106
TABLA 6.8. EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LAS IMPEDANCIAS HOMOPOLARES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN....	115
TABLA 6.9. EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA IMPEDANCIA MAGNETIZANTE.	123
TABLA 6.10. EQUIPOS EN ENSAYOS CON CIRCUITO EN T PARA TRANSFORMADORES TBAR.	126
TABLA 6.11. EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LAS IMPEDANCIAS HOMOPOLARES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN..	129



Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Solicitaciones en transformadores de potencia

Los transformadores son, junto con los generadores, los equipos más importantes de las redes eléctricas. Sería inimaginable transmitir energía eléctrica a grandes distancias sin estos equipos, ya que con ellos podremos transformar un nivel de tensión a otro superior para así disminuir las corrientes, y por consiguiente atenuar las pérdidas en la transmisión de dicha energía. Bastaría instalar otro transformador cerca de los consumidores, para poder así trabajar con tensiones más bajas que nos permitan tener equipos con menos aislamientos (por lo tanto más económicos), y trabajar con

más seguridad. Si una red no está adecuadamente planificada, un fallo en un transformador puede dejar desabastecida de energía eléctrica a una zona.

Además de la importancia de éstos equipos, los transformadores, junto con los generadores, son los equipos más caros, y en muchos casos incluso son unidades hechas a medida. Para poner en situación se expone un ejemplo: el transformador elevador (19/220 KV) de la central de ciclo combinado de Aceca (400 MW), de una potencia de 500 MVA, tiene un coste de unos 4 millones de euros y es hecho a medida para dicha central, por lo que, si no se dispone de un transformador de reserva, un fallo en dicho equipo podría dejar a la central parada unos seis meses hasta la reposición de éste por uno nuevo.



Figura 1.1. Transformador de potencia.

Por ello se justifica la necesidad de estudiar las contingencias que pudieran ocurrir en la puesta en servicio y explotación de los transformadores de potencia. Estas contingencias producen en el transformador unas sollicitaciones dieléctricas, térmicas y electrodinámicas superiores a las que se tienen en condiciones normales de explotación.



Por lo tanto tendremos que estudiar distintos casos fuera de lo común, pero necesariamente asumibles a lo largo de las distintas etapas de vida de nuestro equipo.

Las solicitaciones dieléctricas, se derivan del campo eléctrico que aparece en los elementos aislantes del transformador. Las solicitaciones habituales corresponden a las tensiones normales de explotación (tensión nominal, tensión más elevada de la red y tensión más elevada del material dieléctrico), solicitaciones especialmente intensas se dan con sobretensiones temporales (a causa de caída brusca de carga o sobretensiones en fases sanas tras un cortocircuito monofásico a tierra), o con sobretensiones transitorias (de frente lento, rápido y muy rápido).

Las solicitaciones térmicas, se refieren al incremento de temperatura del transformador, y dependen de la corriente de carga. Las solicitaciones habituales se tienen con la intensidad normal de explotación (corrientes nominales). Solicitaciones mayores se tienen ante eventuales sobrecargas (sobreintensidades de mayor o menor duración) que padezca el equipo. El caso de un cortocircuito en las inmediaciones del transformador (al fin y al cabo una sobreintensidad para el equipo), podría dar lugar a un aumento de la temperatura dentro del transformador, pero hay que apuntar que existe una inercia térmica al tratarse de un equipo de grandes dimensiones, y a que los tiempos de fallo, hasta ser despejado, son de pocas milésimas de segundo, tiempo insuficiente pues, para provocar un aumento significativo de la temperatura.

Las solicitaciones electrodinámicas, se refieren a las fuerzas de repulsión que aparecen entre arrollamientos y a la capacidad de los apoyos de los arrollamientos de soportar dichas fuerzas. Solicitaciones de magnitud normal se tienen con intensidades de carga o sobrecarga, mientras que las solicitaciones especialmente intensas aparecen en caso de cortocircuitos de los diferentes tipos (monofásicos, bifásicos o trifásicos). Ciertamente es que un equipo de tal calibre, viene respaldado por un gran número de protecciones, que evitarán exponer al transformador a estos fallos por un tiempo relativamente alto, pero dichas protecciones tienen una sensibilidad (umbral de detección) y sobretodo una velocidad de actuación limitada, por lo que los tiempos de disparo de estos dispositivos rondarán los 200-300 ms, con lo que hasta ese tiempo,



nuestro equipo estará expuesto. Dado que las fuerzas de repulsión dependen de la corriente instantánea y que la primera cresta de corriente se produce aproximadamente 10 ms después de ocurrido el cortocircuito, las protecciones son incapaces de evitar este tipo de esfuerzos. Es por ello, que un transformador debe estar diseñado de tal forma que aguante los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito.

De las tres solicitudes apuntadas anteriormente, las que se analizarán en este Proyecto Fin de Carrera son las solicitudes electrodinámicas ante distintos tipos de cortocircuitos en las inmediaciones del equipo, más concretamente en las bornas de éste.

Transformadores Yyd

Históricamente se ha considerado que los transformadores Yy no trabajaban satisfactoriamente debido a la existencia de flujos homopolares en ciertas condiciones de funcionamiento. Sin embargo el transformador Yy presenta numerosas ventajas, tales como la posibilidad de conectar el neutro a tierra, la posibilidad de ubicar el cambiador de tomas en carga en el extremo de neutro (y con ello abaratar el coste del equipo), la no existencia de desfase horario en estos transformadores, etc.

Para poder beneficiarse de las ventajas de los transformadores Yy sin tener sus inconvenientes aparecieron los transformadores Yyd (llamados transformadores con arrollamiento Terciario, o transformadores con arrollamiento de estabilización).

Los transformadores Yyd también presentan ciertos inconvenientes, como son las fuerzas a las que se ve sometido el arrollamiento Terciario en el caso de un cortocircuito monofásico en uno de los lados del transformador y su precio y volumen, algo mayores a los de un transformador Yy.

Como se expondrá en el capítulo 3, las razones que justificaron el uso de transformadores Yyd ya no se dan en muchos casos, y sin embargo los inconvenientes de este tipo de transformadores sí que permanecen.



Por eso, algunas compañías eléctricas no utilizan transformadores con Terciario en ciertos casos y otras compañías se están planteando la posibilidad de no utilizarlos.

1.2 Objetivos

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el estudio de las corrientes de cortocircuito en los arrollamientos de transformadores en configuración estrella-estrella, comparando las que se tienen en transformadores con arrollamiento de estabilización y sin él. En el Proyecto se analizará la influencia de determinados factores, tales como:

- Potencia de cortocircuito de la red.
- Puesta a tierra o no del neutro.
- Valor de la impedancia homopolar del transformador.
- Ubicación relativa entre arrollamientos, en el caso de transformadores Yyd.

1.3 Estructura

La estructura del Proyecto Fin de Carrera es la siguiente:

En el primer capítulo se ha realizado una breve introducción de la importancia de los transformadores de potencia y el porqué debemos hacer un estudio pormenorizado del comportamiento de dicho equipo, centrándonos en el estudio de los esfuerzos electrodinámicos en los arrollamientos ante distintos tipos de cortocircuitos en las inmediaciones del transformador. También se han presentado los objetivos del trabajo a realizar.

En el capítulo 2, se estudian a grandes rasgos, y centrándose en los elementos más sensibles ante esfuerzos electrodinámicos, las partes de los transformadores para poder pues adentrarse en el estudio en profundidad del problema.



En el capítulo 3, se expone de forma más detenida qué es el arrollamiento de estabilización (o Terciario), las ventajas y desventajas que se tendrá a causa de su adición en el transformador, así como la presentación de sus circuitos equivalentes en las distintas secuencias.

El capítulo 4 comienza analizando la evolución de la corriente en caso de cortocircuito, diferenciando el período transitorio y el régimen permanente. Seguidamente se analizan los distintos tipos de cortocircuitos que se estudiarán en este Proyecto, así como los circuitos equivalentes que se han de utilizar para el cálculo de corrientes en cada uno de ellos y la forma de obtener la corriente en cada uno de los arrollamientos. También se tratará sobre las sobretensiones temporales producidas por este tipo de evento en la red y demás efectos adversos.

En el capítulo 5 se muestran los distintos tipos de esfuerzos que se dan en los arrollamientos del transformador en caso de cortocircuito.

En el capítulo 6, se comienza comentando brevemente la herramienta informática usada en el estudio. Acto seguido se indican las características de los transformadores objeto de estudio, así como los casos que se analizarán, tales como los distintos tipos de cortocircuitos, régimen de neutro, existencia o no de Terciario o la explotación o no en triángulo si existiese, según la impedancia de cortocircuito de la red, etc. Como cuerpo principal de este capítulo, se presentan los resultados y se pasa a hacer un análisis de los mismos.

Por último, en el capítulo 7, se expone un breve resumen del trabajo realizado y se extraen las principales conclusiones del estudio, sintetizando los aspectos más destacables y dando recomendaciones para futuros estudios.



Capítulo 2

El transformador de potencia

Para poder adentrarse en este Proyecto Fin de Carrera e ir al tema principal, es necesario ver la constitución física de un transformador, aunque dicho estudio se hará de forma somera y poco profunda. Para ello echaremos un vistazo rápido a las partes más importantes del transformador de potencia, centrándonos algo más en detalle en aquellas partes más críticas para soportar los esfuerzos electrodinámicos producidos por distintos tipos de cortocircuitos.

2.1 El núcleo magnético

En un transformador no existe una conexión eléctrica entre los diferentes arrollamientos. La energía se transfiere desde el arrollamiento primario al secundario por medio del campo magnético. El núcleo magnético está formado por un material

magnético de baja reluctancia, y por tanto es el soporte físico para la circulación de flujo magnético engendrado por la corriente circulante en los arrollamientos.

2.1.1 Chapa magnética

El núcleo magnético está formado por el apilamiento de finas chapas de un material ferromagnético, aisladas entre sí por una capa de Carlite, para minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault (o Eddy). Dicho material ferromagnético seguirá una determinada curva de magnetización (curva B-H), la cual nos dictará las llamadas pérdidas por histéresis.

En transformadores de cierta potencia, donde su tamaño obligue a hacer uniones entre las distintas secciones de chapa magnética, o en el cierre de la culata superior, se hará mediante una técnica llamada *Step-Lap* (*Figura 2.2*), donde se intercalarán las chapas de una sección y la otra, a las cuales se les han propinado unos cortes longitudinales a 45° consiguiendo así que las pérdidas en dichas uniones se vean mermadas [Tra04].

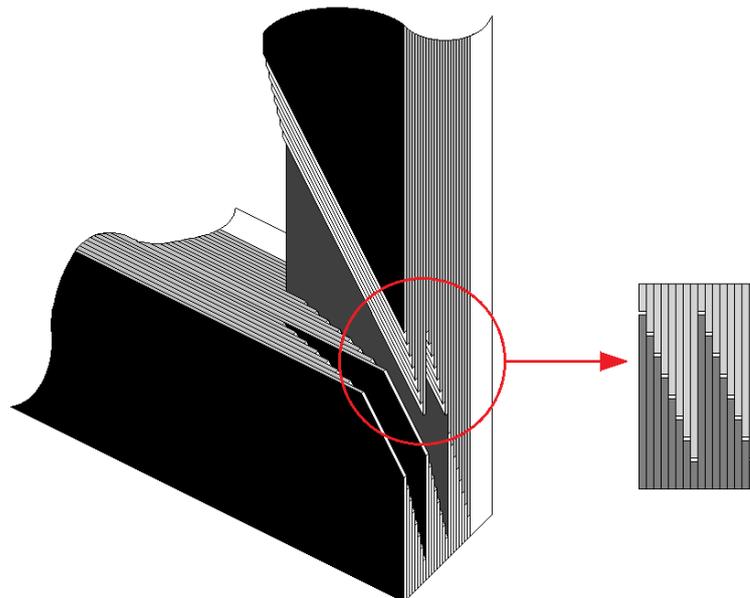


Figura 2.2. Unión mediante técnica *Step-Lap*.

En los inicios, estas chapas magnéticas, se fabricaban laminando el metal ferromagnético en caliente [Kul04]. Este proceso de fabricación nos daba unas altas pérdidas debido a las altas corrientes de vacío ($5\div 15\%$ de la corriente nominal). En los años 80, se empezó la fabricación de chapas magnéticas de grano orientado (GRO), las cuales bajaban dichas corrientes de vacío por debajo del 5% de la corriente nominal. Más tarde se introdujeron las chapas magnéticas amorfas, mejorando drásticamente a las chapas GRO, aunque pronto los fabricantes de éstas, introduciendo técnicas láser en su proceso, consiguen superar a las chapas amorfas bajando la corriente de vacío hasta $0'1\div 0'5\%$ de la corriente nominal (*Figura 2.3*), por lo que en la actualidad, a causa de sus bajas pérdidas y su mayor facilidad de fabricación, será el tipo de chapa más utilizada.

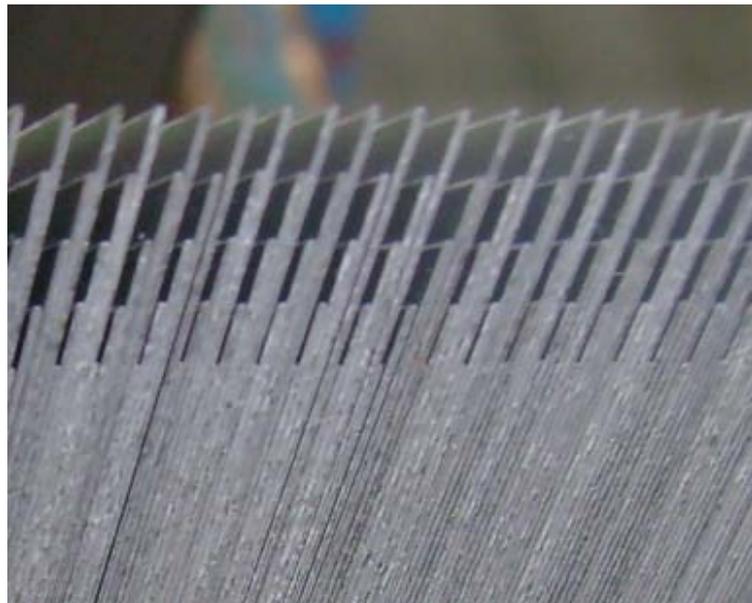


Figura 2.3. Chapas magnéticas.

2.1.2 Tipos de núcleos magnéticos

El núcleo del transformador se compone de columnas (elementos verticales) donde calamos los arrollamientos, y culatas (elementos horizontales), las cuales unen las distintas columnas y es donde se encuentran los elementos de apriete.

Existen varios tipos de núcleos magnéticos, por lo que los englobaremos en dos grandes grupos, los llamados transformadores de flujos libres y los transformadores de flujos ligados.

Los transformadores de flujos libres (*Figura 2.4*) son llamados así porque los flujos de los devanados tienen caminos de baja reluctancia por el que cerrar su camino. Estos equipos serán los bancos de transformadores, transformadores acorazados y transformadores de cinco columnas. Por el contrario, en los transformadores de flujos ligados, es decir, los transformadores de tres columnas, sus flujos deben cerrar su trayectoria por caminos de alta reluctancia, esto es por el hecho de que toda la sección de chapa magnética de las columnas estará utilizada por los arrollamientos. En la parte superior de la columna central (punto A de la *Figura 2.5*), se deben unir los flujos de los tres arrollamientos, por lo que, si no se dimensiona bien, la columna central se podrá colapsar fácilmente, obligando al flujo a cerrar su camino por otros elementos del transformador (caminos de mayor reluctancia), tales como herrajes o elementos de apriete. Por el contrario, reduciremos el uso de chapa magnética en un porcentaje aproximado del 25% respecto, por ejemplo, a un banco de transformadores.

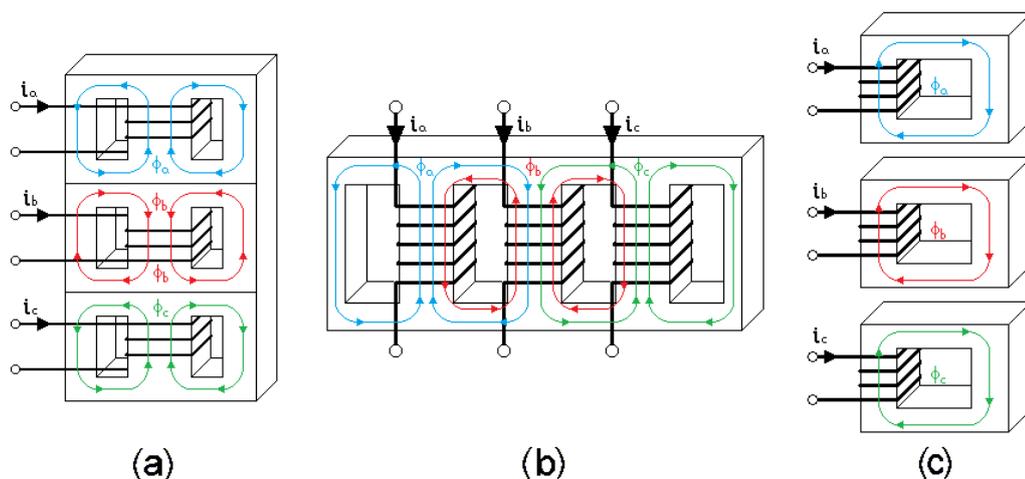


Figura 2.4. Transformadores de flujos libres: a) Acorazado. b) Cinco columnas. c) Banco de transformadores.

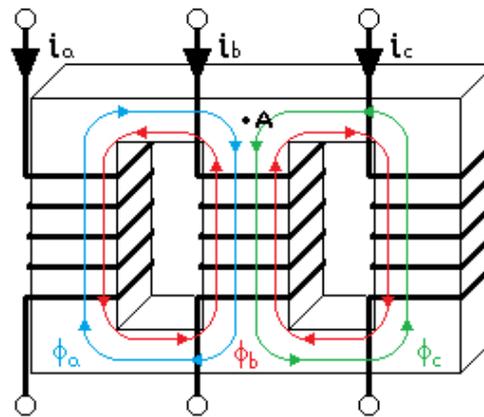


Figura 2.5. Transformador de flujos ligados.

2.2 Arrollamientos

Los arrollamientos serán los encargados de conducir la corriente eléctrica. Estos elementos se compondrán de un elemento conductor eléctrico, normalmente cobre o aluminio, el cual se recubre con un elemento aislante, que dependiendo de la tensión del equipo, podrá ser esmalte, resina o papel impregnado en aceite. Los arrollamientos tendrán también una serie de espaciadores de papel prensado que separarán cada vuelta de conductor del mismo arrollamiento¹, y una serie de listones, del mismo material que los espaciadores, que separan el núcleo magnético de los arrollamientos o los arrollamientos de distinta tensión entre sí como se puede apreciar en la [Figura 2.6](#). El orden de colocación de los arrollamientos respecto al núcleo se discutirá en el punto 2.2.3.

¹ Excepto en el caso de arrollamientos por capas, en el que no existen estos separadores.



Figura 2.6. Bobinado de un devanado.

2.2.1 Tipos de conductores

Antes de desarrollar este punto cabe puntualizar meticulosamente los términos conductor, hilo y cable; aunque en ciertas ocasiones estos términos se puedan utilizar indistintamente para la comprensión del problema. Como conductor entenderemos aquel elemento físico que permite la circulación de corriente. Para la reducción de las pérdidas por corrientes de Foucault, se pueden colocar en paralelo (eléctricamente) dos o más conductores, llamados cada uno de ellos ramal o hilo² [Tra04]. Éstos son aislados entre ellos con esmalte y después todos ellos aislados con papel impregnado en aceite. Este conjunto es llamado cable.

Se puede destacar principalmente la utilización de dos tipos de cables para la construcción de los devanados.

El cable más sencillo usado en transformadores de potencia será una pletina rectangular de cobre o aluminio recubierto de una capa de laca, resina o

² En inglés también llamado *strand*.

en algunos casos papel impregnado en aceite. Su calificativo anglosajón puede diferir dependiendo de la bibliografía consultada (*Flat Wire*, *Magnetic Wire*, etc.). La forma de este conductor será rectangular para poder tener un alto grado de aprovechamiento del espacio, aunque en transformadores de baja potencia se siguen utilizando conductores tradicionales de sección redonda [Ber98].

El elemento conductor usado en altas potencias es el llamado cable continuamente transpuesto (*CTC*), compuesto de un determinado número de hilos tendidos en paralelo (entre 5 y 85 conductores), siendo siempre este número impar por lo que tendremos una transposición de conductor cada cierto espacio, de forma que la resistencia y la f.e.m. de las diferentes ramas en paralelo sean idénticas y se tengan corrientes idénticas en todos los conductores en paralelo (*Figura 2.7*). Estos hilos, además de estar aislados con esmaltes o lacas, es habitual añadirle resina epoxi mediante un tratamiento térmico para aumentar la resistencia mecánica. Esta configuración beneficiará en gran medida en la reducción de las pérdidas por corrientes de Foucault, por lo que será usado principalmente en transformadores de media y alta potencia y no en transformadores de baja potencia, ya que en éstos el beneficio de tener bajas pérdidas no supera el desembolso económico por usar este tipo de cable, mucho más caro que la pletina apuntada en el párrafo anterior.

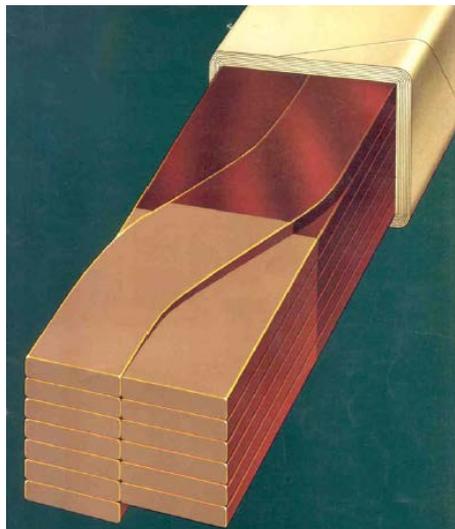


Figura 2.7. Cable continuamente transpuesto.

Una de las sollicitaciones que hay que comprobar, es la capacidad del arrollamiento a soportar distintos esfuerzos a los que se verá sometido, pues de su capacidad a soportar dichas fuerzas nos dará un transformador fiable y duradero.

2.2.2 Tipos de arrollamientos

El devanado más sencillo usado para transformadores de pequeño y mediano tamaño (aunque también usado en el caso del arrollamiento de Regulación de grandes transformadores) es el llamado devanado por capas [Tra04].

Su construcción se basa en el apilamiento del cable conductor de forma helicoidal, sin ningún tipo de intersticio entre las vueltas del conductor a lo largo de la columna como se puede apreciar en la *Figura 2.8*. Pueden existir devanados de una sola capa o devanados de varias capas, en los cuales se arrolla el cable repetidas veces a lo largo de la columna. La secuencia, si se empieza a bobinar por la parte superior, sería el bobinado de arriba a abajo y después de abajo a arriba tantas veces como capas se necesiten.

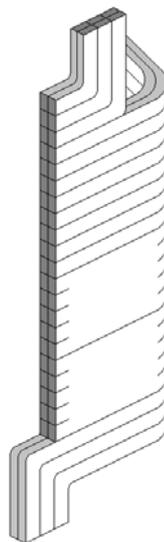


Figura 2.8. Devanado por capas.

Otro devanado, con una construcción similar a la anterior, pero en la que se deja una separación entre vueltas consecutivas del cable, es el llamado devanado helicoidal representado en la *Figura 2.9*. La separación entre las vueltas se consigue con la utilización de unos separadores de papel prensado con una cola de milano para introducir unos listones de pressboard que permitan alinear los separadores.

Este tipo de devanado es adecuado para altas corrientes ya que la refrigeración de este devanado es mucho mejor gracias al uso de los separadores. Por el contrario tendremos la necesidad de usar más espacio comparado con el devanado por capas, por lo que el peso total del transformador será más alto.

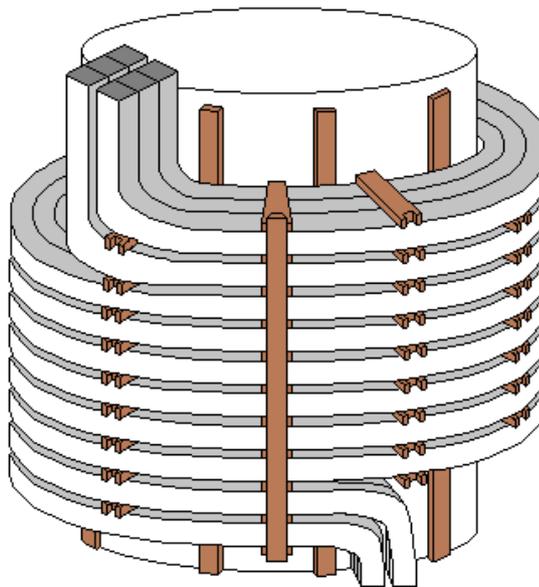


Figura 2.9. Devanado helicoidal.

Por último tendremos el devanado por discos, constituido por el bobinado del cable formando una espiral; formando, cada una de las espirales, un disco (*Figura 2.10*). Para mantener la distancia entre discos se emplean separadores de papel prensado. El cambio de altura, y por tanto de disco, se hará tal como se aprecia en la siguiente figura, es decir una vez por la parte exterior del devanado y otra por la parte interior.

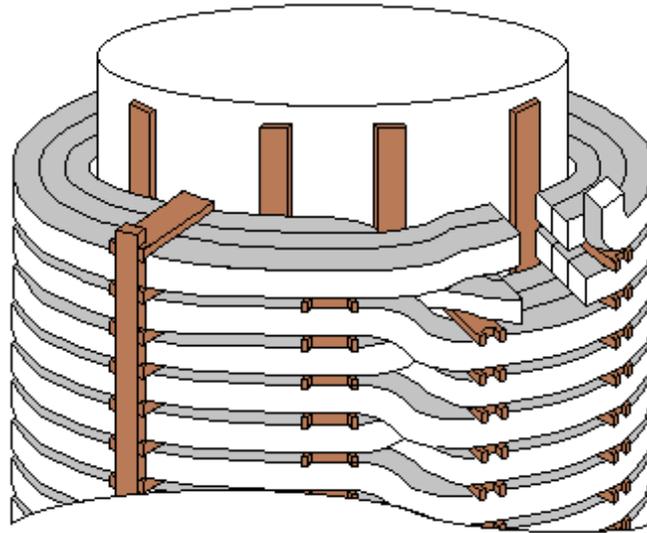


Figura 2.10. Devanado por disco.

Este tipo de arrollamiento se usará cuando el número de vueltas sea elevado, ya que en un arrollamiento helicoidal, la altura de la sección de los cables irá disminuyendo en detrimento del aumento de vueltas. La resistencia mecánica que ofrece esta configuración ante esfuerzos electrodinámicos es similar a la ofrecida por el devanado helicoidal.

Los arrollamientos por discos presentan una elevada capacidad serie, que es favorable para producir un reparto de sobretensiones de tipo impulso más uniforme. No obstante, existen bobinados por discos en los cuales las diferentes espiras están entrelazadas entre sí, con lo que se consigue aumentar todavía más la capacidad serie, un esquema aproximado de esta configuración es el mostrado en la [Figura 2.11](#).

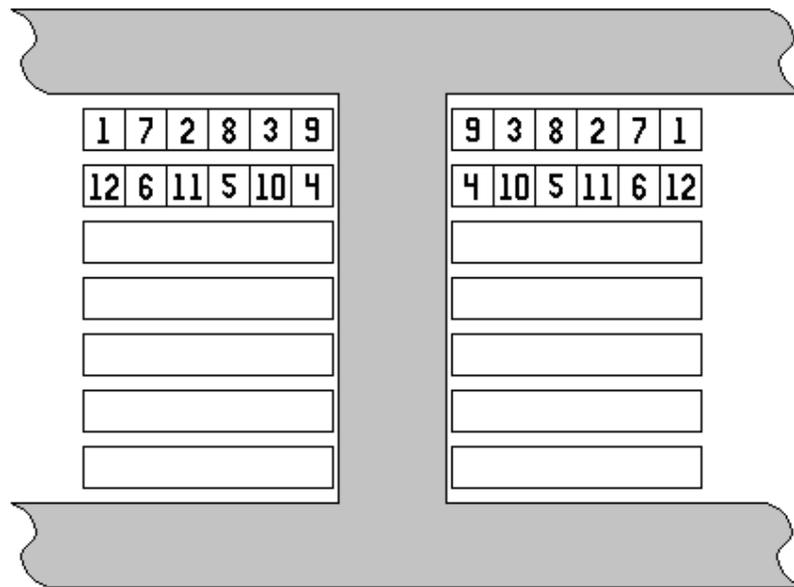


Figura 2.11. Discos entrelazados.

2.2.3 Disposición de los arrollamientos

En transformadores de columnas, los distintos arrollamientos: baja tensión (expresado como B), alta tensión (expresado como A), Regulación (expresado como R) y Terciario (expresado como T); se colocan de forma concéntrica en cada columna del núcleo magnético, por lo que en este apartado se pasa a exponer distintas ordenaciones de éstos.

La disposición clásica de los arrollamientos es la siguiente: Habitualmente el arrollamiento más interno es el arrollamiento Terciario, ya que frecuentemente éste es el arrollamiento de menor tensión y por ello es el más fácil de aislar respecto del núcleo. No obstante, esta configuración debe ser observada con mayor detenimiento, ya que este devanado consta de conductores de menor sección, por tanto más endebles mecánicamente, por lo que debe describir una circunferencia lo más perfecta posible para que en caso de esfuerzos de cortocircuito (en esta posición tendrá esfuerzos de compresión) no



se deforme³. Seguidamente se suele colocar el arrollamiento de baja tensión ya que éste es más fácil de aislar que el arrollamiento de alta tensión [[Fra03](#)].

Tras el arrollamiento de baja tensión se coloca el devanado de alta tensión y seguido de éste se suele colocar el arrollamiento de Regulación, puesto que del mismo se extraen numerosas tomas, siendo mucho más engorroso que este arrollamiento fuera interior.

La anterior es la disposición clásica de los arrollamientos. No obstante, algunos fabricantes colocan el arrollamiento Terciario como el arrollamiento más externo, ya que de esta manera el arrollamiento trabajará a expansión, y es más fácil conseguir que un arrollamiento soporte esfuerzos de expansión que de compresión [[Nor03](#)].

Por último, algunos fabricantes intercalan el devanado de estabilización entre el arrollamiento de AT y el de Regulación para facilitar el ordenamiento de todas las tomas de regulación hacia el cambiador de tomas.

Por lo tanto, se podrá ver y estudiar en este Proyecto Fin de Carrera tres tipos de disposiciones: *TBAR*, *BART* y *BATR*.

³ En este caso se tendrá el fenómeno llamado *buckling*, el cual se explicará en el capítulo 5.



Capítulo 3

El arrollamiento Terciario

3.1 Necesidad

En los inicios del sistema eléctrico trifásico, los transformadores estrella-estrella (frecuentemente bancos de transformación), tenían una serie de problemas en su explotación. Estos problemas eran los siguientes [Ram10]:

- Gran contenido de armónicos en la corriente de vacío si se tiene neutro de retorno, a causa de la no linealidad del material ferromagnético (chapas laminadas en caliente). En particular los terceros armónicos ocasionan distintos problemas por ser armónicos homopolares.
- Si por el contrario, no se tiene neutro de retorno, se producen armónicos de flujo, con las consiguientes sobretensiones fase-neutro.

- Al ser por aquel entonces las redes bastante limitadas en cuanto a consumo, extensión e interconexión con otras redes, existían grandes desequilibrios entre las fases (desequilibrios fase-neutro), lo que producía problemas a la hora de regular la tensión en los transformadores Yyn. Esto ocurría cuando circulaban corrientes de carga desequilibradas en las fases con una componente homopolar de corriente no nula ($\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T \neq 0$); dado que en un transformador Yyn no pueden circular componentes homopolares de corriente por el primario, los amperios-vuelta creados por el secundario, que no están contrarrestados por el primario, producen flujos homopolares causantes de las sobretensiones o subtensiones en las fases como se observan de color rojo en la *Figura 3.12*.

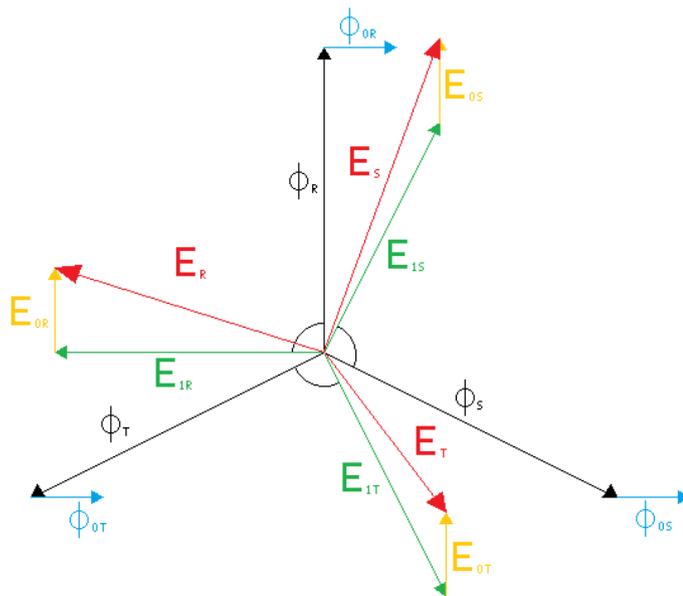


Figura 3.12. Esquema fasorial de sobretensiones en fases.

- Actuaciones de las protecciones de falta a tierra por la circulación de corrientes homopolares, cuando no existe falta alguna.
- Interferencias en las líneas telefónicas unipolares.

Pronto se tomó como medida para evitar dichos problemas, la adición de un tercer arrollamiento conectado en triángulo en el conjunto de las unidades monofásicas.

Este arrollamiento de estabilización se le dotó con el nombre de Terciario, ya que, además de confinar las corrientes homopolares, se utilizó y aún hoy se utiliza en alguna ocasión (aunque rara), como arrollamiento para alimentar los servicios de iluminación y fuerza que utilizaba el retén de las subestaciones, así como la conexión de elementos de compensación de potencia reactiva (batería de condensadores y reactancias inductivas).

La utilización como fuente de alimentación del Terciario está en desuso, ya que el arrollamiento Terciario será más frágil ante un cortocircuito al no estar dimensionado para ello⁴. Esto es especialmente cierto en transformadores en los que se tiene generación tanto en el primario del transformador como en el secundario; en esos casos una falta en el Terciario es alimentada tanto desde el lado de alta como desde el lado de baja, con lo que la corriente de defecto es muy elevada. Es por esto que si se utiliza dicho arrollamiento, se colocan entre las fases, unas pantallas protectoras, y si no se utiliza, se les colocan a los terminales unas caperuzas protectoras.

En la actualidad, el sistema eléctrico está equilibrado (más cuanto más nos alejamos de la carga), con redes malladas, con la mayoría de sus transformadores trifásicos con núcleo magnético de tres columnas en configuración YNy y con chapas magnéticas de grano orientado, lo que hace, principalmente, que los flujos homopolares sean nulos debido a que al estar las corrientes equilibradas éstas carecen de componente homopolar ($\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T = 0$). Las protecciones de falta a tierra tienen un buen funcionamiento aunque existan armónicos, gracias a los avances de la electrónica de control. Las líneas de comunicación se hacen inmunes a interferencias externas gracias a diversas tecnologías como son la fibra óptica, la transmisión inalámbrica, o simplemente el apantallamiento de los conductores y filtrado de su señal.

Todo esto nos lleva a pensar que el arrollamiento Terciario no es muy útil en la actualidad, y ciertas compañías eléctricas tienden a ahorrar dinero con la eliminación de dicho arrollamiento. Ciertamente es que otras compañías aún mantienen esta tecnología, y no

⁴ Los arrollamientos Terciarios se dimensionan para un tercio de la potencia del transformador, por lo que llevan menos cobre que el resto de arrollamientos.

fundamentándose en la práctica de “si funciona para qué quitarlo”, si no en las conclusiones que se enumerarán a continuación:

- La existencia de Terciario hace que la impedancia homopolar sea baja, lo que ocasionará grandes corrientes en caso de falta a tierra, pero a su vez bajas tensiones (sobretensiones) en las fases sanas. Con esto se obtendrá un ahorro en el aislamiento de los equipos, aunque se tendrá que tener gran cuidado en el diseño de los elementos de la red para soportar esfuerzos electrodinámicos, ya que las fuerzas en ellos serán superiores al tener altas corrientes. Esto se verá más adelante, y se podrá comparar varias configuraciones de transformadores con y sin Terciario. Al tener una impedancia homopolar pequeña, el equipo será más favorable para el cumplimiento de las condiciones que garantizan tener el sistema efectivamente puesto a tierra ($X_0/X_1 < 3$ y $R_0/X_1 < 1$), por ello las sobretensiones en las fases sanas no sobrepasarán 1,4 veces la tensión simple de servicio [[Cre75](#)] [[IE391](#)] [[Wil56](#)].
- Los grandes transformadores no guardan una semejanza geométrica con los más pequeños, ya que existe un límite de dimensiones de la cuba, por la necesidad de transportarlo hasta su lugar de explotación, ya sea por carretera o ferrocarril (existencia de gálivos). Esto hace que en el caso de grandes transformadores los arrollamientos se acerquen más a la cuba y por lo tanto el calentamiento de la cuba debido a los flujos de dispersión, que en transformadores más pequeños apenas tenía importancia, cobre ahora protagonismo. De no existir arrollamiento de estabilización, podrían existir puntos calientes en la cuba al atravesarla los flujos dispersos.

3.2 Problemas

El primer problema que cabe comentar es que el coste del transformador es mayor. El uso de arrollamiento Terciario lleva acarreado el uso de más cobre que el necesario para el trasvase de energía entre primario y secundario. Además, el alojar un arrollamiento más, hace que la ventana del transformador tenga mayores dimensiones, por lo que se precisa mayor cantidad de hierro. También tendrán un precio los distintos accesorios que deberemos colocar (terminales, separadores, caperuzas o pantallas, etc.). Por todo esto, el peso y las dimensiones del equipo aumentarán proporcionalmente.

Al aumentar el tamaño las pérdidas en el hierro de estos transformadores serán mayores. Además por el interior del Terciario siempre circularán componentes homopolares de la corriente de vacío o resultantes de pequeños desequilibrios. Otro problema importante será el estudio y dimensionamiento de este transformador ante distintos tipos de cortocircuitos en el lado de alta y el de baja tensión, y no sólo para que los arrollamientos primario y secundario aguanten los esfuerzos producidos por la circulación de altas corrientes, sino para el arrollamiento Terciario, mucho más frágil por tener secciones de conductor inferiores. Otro estudio muy crítico (quizá el más peligroso) es el estudio de cortocircuitos en el propio arrollamiento Terciario, ya que en caso de suceder, el transformador tendría graves desperfectos. Es así que tendremos un gran punto débil localizado en el Terciario.

La *Tabla 3.1* muestra un estudio comparativo entre diferentes factores de un transformador con y sin Terciario.

	Precio	Peso	Dimensiones	Pérdidas
Diseño CON Terciario frente a diseño SIN Terciario	+3 ÷ +6 %	+4 ÷ +10 %	+2 ÷ +8 %	+1 ÷ +4 %

Tabla 3.1. Diferencias porcentuales entre tenencia o no de Terciario⁵ [Ram10].

⁵ Comparación realizada por la información proporcionada por la unidad de Diseño e Innovación de Red AT de Unión Fenosa Distribución.

3.3 Circuitos equivalentes

Para poder abordar los distintos estudios que se realizarán en este Proyecto Fin de Carrera, debemos tener un modelo que se adapte a la realidad de estas máquinas eléctricas, para así, poder hacer los distintos cálculos de corrientes de cortocircuito.

En este documento se estudiarán transformadores en configuración estrella-estrella con distintos regímenes de neutro, así como con presencia y ausencia de arrollamiento Terciario⁶. Es por ellos que el estudio del circuito equivalente se centrará en mostrar sólo dichas configuraciones y no en otras como triángulo-estrella, estrella-triángulo o triángulo-triángulo.

Con carácter general, el circuito equivalente del transformador de núcleo trifásico con arrollamiento Terciario, es el que se muestra en la *Figura 3.13*⁷.

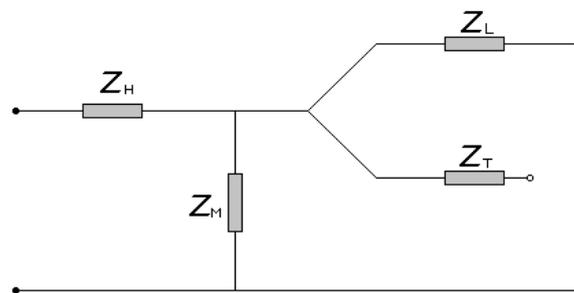


Figura 3.13. Circuito equivalente del transformador trifásico.

Este circuito recoge el hecho de que en un transformador existen unos flujos de dispersión que concatenan sólo a uno de los arrollamientos (impedancias Z_H , Z_L y Z_T) y el hecho de que para crear el flujo se precisa una cierta corriente de magnetización (impedancia Z_M).

⁶ Este arrollamiento será explotado de forma abierta o cerrada (según la ubicación en la red eléctrica del equipo), y su configuración será en triángulo.

⁷ La figura nos muestra el circuito equivalente del transformador con Z_L y Z_T referenciados al primario.

Para simplificar algo más el estudio, en ocasiones, es aceptable obviar la rama de magnetización Z_M en el circuito de la *Figura 3.13* ya que la corriente que se precisa para magnetizar el núcleo magnético es muy inferior a la corriente de carga⁸.

Aunque las impedancias de cortocircuito (suma de Z_H y Z_L , suma de Z_L y Z_T , suma de Z_H y Z_T) son siempre positivas (ya que responden a inductancias físicas), el descomponer esas impedancias asociadas a cada uno de los arrollamientos conduce en ocasiones a impedancias de valor negativo.

Según se demuestra en [deL09], la inductancia de cortocircuito está relacionada con las dimensiones geométricas del arrollamiento según la expresión:

$$\begin{aligned} L_{S12} &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_s} \left[\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{a_2}{3} \right] \\ L_{S23} &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_s} \left[\frac{a_2}{3} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right] \\ L_{S13} &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_s} \left[\frac{a_1}{3} + d_{12} + a_2 + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde las dimensiones geométricas se muestran en la *Figura 3.14*, y los subíndices 1, 2 y 3 hacen referencia al lugar ocupado por el arrollamiento.

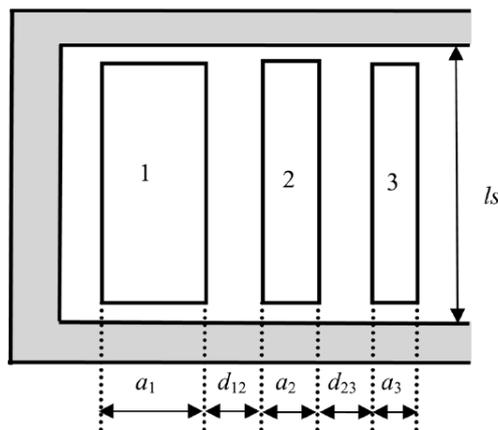


Figura 3.14. Dimensiones geométricas de los arrollamientos de un transformador.

⁸ Esto será aceptable en bancos de transformadores y, dependiendo de la cuantía de flujo homopolar, en el resto de transformadores de flujos libres.

Por tanto las inductancias L_1 , L_2 y L_3 valdrán:

$$\begin{aligned}L_1 &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_S} \left[\frac{a_1}{3} + d_{12} + \frac{a_2}{2} \right] \\L_2 &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_S} \left[-\frac{a_2}{6} \right] \\L_3 &= \frac{\mu_0 N^2 l}{l_S} \left[\frac{a_2}{2} + d_{23} + \frac{a_3}{3} \right]\end{aligned}\tag{3.2}$$

Como se puede ver de la ecuación (3.2) la impedancia del arrollamiento que ocupa el lugar central es negativa.

En el caso de que el arrollamiento Terciario no se utilice con fines de alimentar un consumo de potencia en sus bornas, en un transformador trabajando en régimen equilibrado el hecho de que la impedancia Z_2 sea negativa no tiene mayor relevancia, ya que la rama correspondiente al Terciario se encuentra a circuito abierto.

Sin embargo, como se expondrá en el capítulo 4, durante los cortocircuitos asimétricos sí que circula corriente por el arrollamiento Terciario, y por tanto el valor negativo tiene una gran importancia.

3.3.1 Circuito de secuencia directa e inversa

En estas redes de secuencia, la impedancia del arrollamiento Terciario no aparecerá puesto que este devanado se encuentra en circuito abierto (configuración en triángulo) y por tanto por él no circula corriente alguna de secuencia directa o inversa. Las impedancias del circuito equivalente ante secuencias directa e inversa son idénticas y sus circuitos son los ilustrados en la [Figura 3.15](#).

En el caso de que el neutro de uno de los lados del transformador esté aislado de tierra, las corrientes homopolares no pueden circular por ese lado, y en el circuito equivalente debe aparecer un circuito abierto, como se mostrará en la [Figura 3.18](#) y [Figura 3.19](#).

La suma de las impedancias Z_H y Z_L tiene en cuenta el flujo de dispersión que concatena el arrollamiento secundario y no el primario y viceversa. Por tanto esta suma debe ser la misma ya se explote el transformador a Terciario abierto o a Terciario cerrado.

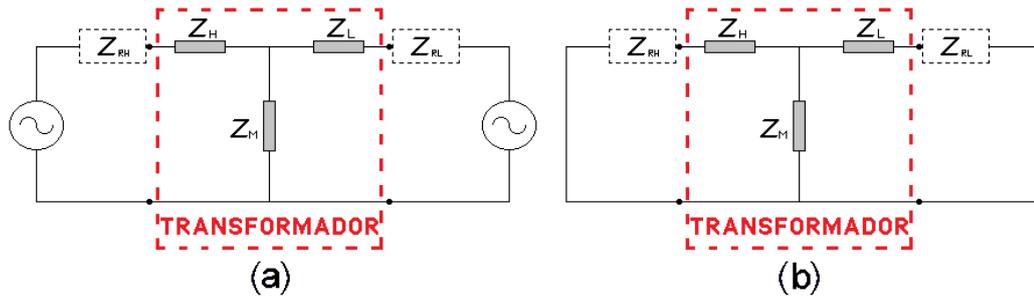


Figura 3.15. Circuitos de secuencia: a) Directa. b) Inversa.

Antes de analizar el circuito equivalente ante secuencia homopolar, conviene ver qué condiciones se precisan para la circulación de corrientes y flujos de secuencia homopolar.

3.3.2 Circulación de corrientes de secuencia homopolar.

Las corrientes de la secuencia directa e inversa de cada una de las fases están desfasadas 120° y son de la misma magnitud, y por tanto si se aplica la primera ley de Kirchoff al punto neutro, veremos que las tres corrientes se anulan al sumarse.

Las corrientes de secuencia homopolar son tres corrientes idénticas y en fase. Por tanto, su suma no es cero ($\vec{I}_{OR} + \vec{I}_{OS} + \vec{I}_{OT} \neq 0$).

En este sentido, las tres fases del sistema es como si fueran un sólo polo ante la secuencia homopolar y se precisa un hilo para el retorno de corriente, que es el hilo de neutro.

Por esta razón en arrollamientos conectados en triángulo no puede haber componente de secuencia homopolar en la intensidad de línea. Tampoco puede haberla en arrollamientos en estrella si el neutro del transformador está aislado.

Sin embargo, en el caso de que los flujos del transformador tengan una componente homopolar, dicho flujo engendrará una f.e.m. homopolar en cada una de las tres fases del triángulo, que son f.e.m. en fase y por tanto harán circular corrientes homopolares por el interior del triángulo. Dichas corrientes se opondrán a la causa que los produjo, por lo que reducirá, hasta niveles casi imperceptibles, el flujo homopolar.

Por eso la presencia de un arrollamiento en triángulo, hará posible la circulación de una corriente de línea sin componente homopolar, pero sí una componente homopolar por dentro del triángulo. Este hecho se dará con un arrollamiento en triángulo tanto en alta como en baja tensión (D-y, Y-d y D-d), así como en la configuración Y-y-d.

3.3.3 Circulación de flujos de secuencia homopolar

Los flujos de secuencia homopolar son tres flujos idénticos y que pulsan en fase. En bancos de transformación compuestos por tres unidades monofásicas, cada uno de los flujos tiene su propio circuito magnético. Estos circuitos magnéticos son de baja reluctancia, por lo que la corriente precisa para crear estos flujos es reducida. Con ello la impedancia magnetizante es elevada.

En los transformadores acorazados, los flujos homopolares disponen de una parte del camino independiente para cada fase. Sin embargo, otra parte del camino (parte rayada de la *Figura 3.16*) es común. Para el caso de que la tensión homopolar aplicada al transformador sea elevada, estas partes se pueden saturar y presentar una reluctancia elevada. Por todo ello, la inductancia magnetizante:

$$L_M = \frac{(N \cdot \Phi_0)}{I_0} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (3.3)$$

es elevada si el núcleo magnético no está saturado y es reducida para aquellos valores de la tensión homopolar que hacen que se sature parte del circuito magnético.

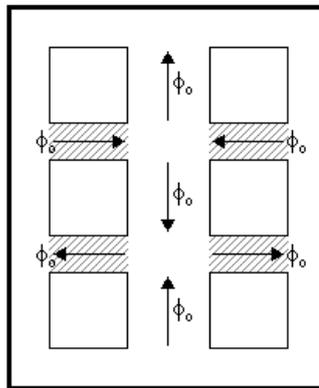


Figura 3.16. Camino común para el flujo homopolar en transformadores acorazados.

Para el caso de transformadores de cinco columnas los flujos homopolares de las tres fases disponen de un camino de retorno. Este camino presenta baja reluctancia en tanto en cuanto no se sature. Sin embargo, para valores de la tensión homopolar medianamente elevados la suma de los tres flujos homopolares tiene un valor elevado, y se saturan las columnas laterales, aumentando con ello la impedancia magnetizante.

Para el caso de transformadores de tres columnas, los flujos de las tres fases al llegar al punto común del circuito magnético no suman cero, pero dado que la segunda ley de Maxwell establece que las líneas de inducción deben ser cerradas, es obligado que los flujos cierren su camino por el exterior del circuito magnético. Los flujos tienden a circular por los elementos de menor reluctancia; por eso el cierre del flujo se realiza por la cuba y demás elementos ferromagnéticos. A pesar de ello es obligado que parte del trayecto sea por el aceite, como se puede apreciar en la [Figura 3.17](#). Por ello la reluctancia que se

ofrece al paso del flujo es elevada y la inductancia correspondiente reducida. En estas circunstancias esta impedancia no puede ser despreciada en el circuito magnético.

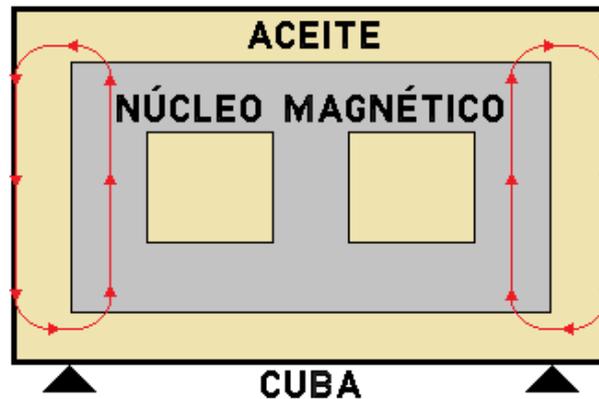


Figura 3.17. Camino del flujo magnético en un transformador de núcleo trifásico.

3.3.4 Circuito de secuencia homopolar

El circuito equivalente ante secuencia homopolar depende del régimen de neutro, del tipo de núcleo magnético⁹, del tipo de configuración de los arrollamientos y de la adicción o supresión de arrollamiento Terciario.

⁹ En transformadores de flujos libres, la impedancia magnetizante puede ser suprimida, ya que ésta tiene un valor alto, por lo que se puede aproximar a un circuito abierto. En cambio en transformadores de flujos ligados esta aproximación no es válida, ya que la impedancia homopolar es relativamente baja [Wan09]

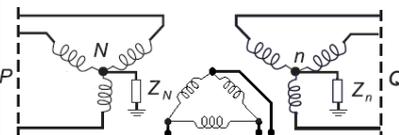
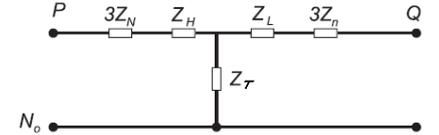
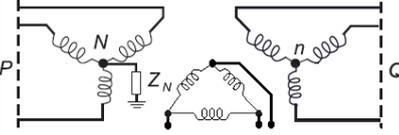
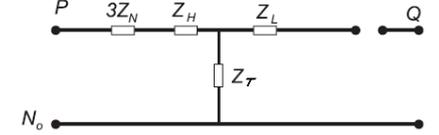
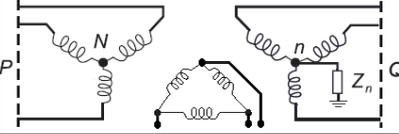
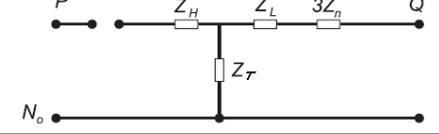
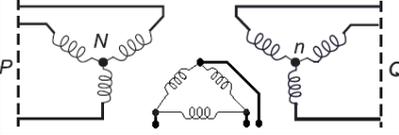
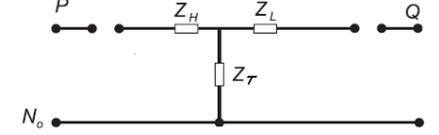
SÍMBOLOS	DIAGRAMAS DE CONEXIONES	CIRCUITO EQUIVALENTE EN SECUENCIA ZERO
PAT-PAT 		
PAT-AISL. 		
AISL.-PAT 		
AISL.-AISL. 		

Figura 3.18. Diagramas de secuencia zero con Terciario.

En la [Figura 3.18](#) se muestra el circuito equivalente de secuencia homopolar de un transformador dependiendo de la forma de conexión de los arrollamientos y del tratamiento de puesta a tierra del neutro. En la [Figura 3.19](#) se muestran los circuitos equivalentes para el caso de transformadores de flujos ligados sin Terciario.

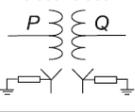
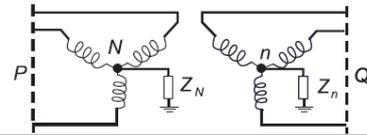
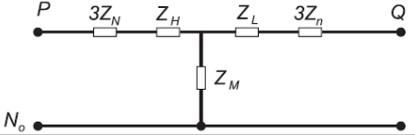
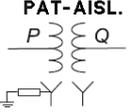
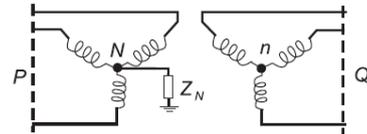
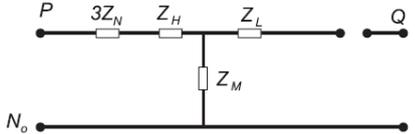
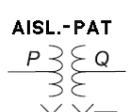
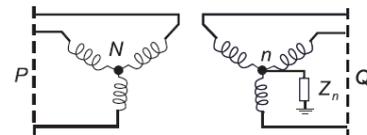
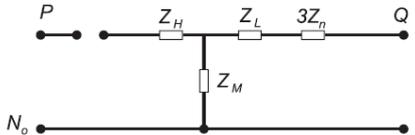
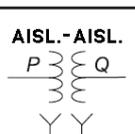
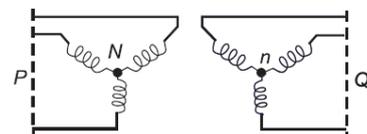
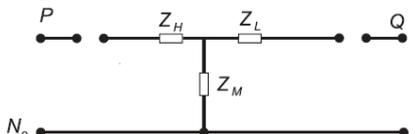
ÍMBOLOS	DIAGRAMAS DE CONEXIONES	CIRCUITO EQUIVALENTE EN SECUENCIA ZERO
<p>PAT-PAT</p> 		
<p>PAT-AISL.</p> 		
<p>AISL.-PAT</p> 		
<p>AISL.-AISL.</p> 		

Figura 3.19. Diagramas de secuencia zero sin Terciario.



Capítulo 4

Cortocircuitos en transformadores

Los cortocircuitos en las redes son eventualidades más o menos frecuentes para las que los equipos eléctricos deben estar diseñados. No es admisible que un equipo eléctrico, que en general son equipos costosos, se averíe ante el primer cortocircuito. Estadísticamente, los cortocircuitos más frecuentes son los cortocircuitos monofásicos. Además, en transformadores Yd este tipo de cortocircuitos también es uno de los más perjudiciales ya que en ellos la intensidad de cortocircuito tiene una componente homopolar y ello hace que en las fases del Terciario circulen intensidades elevadas.

El objetivo de este capítulo es mostrar los circuitos equivalentes que deben ser usados para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en un transformador trifásico.

Como es bien sabido, cuando un transformador sufre un cortocircuito en las líneas a las que está conectado surgen grandes corrientes. Además de ello, en el caso de que se trate de una falta desequilibrada, aparecerán unas sobretensiones transitorias

seguidas de unas sobretensiones permanentes de frecuencia industrial que se mantienen hasta que la falta es despejada.

La severidad de la corriente en el caso de una falta, viene influenciada por muchos factores, ya sean propios de las redes a las que esté conectado el transformador (potencia de cortocircuito, régimen de neutro, impedancia de puesta a tierra en su caso, etc.), o ya sean propios del transformador como las impedancias de secuencias (directa, inversa y homopolar), tipo de núcleo magnético, el régimen de neutro de sus arrollamientos, etc. [Ber98].

Cuando se genera un cambio repentino en el sistema eléctrico, como puede ser por la adicción o supresión de carga, apertura o cierre de interruptores (maniobras), descargas atmosféricas o por una falta; las ondas de tensión y corriente sufren una variación repentina y de carácter temporal (con una duración que depende de la eventualidad y que va de unos pocos μs a ms), llamada período transitorio, en la que surgen grandes picos de tensión y corriente para después ir estabilizándose a valores más bajos, pero impuestos por el nuevo sistema. Este nuevo estado será el llamado régimen permanente.

En definitiva, el régimen transitorio se debe a que en un circuito inductivo las bobinas no pueden tener un cambio de corriente instantáneo, ya que si esto ocurriese la tensión tendería a infinito como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.4)$$

En el caso de un cambio brusco en la red, debe existir una distribución de la energía dentro del sistema, y puesto que en los parámetros de inductancia y capacidad, no puede haber una variación instantánea de sus magnitudes, existe un tiempo finito (unos pocos μs), en el que se produce esa redistribución de energía, atendiendo a las condiciones de inductancia y capacidad y a la ley de conservación de la energía que nos dice que:

$$W_{generada} = W_{almacenada} + W_{disipada} \quad (4.5)$$

En el apartado 4.1 se estudia el régimen transitorio, mientras que en el 4.2 se indica la forma de calcular la corriente de cortocircuito en régimen permanente.

4.1 Régimen transitorio

Para analizar el régimen transitorio de un cortocircuito consideraremos un transformador monofásico, ya que las conclusiones que saquemos son aplicables a los transformadores trifásicos y sin embargo el estudio es mucho más sencillo.

Dependiendo de cuando se dé el cambio en la red (de aquí en adelante hablaremos de falta), tendremos picos de corriente durante el transitorio más o menos virulentos. Como es sabido, la tensión sigue una senoide y cabe la posibilidad de que en el momento de la falta, ésta se encuentre pasando por un máximo, un mínimo o por cualquier otro ángulo de fase.

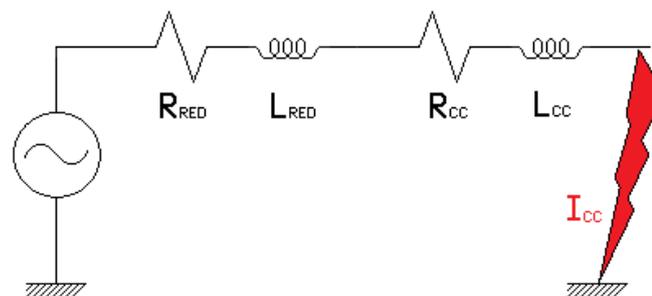


Figura 4.20. Esquema monofásico de un cortocircuito trifásico.

Para expresar estas mismas ideas de forma matemática y obtener el valor máximo de la corriente durante el transitorio, se debe resolver la ecuación diferencial del circuito, que es un circuito inductivo-resistivo, ya que tanto la impedancia del transformador como la de la red tienen carácter inductivo. Si en una primera aproximación se desprecia la resistencia del transformador y de la red de alimentación queda:

$$U\sqrt{2} \sin(\omega t + \delta) = (L_{cc} + L_{Red}) \frac{di}{dt} \quad (4.6)$$

donde δ es un parámetro que permite tener en cuenta el ángulo de fase de la red en el instante de tiempo en el que se produce el cortocircuito.

Integrando la ecuación (4.6) se tiene que:

$$i = \frac{1}{L_{cc} + L_{Red}} \int U\sqrt{2} \sin(\omega t + \delta) dt \quad (4.7)$$

El peor instante de tiempo para producirse el cortocircuito es cuando la senoide de tensión de red pasa por cero ($\delta=0$). En esas circunstancias la tensión de red es positiva durante todo el semiperíodo siguiente al instante de fallo, y dado que la intensidad es la integral de la tensión, la intensidad crece durante todo el semiperíodo hasta alcanzar un valor:

$$I_{\max} = \frac{1}{L_{cc} + L_{Red}} \int_0^{T/2} U\sqrt{2} \sin(\omega t) dt = \frac{2}{\omega(L_{cc} + L_{Red})} U\sqrt{2} \quad (4.8)$$

Esto es, el valor de cresta de la corriente es el doble del que se alcanza en régimen permanente.

El estudio realizado hasta aquí es un estudio simplificado. En realidad debido a las resistencias, la corriente se amortigua y se centra. En esas circunstancias el valor de cresta de la corriente no llega a ser dos veces el valor de cresta en régimen permanente sino una cifra inferior, que depende del cociente:

$$\frac{L_{cc} + L_{Red}}{R_{cc} + R_{Red}} \quad (4.9)$$

Si bien no es complicado resolver la ecuación diferencial lineal que proporciona la corriente en el circuito RL en estudio, esto no es preciso, ya que la norma IEC 60076- parte5 [IEC00] proporciona el valor de cresta de la corriente de cortocircuito como:

$$I_{max} = k\sqrt{2}I_{cc} \quad (4.10)$$

donde el valor de $k\sqrt{2}$ viene dado por la *Tabla 4.2* extraída de la norma.

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

NOTA Para valores distintos de X/R entre 1 y 14, el factor $k\sqrt{2}$ debe ser determinado por interpolación lineal

Tabla 4.2. Tabla 4 de la norma IEC 60076-parte5.

4.2 Régimen permanente. Tipos de cortocircuitos

Para el estudio de los distintos tipos de cortocircuito [Roe70], vamos a estudiarlos como si se produjesen en las bornas del transformador, ya que será en este punto el lugar más perjudicial para el transformador en lo que se refiere a cortocircuito producido en la red eléctrica¹⁰.

4.2.1 Cortocircuito trifásico

Para las faltas simétricas, sólo se analizará aquella en la cual se tenga la corriente de cortocircuito más severa, es decir en el caso de tener una falta trifásica en el lado de baja tensión, pues la impedancia de la red de alta tensión es menor que la de la red de baja tensión, por lo que limitará menos el paso de corriente de cortocircuito a través del transformador.

En este tipo de faltas la corriente en las tres fases es igual y desfasada 120°; por lo que es suficiente con estudiar lo que ocurre en una de las fases.

¹⁰ Esto es así ya que la impedancia vista para el cortocircuito sería más reducida puesto que no se sumará la impedancia de la red, y por lo tanto se tendrán corrientes más elevadas.

Cuando existe un cortocircuito trifásico (*Figura 4.21*), la corriente de cortocircuito se puede hallar dividiendo la tensión en vacío del transformador (E_Y) entre la impedancia total de secuencia directa (Z_1).

$$I_{CC} = \frac{E_Y}{Z_1} = \frac{E_Y}{Z_{cct} + Z_{1R} + Z_f} \quad (4.11)$$

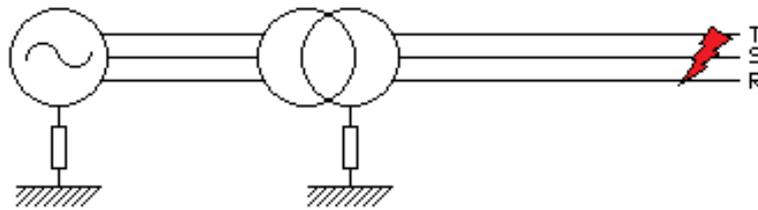


Figura 4.21. Cortocircuito trifásico.

Esta impedancia será la suma entre la impedancia de secuencia directa del transformador (Z_{CCT}), la impedancia de secuencia directa de la red (Z_{1R}) y la impedancia de falta (Z_f si existiese). En la *Figura 4.22* se muestra el circuito para hallar la corriente de cortocircuito.

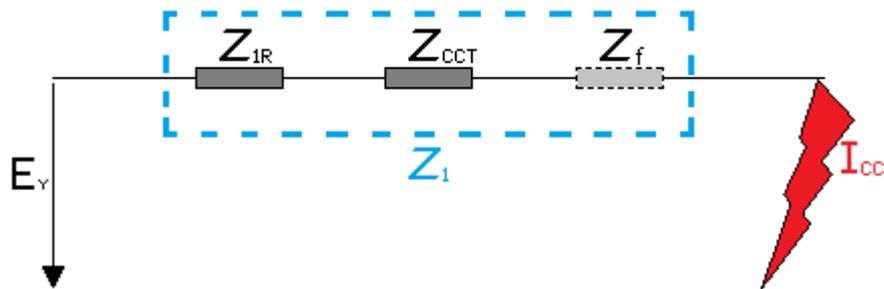


Figura 4.22. Circuito para hallar la corriente de cortocircuito.

4.2.2 Cortocircuito monofásico a tierra

Para simplificar se supondrá un cortocircuito franco a tierra (sin impedancia de falta) en la fase R con las fases S y T a circuito abierto (como se puede observar en la *Figura 4.23*), por lo tanto, las ecuaciones que rigen el sistema son las siguientes:

$$U_R = 0; \quad I_S = I_T = 0 \quad (4.12)$$

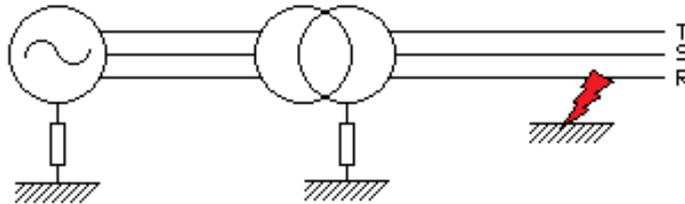


Figura 4.23. Cortocircuito monofásico.

Para resolver el problema obtendremos las corrientes de secuencia directa, inversa y homopolar, mediante la expresión:

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_R \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

de lo que se puede ver que:

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad (4.14)$$

Al llevar la misma corriente los circuitos de secuencia directa, inversa y homopolar, para el estudio las pondremos en serie.

La relación entre las tensiones en cada una de las fases y las componentes de secuencia de las tensiones (teniendo en cuenta que la tensión en la fase *R* es cero) es:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ U_S \\ U_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

de lo que se deduce que:

$$U_0 + U_1 + U_2 = 0 \quad (4.16)$$

De modo que los tres circuitos de secuencia se han de poner en serie, ecuación (4.17) y en cortocircuito (Figura 4.24).

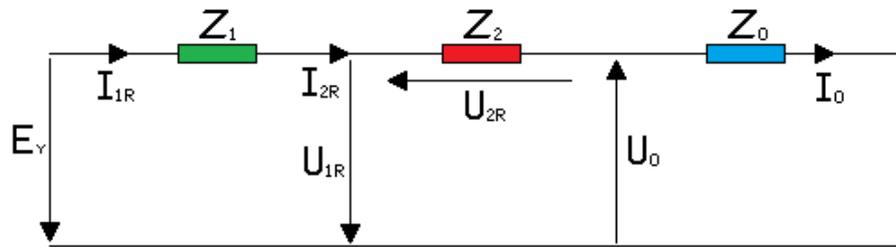


Figura 4.24. Circuito equivalente de secuencias en cortocircuito monofásico.

Si en el circuito de la [Figura 4.24](#) se expresan las componentes de secuencia de las tensiones en función de las intensidades se obtiene:

$$Z_0 I_0 - E_Y - Z_1 I_1 - Z_2 I_2 = 0 \quad (4.17)$$

Ahora, si usamos la ecuación (4.14) y despejamos la corriente se llega a:

$$I_1 = \frac{E_Y}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (4.18)$$

Si se aplica la transformación inversa se obtiene la corriente de falta:

$$I_{CC(1)} = I_R = \frac{E_Y}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (4.19)$$

Las tensiones en las fases sanas y la tensión en la secuencia homopolar son las siguientes:

$$U_S = E_Y \left(a^2 - \frac{Z_0 + a^2 Z_1 + a Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right) \quad (4.20)$$

$$U_T = E_Y \left(a - \frac{Z_0 + a Z_1 + a^2 Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right) \quad (4.21)$$

$$U_0 = E_Y \left(- \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right) \quad (4.22)$$

Los valores obtenidos hasta ahora son válidos para las premisas señaladas al principio del análisis, es decir, las corrientes en las fases sanas son nulas y el cortocircuito es franco, aunque en casos más complejos, la idea básica de la *Figura 4.24* sigue siendo válida. De modo que el circuito equivalente que se usará para obtener las componentes de secuencia de tensiones e intensidades, es la unión por el punto de falta de los circuitos de las tres secuencias, como así se muestra en la *Figura 4.25* y siguientes.

4.2.3 Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con los neutros de AT y BT puestos a tierra

En la *Figura 4.25*, se puede ver los circuitos usados para el cálculo de las componentes de secuencia de las corrientes de cortocircuito en los distintos arrollamientos del transformador en una configuración YNyn con un cortocircuito monofásico tanto en alta como en baja tensión. En los circuitos equivalentes de la componente de secuencia directa e inversa se ha prescindido de la rama magnetizante, ya que el valor de esta impedancia es muy elevado. Sin embargo, para el caso del circuito equivalente ante secuencia homopolar sí que se ha considerado esta impedancia, ya que ante secuencia homopolar el flujo en las tres columnas del transformador¹¹ es igual y en fase, con lo que debe cerrar su camino por el exterior del circuito magnético. Se comprende que en ese caso la corriente precisa para crear el flujo homopolar debe ser muy elevada, con lo que la impedancia magnetizante es más reducida que ante secuencia directa o inversa.

¹¹ Esto sólo es válido en transformadores de columnas, pero no en bancos de transformación compuesto por tres unidades monofásicas o transformadores acorazados.

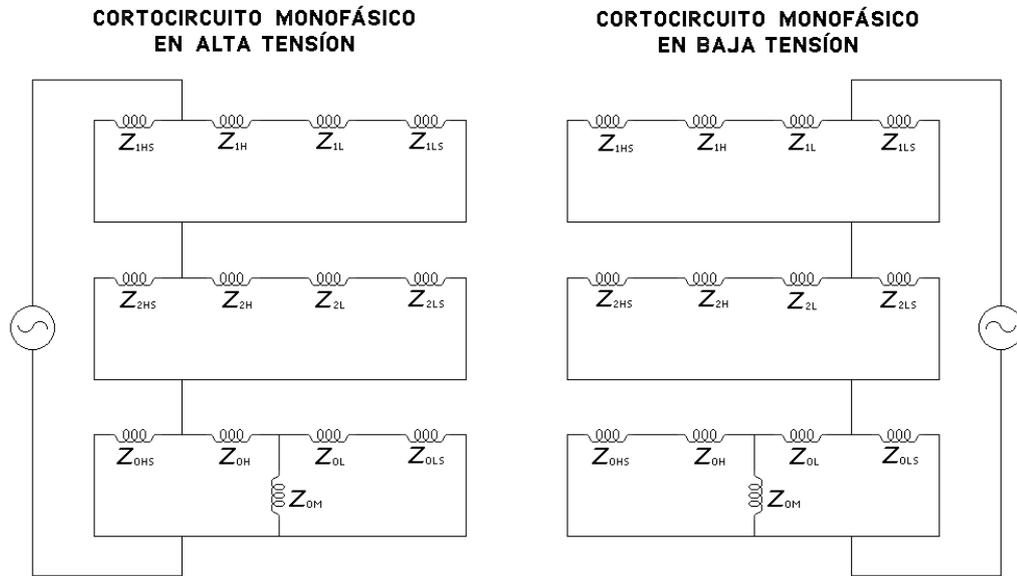


Figura 4.25. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador YNyn.

En la *Figura 4.26*, se muestran los circuitos usados para el cálculo de las componentes de secuencia de las corrientes de cortocircuito en los distintos arrollamientos del transformador en una configuración YNyd con un cortocircuito monofásico tanto en alta como en baja tensión. En este caso, la impedancia Z_{0T} que figura es la impedancia de dispersión del Terciario.

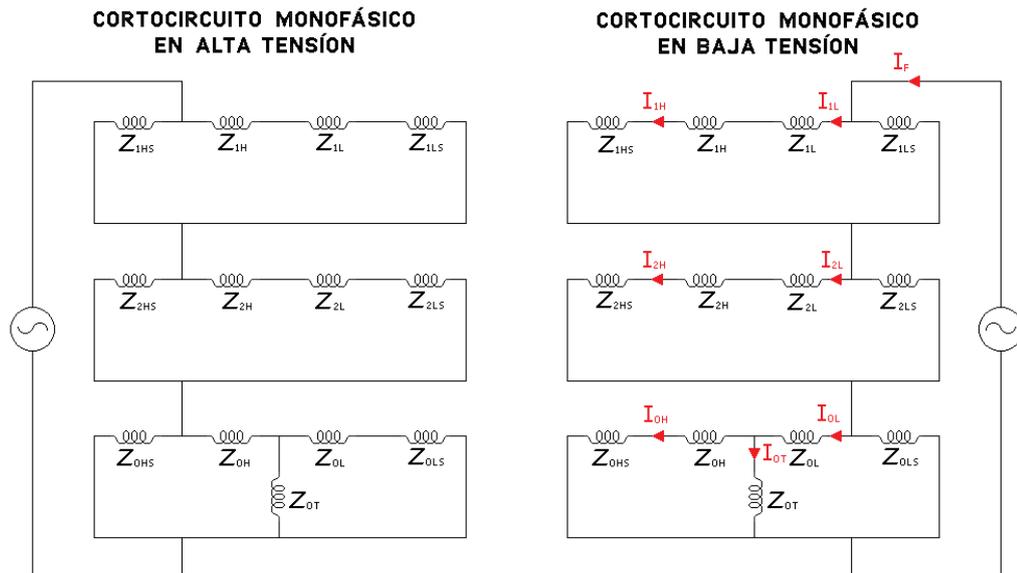


Figura 4.26. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador YNyd.

Una vez que se obtienen las componentes de secuencia de las corrientes es posible hallar las corrientes en los distintos arrollamientos. La forma de hacerlo se mostrará para el caso de un cortocircuito monofásico en el lado de baja tensión de un transformador YN_ynd. Para el cortocircuito en el lado de alta tensión y el resto de configuraciones de puesta a tierra se hace de una forma análoga.

Despejando en la ecuación (4.13) la corriente de la fase en cortocircuito, en función de las componentes de secuencia se puede expresar la corriente en el arrollamiento de alta tensión mediante la suma de las componentes de secuencia de las corrientes del arrollamiento primario:

$$I_H = I_{1H} + I_{2H} + I_{0H} \quad (4.23)$$

donde las corrientes directa e inversa tienen idéntico valor:

$$I_{1H} = I_{2H} = I_{1L} \quad (4.24)$$

Por lo que se refiere a la componente homopolar de la corriente en el primario:

$$I_{0H} = I_{0L} \frac{Z_{0T}}{(Z_{0HS} + Z_{0H}) + Z_{0T}} \quad (4.25)$$

Para el caso del arrollamiento de baja tensión ocurrirá algo análogo al arrollamiento primario, es decir, la corriente de cortocircuito monofásico en el secundario será la suma de las corrientes en el lado de baja tensión de las distintas secuencias:

$$I_L = I_{1L} + I_{2L} + I_{0L} \quad (4.26)$$

donde se tendrán el mismo valor para las corrientes directa e inversa:

$$I_{1L} = I_{2L} = I_F \frac{Z_{1LS}}{(Z_{1HS} + Z_{1H} + Z_{1L}) + Z_{1LS}} \quad (4.27)$$

y la siguiente expresión para indicar la corriente homopolar en el secundario:

$$I_{0L} = I_F \frac{Z_{0LS}}{\left\{ \left[\frac{(Z_{0HS} + Z_{0H})Z_{0T}}{(Z_{0HS} + Z_{0H}) + Z_{0T}} \right] + Z_{0L} \right\} + Z_{0LS}} \quad (4.28)$$

La corriente de falta del transformador I_F viene dada por la siguiente ecuación:

$$I_F = \frac{3}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4.29)$$

donde las impedancias Z_1 y Z_2 son idénticas y son la impedancia equivalente de los circuitos de las secuencias directa e inversa respectivamente:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{(Z_{1HS} + Z_{1H} + Z_{1L})Z_{1LS}}{(Z_{1HS} + Z_{1H} + Z_{1L}) + Z_{1LS}} \quad (4.30)$$

La impedancia equivalente de la secuencia homopolar sigue la siguiente ecuación:

$$Z_0 = \frac{\left[\frac{(Z_{0HS} + Z_{0H})Z_{0T}}{(Z_{0HS} + Z_{0H}) + Z_{0T}} + Z_{0L} \right] Z_{0LS}}{\left[\frac{(Z_{0HS} + Z_{0H})Z_{0T}}{(Z_{0HS} + Z_{0H}) + Z_{0T}} + Z_{0L} \right] + Z_{0LS}} \quad (4.31)$$

En el devanado Terciario sólo se tiene corriente de secuencia homopolar, ya que al encontrarse a circuito abierto la corriente del resto de secuencias es nula:

$$I_T = I_{0T} \quad (4.32)$$

donde se tiene que la corriente de la secuencia homopolar en el arrollamiento Terciario es:

$$I_{0T} = I_{0L} \frac{(Z_{0HS} + Z_{0H})}{Z_{0T} + (Z_{0HS} + Z_{0H})} \quad (4.33)$$

4.2.4 Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con uno de los neutros aislados

En la *Figura 4.27* se muestran los circuitos de secuencias de un transformador YNy unidos entre sí para el cálculo de la corriente de cortocircuito monofásico.

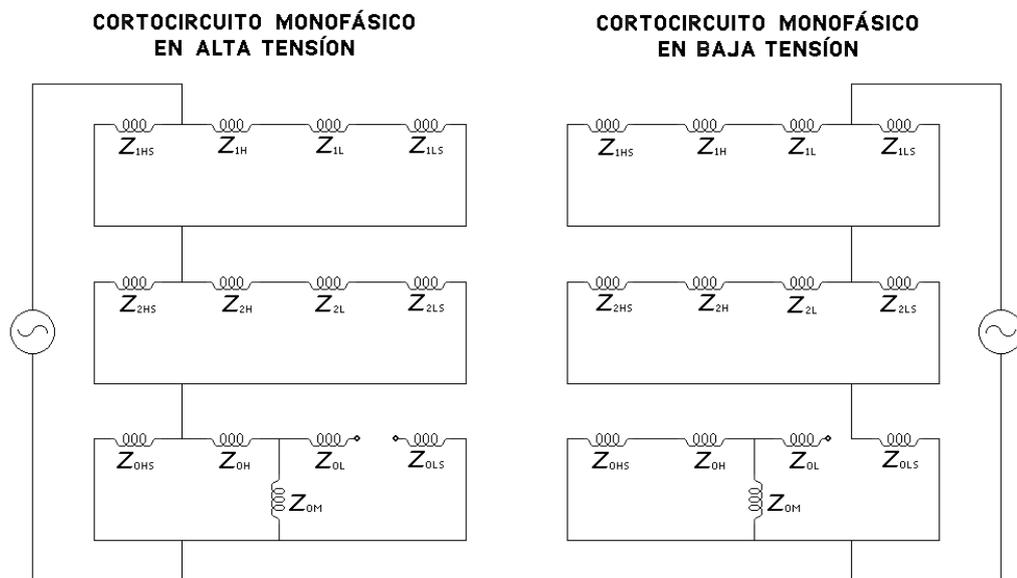


Figura 4.27. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador YNy.

En la *Figura 4.28* se muestran los circuitos de secuencias de un transformador YNy_d unidos entre sí para el cálculo de la corriente de cortocircuito monofásico.

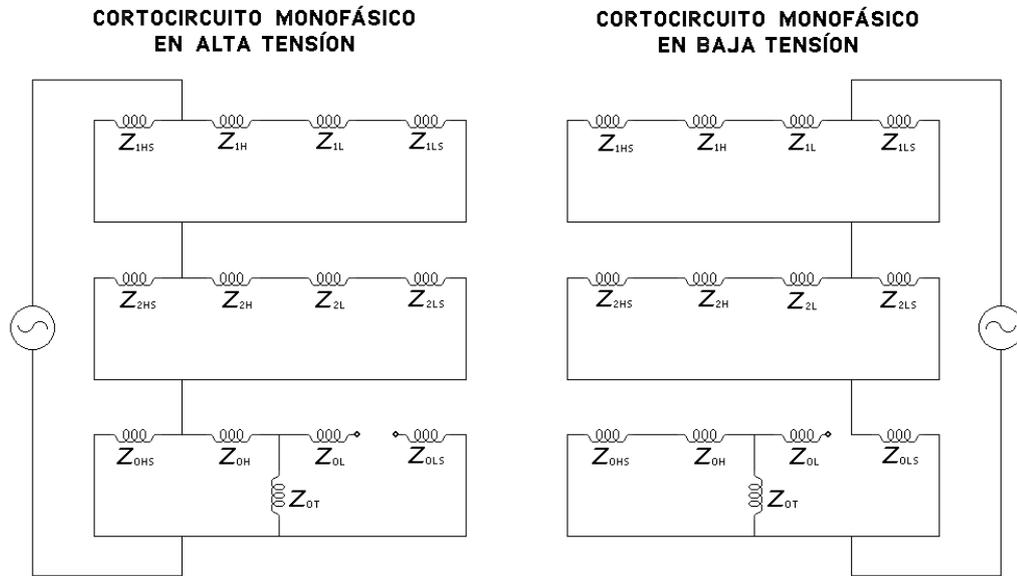


Figura 4.28. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador YNyd.

En la [Figura 4.29](#) se muestra el circuito de secuencias de un cortocircuito monofásico en un transformador Yyn.

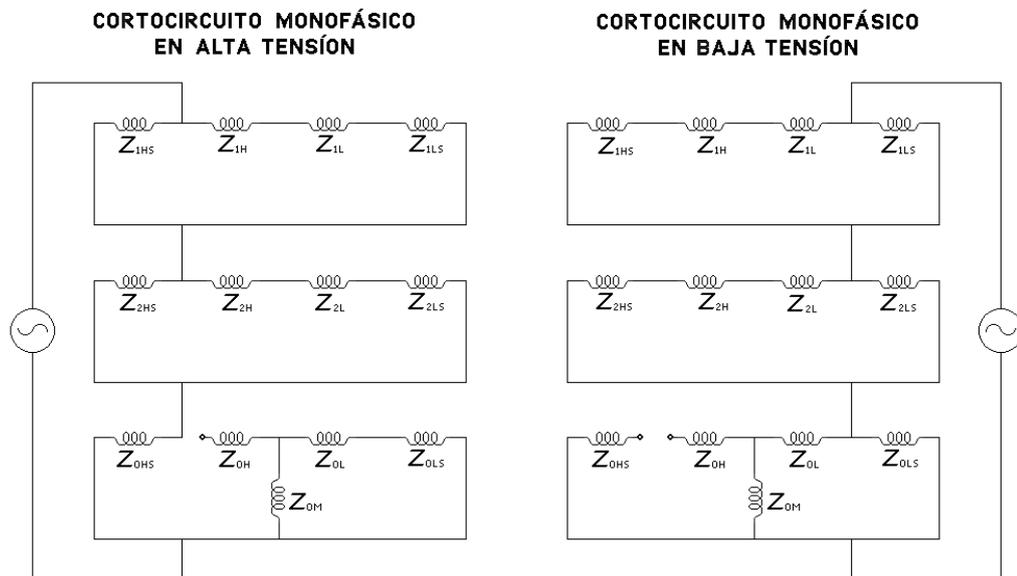


Figura 4.29. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador Yyn.

En la [Figura 4.30](#) se muestra el circuito de secuencias de un cortocircuito monofásico en un transformador Yynd.

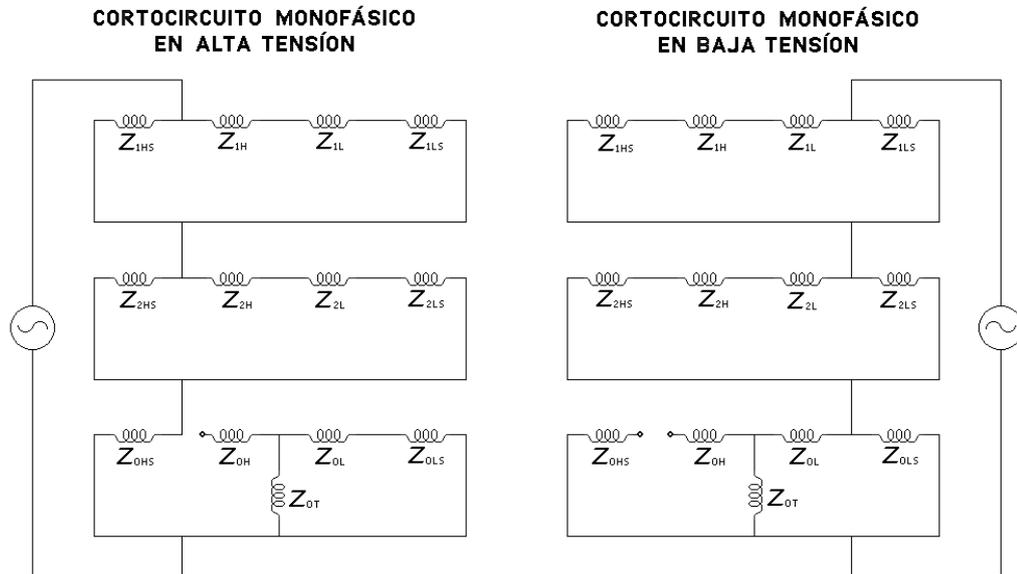


Figura 4.30. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador Yynd.

Como se desprende de las anteriores figuras, en aquellos transformadores en los que se tenga el primario o el secundario aislados, y se tenga un cortocircuito monofásico en dicho lado, en el arrollamiento Terciario no tendremos corriente de cortocircuito, ya que por dicho lado no puede circular corriente homopolar alguna, por lo que no se transmite corriente al lado Terciario.

4.2.5 Cortocircuito monofásico a tierra en transformadores con ambos neutros aislados

En la [Figura 4.31](#) se muestra el circuito de secuencias de un cortocircuito monofásico en un transformador Yy. La figura es aplicable igualmente al estudio de transformadores Yyd.

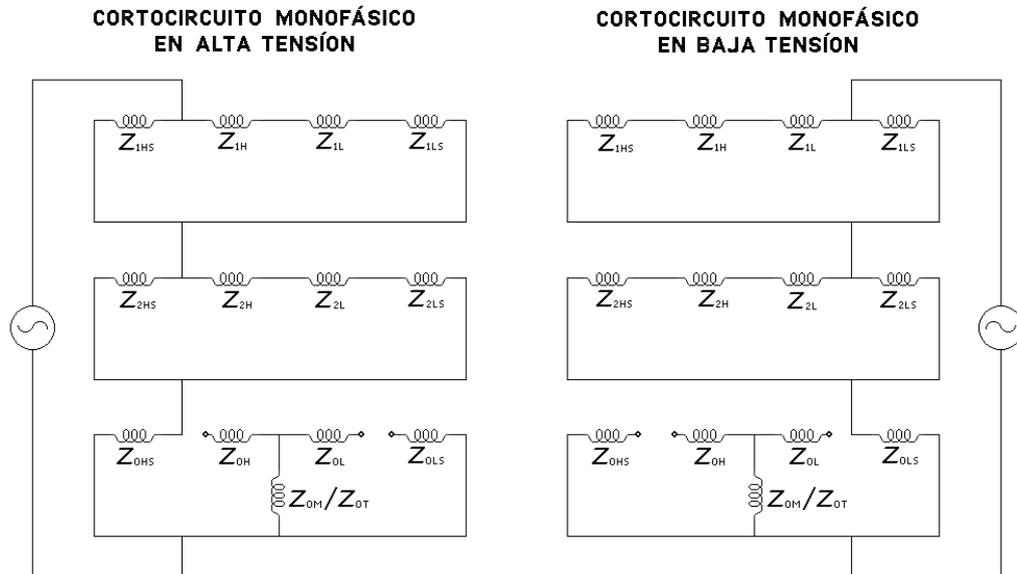


Figura 4.31. Circuito de un cortocircuito monofásico en un transformador Yy y Yd.

4.3 Efectos de un cortocircuito en un transformador

Cuando existe un desequilibrio entre las corrientes de las fases de un transformador, como es el caso de un cortocircuito, en el que alguna de las corrientes (ya sea de primario, de secundario o ambas) tenga una componente homopolar, aparece un flujo homopolar. Este flujo homopolar engendra en las diferentes fases f.e.m.s y en alguna de las fases sanas se pueden tener sobretensiones. El esquema fasorial es análogo al mostrado en la [Figura 3.12](#).

Además de las sobretensiones temporales producidas en las fases sanas, un cortocircuito tiene principalmente, dos connotaciones negativas para el transformador como son los efectos térmicos y ante todo, por ser los más dañinos para el transformador, los esfuerzos dinámicos.

Los efectos térmicos se producirán por la disipación de potencia activa en los arrollamientos ante el paso de altas corrientes; esta potencia activa es convertida en

calor (efecto Joule)¹². El tiempo de exposición ante cortocircuito viene determinado por el tiempo de respuesta de las protecciones y de la cadena de medida de corrientes, pero en general este tiempo es muy breve. En ese tiempo tan breve la potencia disipada es reducida, y la temperatura habitualmente no sobrepasará unos umbrales indicados en la norma IEC 60076-parte5 [Tra04]. Además, como se indicó en el capítulo introductorio, el gran tamaño de estos equipos hace que la temperatura no se eleve significativamente tras el corto período de tiempo al que se expone el equipo a la falta. Es por esto que este fenómeno es más significativo en equipos de tamaños más pequeños.

La norma IEC 60076-parte5 [IEC00] obliga al fabricante de un transformador a diseñarlo para que soporte los esfuerzos térmicos derivados de un cortocircuito al menos durante 2 segundos¹³.

Al contrario de los efectos térmicos, los cuales necesitan de un tiempo para tener una importancia, los esfuerzos dinámicos son de transmisión instantánea al producirse una sobrecorriente. Es por ello que este fenómeno debe estudiarse en profundidad para así poder diseñar un transformador robusto ante dichos fallos. Los transformadores de gran tamaño, se verán más afectados por estos esfuerzos puesto que las corrientes de cortocircuito serán más elevadas, lo que se traducirá en esfuerzos de mayor magnitud como podremos ver en el siguiente capítulo.

Es sabido que la corriente de cortocircuito depende de la impedancia de cortocircuito porcentual y de la corriente nominal:

$$I_{CC} = \frac{I_{1N}}{\varepsilon_{cc}} \cdot 100 = \frac{I_{1N}}{\sqrt{\varepsilon_{Rcc}^2 + \varepsilon_{Xcc}^2}} \cdot 100 \quad (4.34)$$

por lo que si tenemos una alta impedancia de cortocircuito porcentual, tendremos bajas corrientes de cortocircuito.

¹² La Ley de Joule establece que la cantidad de calor producida sigue la siguiente ecuación: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$, donde I es la intensidad de corriente, R es la resistencia de los arrollamientos y t es el tiempo. O dicho en términos de potencia eléctrica consumida por el conductor: $P = I^2 \cdot R$

¹³ Tras el cual deberán actuar las protecciones para evitar sobrecalentamientos.



Sin embargo, una alta impedancia de cortocircuito porcentual conlleva unas elevadas caídas de tensión, que aunque pueden ser paliadas mediante las tomas de regulación de tensión, obligan al regulador a trabajar más a menudo y obligan al proyectista a diseñar el transformador con una mayor extensión del margen de regulación.

El aumento de la tensión de cortocircuito porcentual no debe hacerse a costa de aumentar la resistencia del arrollamiento, ya que ello iría en detrimento del rendimiento del transformador. Es por ello que en transformadores grandes se debe reducir ϵ_{Rcc} , pero a su vez teniendo una corriente de cortocircuito baja. Esto es conseguido actuando sobre el flujo disperso¹⁴.

¹⁴ Los fabricantes juegan con las dimensiones físicas de los arrollamientos y la separación entre arrollamientos primario y secundario para conseguir una variación en el flujo disperso.

Capítulo 5

Esfuerzos de cortocircuito

Cuando circulan corrientes por dos conductores paralelos, éstos se ven sometidos a unas fuerzas de atracción o repulsión dependiendo del sentido de circulación de dicha corriente. Estas fuerzas se calculan mediante la ecuación [Kul04]:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (5.35)$$

donde \vec{B} es la inducción magnética (también llamada densidad de flujo), I corriente eléctrica y \vec{l} es la longitud de conductor. La [Figura 5.32](#) muestra el sentido de la fuerza en función del sentido de la corriente en los conductores.

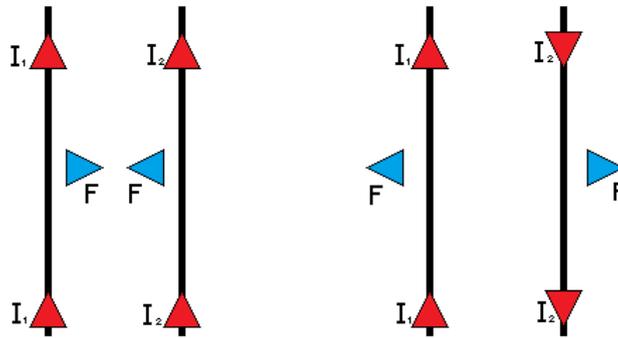


Figura 5.32. Esfuerzos de atracción y repulsión.

Para el caso de los arrollamientos de un transformador, las fuerzas serán de repulsión a causa de que los amperios-vuelta del secundario serán antagonistas respecto de los amperios-vuelta del primario [Bur10].

En un transformador existen dos tipos de flujo, el flujo común y el flujo disperso. El flujo común es proporcional a la tensión aplicada al transformador, mientras que el flujo disperso depende de la corriente del transformador. El flujo común discurre casi en su totalidad por el núcleo, mientras que el flujo de dispersión discurre en parte por el núcleo pero cierra su camino por la ventana del transformador (Figura 5.33). La inducción que se debe considerar en la ecuación (5.36) es la que se tiene en el punto donde está el conductor, esto es, la inducción asociada al flujo de dispersión y dado que el flujo de dispersión es proporcional a la corriente que lo crea, las fuerzas entre arrollamientos de un transformador dependen del cuadrado de la corriente que circula por los arrollamientos.

$$f = Bil = Ki^2 \quad (5.36)$$

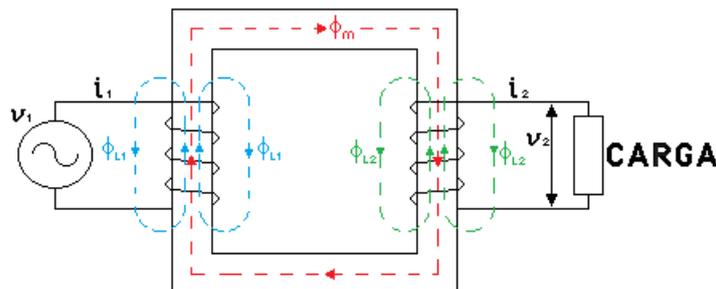


Figura 5.33. Flujo común (ϕ_m) y disperso (ϕ_{L1} y ϕ_{L2}) en un transformador [Kul04].

A la luz de la ecuación (5.36) las fuerzas en un transformador serán mayores cuanto mayor sea la corriente, y dado que el accidente de cortocircuito es el transitorio que involucra mayor corriente, las mayores fuerzas a las que se ven sometidos los arrollamientos de un transformador se producirán durante los cortocircuitos.

Como se indicó en el capítulo 4, durante un cortocircuito cabe distinguir un régimen permanente y un régimen transitorio y las mayores corrientes se producen durante este último. Dado que la relación entre fuerzas y corrientes (ecuación (5.36)) no involucra ningún efecto de integración, la mayor fuerza se dará en idéntico instante de tiempo que la mayor corriente. De este modo, durante el transitorio de cortocircuito las fuerzas alcanzan los valores máximos en el mismo instante de tiempo que las corrientes.

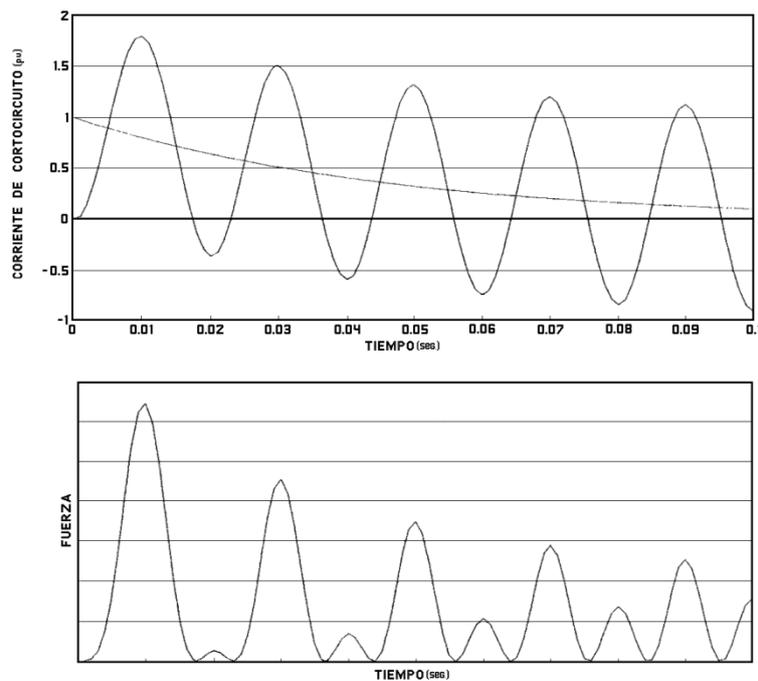


Figura 5.34. Transitorio de corriente y fuerzas.

Por lo tanto las fuerzas a las que están sometidos los arrollamientos son unidireccionales y de valor variable en el tiempo.

Un transformador es un dispositivo altamente asimétrico en cuanto a la distribución de flujos de dispersión, y es en las ventanas del núcleo magnético donde

hay una mayor cantidad de flujo de dispersión. Esto hace a su vez que generalmente sean los arrollamientos centrales los más castigados, pero con un reparto de fuerzas a lo largo de la circunferencia muy distinto [Kul04].

5.1 Tipos de fuerzas

A la vista de la ecuación (5.35) las fuerzas que se producen en los arrollamientos de un transformador, tienen su dirección perpendicular a la inducción. En un solenoide infinito la inducción lleva dirección axial; lo mismo pasa cuando se tienen dos solenoides concéntricos indefinidamente largos. Por ello, en los arrollamientos de un transformador priman las fuerzas radiales ya que los arrollamientos son bobinados a lo largo de las columnas del núcleo magnético y el flujo va paralelo a éste, pero debido a que dicho flujo debe cerrar su camino, existen unas zonas donde el flujo magnético no es paralelo al arrollamiento, con lo que aumenta la componente radial de la inducción en detrimento de la componente axial y en esas partes del arrollamiento se tienen fuerzas axiales. Estas zonas serán los terminales de los arrollamientos como se puede observar en la *Figura 5.35*.

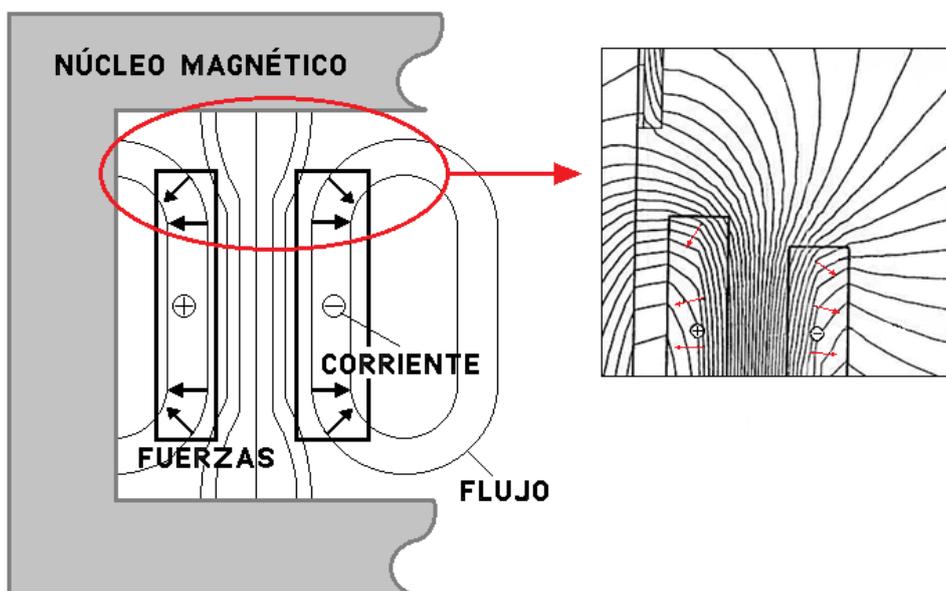


Figura 5.35. Líneas de flujo y fuerzas en los devanados.

A causa de la no uniformidad de los esfuerzos en cada región de un arrollamiento, se debe hacer un estudio en dos dimensiones, para así estimar las fuerzas axiales y radiales que deben soportar los arrollamientos.

5.1.1 Fuerzas radiales

Si se consideran arrollamientos infinitos podremos ver claramente que en ellos se engendrará una fuerza radial que será de tracción o compresión dependiendo de la ubicación del arrollamiento estudiado.

En los arrollamientos más internos (más cercanos al núcleo), se tendrán unos esfuerzos de compresión los cuales pueden llevar a colapsar mecánicamente los conductores de éstos si es superado el límite plástico del material conductor. En este lugar es frecuente que se coloque el arrollamiento con menor tensión (por la facilidad de aislamiento eléctrico entre éste y el núcleo magnético) lo que obliga a que su construcción sea lo más perfecta posible, ya que si este arrollamiento no describe una circunferencia perfecta, tendría puntos en los que sería más débil para soportar los esfuerzos de compresión y por lo tanto más tendencia a colapsarse ante grandes corrientes.

Los arrollamientos más externos experimentarán unos esfuerzos de tracción, lo que hará que su radio tenderá a aumentar. Los conductores, al estar distribuidos de forma circular, soportarán mejor estos esfuerzos, por lo que muchos fabricantes están situando el arrollamiento Terciario en posiciones lo más externas posibles, ya que éste tiene secciones de conductor más pequeñas, las cuales soportarían bastante mal los esfuerzos de compresión.

El valor de la densidad de flujo disperso en una sección recta de la ventana de un transformador no es constante, sino que aumenta (o disminuye, dependiendo del signo de la corriente) linealmente en el espesor de cada arrollamiento y se mantiene constante entre arrollamientos (trapecio de color rojo de la [Figura 5.36](#)). Por ello las fuerzas son máximas en los conductores del

arrollamiento situados en el borde externo del arrollamiento interior y en el borde interno del arrollamiento exterior.

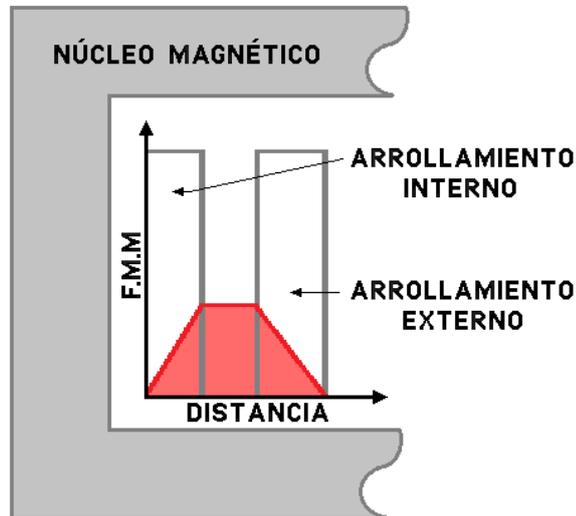


Figura 5.36. Distribución de la fuerza magnetomotriz (f.m.m.).

5.1.2 Fuerzas axiales

Estos esfuerzos, como se pudo apreciar en la [Figura 5.35](#), están concentrados en los extremos superior e inferior del arrollamiento, y se transmiten verticalmente por el contacto directo del conductor de una espira con la siguiente (en devanados por capas) o a través de los separadores colocados entre espiras (en devanados helicoidales y por discos).

Dado que la componente radial de la densidad de flujo disperso tiene diferente signo en la parte superior del arrollamiento que en la parte inferior, las fuerzas axiales tienen diferente signo en cada uno de los extremos del arrollamiento y en conjunto su carácter es de compresión, por lo que tenderán a reducir la longitud axial del arrollamiento. La magnitud de la fuerza de compresión acumulada será máxima en la parte media del arrollamiento como se puede observar en la [Figura 5.37](#), la cual muestra la distribución de fuerzas para dos arrollamientos alineados de la misma longitud axial.

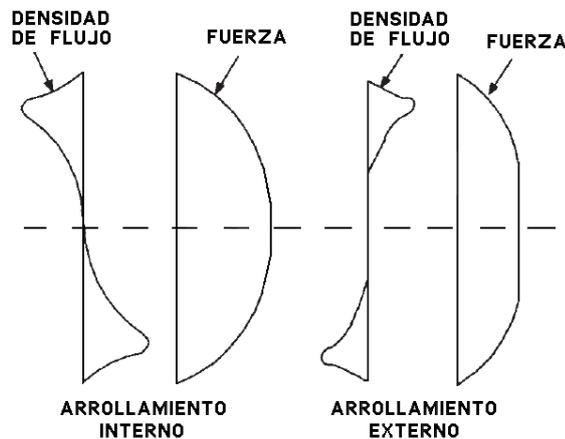


Figura 5.37. Distribución de fuerzas axiales.

Además se puede observar que el reparto del total de las fuerzas de compresión en los arrollamientos interno y externo es de 67% - 75% y 33% - 25% respectivamente, ya que existe mayor cantidad de flujo que cierra su camino en la columna del núcleo magnético en el arrollamiento más interno [Kul04][Ber98].

La colocación de los arrollamientos, así como el proceso de fabricación de los mismos, toma una gran importancia, ya que un pequeño desplazamiento axial de las bobinas o una mala alineación del centro magnético de las mismas pueden causar grandes fuerzas axiales que lleven al fallo del equipo. Este hecho hace principalmente que los esfuerzos en los extremos de los arrollamientos sean superiores a los dados en la [Figura 5.37](#), haciendo que la distribución total sea mayor.

Los esfuerzos originados por fuerzas axiales están vinculados con la potencia reactiva absorbida en el cortocircuito, mientras que los esfuerzos radiales están gobernados básicamente por la potencia activa consumida en el cortocircuito [Ber98].

Otro factor a destacar es que la disminución del tamaño de los arrollamientos del transformador a similares características hace que los esfuerzos sean mayores, por lo que se puede afirmar que las fuerzas axiales y

radiales son inversamente proporcionales a la longitud axial de los arrollamientos [Ber98].

5.2 Modos de fallo de un transformador producidos por las fuerzas de cortocircuito

Cuando el límite elástico de un material es superado, en este caso del conductor de los devanados, se producirán unas deformaciones permanentes en el material, lo que hará que las posibilidades de fallo del transformador sean mayores. Si además los esfuerzos suministrados al conductor (ya sean de tracción, compresión o cizalladura) superan el límite plástico del material conductor, éste llegará a su rotura, por lo que el equipo fallará.

En los siguientes puntos se exponen los posibles fallos en los arrollamientos producidos por la existencia de fuerzas axiales (5.2.1 y 5.2.2), y los producidos por fuerzas radiales (5.2.3 y 5.2.4).

5.2.1 Tilting

Uno de los principales modos de fallo para un transformador de potencia es el explicado en este punto. Éste consiste en la inclinación (*tilting*, en inglés) de los conductores en forma de zig-zag a causa de las fuerzas de compresión ejercidas sobre el arrollamiento como se observa en la [Figura 5.38](#).

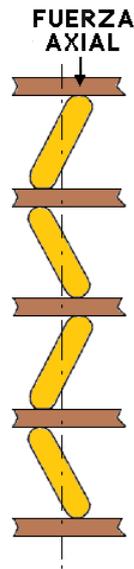


Figura 5.38. Tilting¹⁵.

Existen dos tipos de fuerzas que resisten los esfuerzos de compresión, una es la propia resistencia del material conductor a ser tumbado, y la otra es la fuerza de fricción ente los conductores y los separadores que se opone al movimiento relativo entre ambos sólidos.

Cuanto mayor sea la anchura radial y menor sea la altura del conductor, menor es la posibilidad de existencia de *tilting*, sin embargo, en los transformadores es interesante tener conductores esbeltos para disminuir las corrientes de Foucault en los mismos, por lo que se debe llegar a un compromiso que permita una resistencia mecánica suficiente a ser tumbado con un incremento moderado de las pérdidas adicionales en el cobre por corrientes de Eddy [Ber98].

La fuerza de fricción se produce cuando durante la inclinación del conductor (*tilting*), los extremos de éste deben clavarse en los espaciadores¹⁶, lo que provoca un par de fuerzas resistentes a dicho vuelco [Kul04]. Aquí, como en

¹⁵ Las zonas de color amarillo corresponden a los conductores, mientras que las zonas de color marrón corresponden a los separadores entre discos.

¹⁶ Si existiesen en el caso de arrollamientos por discos o helicoidales y en los conductores adyacentes en el caso de arrollamientos por capas.

el caso anterior, se debe llegar a un compromiso entre lo puntiagudos o redondeados que sean los extremos (más redondeados se tendrá menos par resistente a vuelco) y la acumulación de carga en estos extremos por el llamado *efecto punta*, que podría hacer que el aislamiento del conductor fuese perforado por la corriente eléctrica que recorre dicho conductor.

Los arrollamientos de discos y helicoidales tienen más resistencia al *tilting* debido a que los espaciadores oponen una resistencia adicional.

5.2.2 Bending

Este fenómeno ocurre sólo en aquellos arrollamientos en los que se colocan espaciadores axiales (entre dos discos consecutivos o entre conductores de arrollamientos helicoidales), y es producido por la flexión del conductor en la parte comprendida entre espaciadores. Es fácil llegar a la conclusión, a través de la [Figura 5.39](#), que en la zona donde el conductor se apoya en dichos espaciadores, es donde el material de éste soporta cargas más altas.

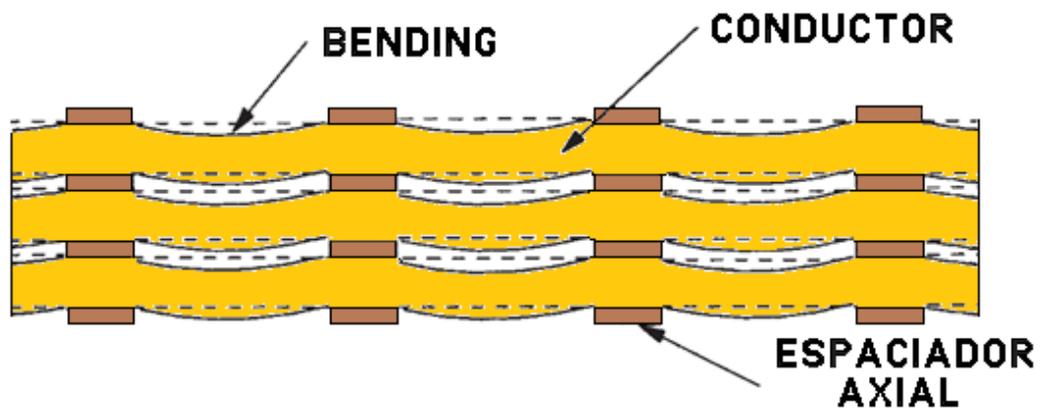


Figura 5.39. Bending.

Para evitar este fenómeno basta con disminuir la distancia entre espaciadores, pero esto se ve limitado por la capacidad de refrigeración, ya que deben existir unos canales de circulación que proporcionen una sección de paso suficiente al flujo de aceite.

5.2.3 Buckling

El *buckling* es un modo de fallo que sólo se presenta en arrollamientos sometidos a compresión. Éste es diferente dependiendo de si los separadores radiales están suficientemente bien anclados y por tanto no pueden moverse¹⁷ o, por el contrario, la resistencia que oponen estos separadores a las fuerzas radiales es prácticamente nula. En el primer caso se habla de *buckling forzado* mientras que en el segundo caso se habla de *buckling libre*.

El *buckling libre* es análogo al visto en el punto anterior: una viga apoyada en dos extremos sometida a una carga lineal, pero esta vez los apoyos de la viga son los separadores radiales y la carga aplicada a la viga son las fuerzas radiales de compresión. En este caso el modo de fallo es que el cilindro se deforma de modo que aparecen ondulaciones a lo largo de la circunferencia del arrollamiento (*Figura 5.40*).

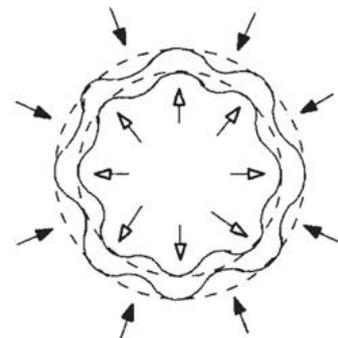


Figura 5.40. Buckling libre.

El *buckling forzado* se produce cuando el arrollamiento está bobinado alrededor de un cilindro de cartón prensado con poca resistencia a la compresión. En una circunferencia perfecta, las fuerzas radiales se compensan

¹⁷ Lo mismo ocurriría si el arrollamiento está bobinado sobre un cilindro de cartón rígido.

entre sí dando una resultante nula. Sin embargo, ninguna circunferencia es perfecta, por lo que en la práctica las fuerzas aplicadas sobre la periferia tienen una resultante que tiende a deformar el arrollamiento dejando un bulto en su superficie, como se muestra en la figura (*Figura 5.41*).

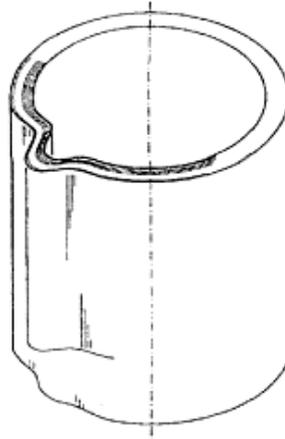


Figura 5.41. Buckling forzado [Ber98].

5.2.4 Fallo por fuerzas radiales de tracción

El fallo por fuerzas de tracción es menos probable que el fallo por fuerzas de compresión, ya que un cilindro es más resistente a tracción que a compresión. El fallo por fuerzas de tracción se produce en el arrollamiento externo y se da cuando la fuerza de compresión por unidad de superficie (en este caso el producto del espesor del arrollamiento por la altura) supera el límite elástico del cobre.

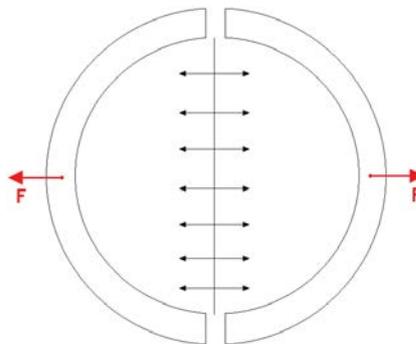


Figura 5.42. Fuerzas de tracción.



Capítulo 6

Resultados

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es comparar las corrientes de cortocircuito de una serie de transformadores con distintas configuraciones. Por lo tanto, los transformadores que se elijan para el estudio deben permitir analizar la influencia de los siguientes factores:

- Presencia o ausencia de arrollamiento de estabilización.
- Régimen de neutro.
- Disposiciones espaciales de los arrollamientos.
- Potencia de cortocircuito de la red.
- Impedancia homopolar del transformador.

A este fin se han elegido una serie de transformadores (casos básicos en estudio) que se indican en el apartado 6.2. Para que el análisis cubra un amplio rango de casos, se harán modificaciones sobre los parámetros de los casos básicos en estudio.



En el apartado 6.3 se indican los parámetros sobre los que se ha hecho un estudio paramétrico, pasando más tarde a presentar los resultados de las simulaciones.

En el apartado 6.1 se describe someramente el programa usado para los cálculos de las corrientes de cortocircuito.

6.1 Programa informático usado

El programa informático utilizado está desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid y Unión Fenosa Distribución en el marco de un proyecto sobre revisión de diseño de los transformadores de la red de Unión Fenosa. Se compone de una serie de módulos implementados en Matlab que interactúan con hojas de cálculo Excel en las que se le introducen los datos de las características de transformadores.

El programa parte de las dimensiones geométricas del transformador, así como de las propiedades de los materiales que lo componen. El primer módulo del programa obtiene las impedancias del circuito equivalente ante secuencia directa a partir de las dimensiones geométricas. Aunque la impedancia de cortocircuito calculada por el programa no difiere en exceso de las obtenidas en los ensayos en fábrica, dicha aplicación permite introducir el valor de la impedancia obtenido de los ensayos de fábrica si es que se dispone de este dato. En la mayoría de las simulaciones realizadas se han utilizado los valores de las impedancias obtenidos en fábrica.

El segundo módulo del programa obtiene las corrientes de cortocircuito en diferentes casos (cortocircuitos trifásicos, cortocircuitos monofásicos en AT, cortocircuitos monofásicos en BT) a partir de las impedancias. Los circuitos equivalentes utilizados en este módulo son los mostrados en la *Figura 6.43*.

El tercer módulo del programa (que no se usó en este Proyecto Fin de Carrera) obtiene las fuerzas sobre los arrollamientos en caso de cortocircuito, así como los

esfuerzos correspondientes. Un módulo previo comprueba que geoméricamente las dimensiones proporcionadas son consistentes entre sí, ya que es muy frecuente la existencia de pequeñas erratas en los datos de entrada.

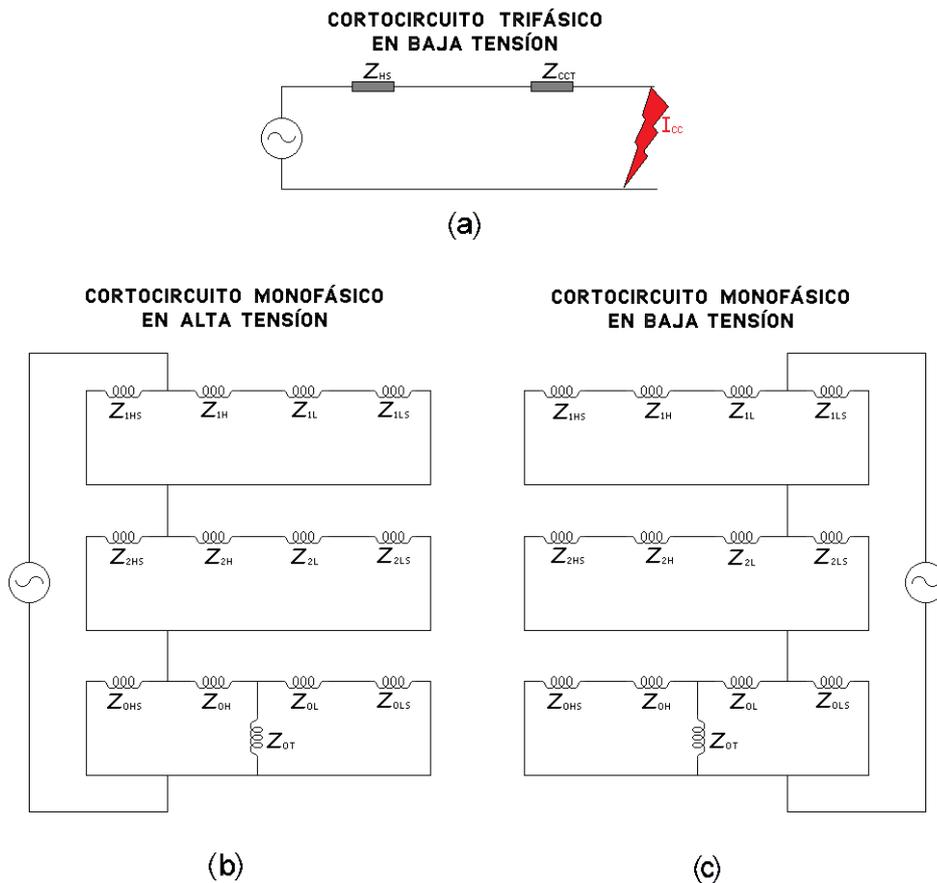


Figura 6.43. Circuitos equivalentes utilizados: a) Circuito equivalente utilizado para el estudio de cortocircuitos trifásicos en baja tensión. b) Circuito utilizado para el estudio de cortocircuitos monofásicos en alta tensión. c) Idem en baja tensión.

El programa utilizado no permitía muchos grados de libertad a la hora de definir el circuito equivalente ante secuencia homopolar, ya que la topología de cada uno de los circuitos equivalentes (ante secuencia directa, ante secuencia inversa o ante secuencia homopolar) es la de un circuito en T, en la que todos los parámetros del circuito de secuencia homopolar guardan la misma relación de semejanza respecto de los parámetros del circuito de secuencia directa (para los casos básicos en estudio esta



relación de semejanza se tomó como 0,9). Inicialmente los casos fueron estudiados con ese circuito equivalente.

Sin embargo, los ensayos en fábrica disponibles mostraron que la hipótesis mencionada en el párrafo anterior no se cumple en la realidad y eso justificó la necesidad de disponer de un mayor número de grados de libertad. Por tanto se modificó el programa para poder considerar un circuito equivalente en T en el que se pudieran variar de manera independiente cada uno de los parámetros de la T y se ejecutaron nuevos casos con el programa modificado.

Para el caso particular de transformadores con el Terciario abierto, las ramas del circuito equivalente con tres grados de libertad, corresponden a las impedancias de AT y BT, mientras que la tercera rama corresponde a la impedancia magnetizante del transformador. Por el contrario, para transformadores con Terciario las tres ramas del circuito equivalente corresponden a las impedancias del lado de AT, del lado de BT y del Terciario.

6.2 Transformadores en estudio

Los transformadores que se usan en el estudio son los mostrados en la [Tabla 6.3](#). Como se indicó al inicio del capítulo, los transformadores de dicha tabla son casos base sobre los que se realizará un estudio de sensibilidad de las corrientes de cortocircuito ante las variaciones de ciertos parámetros.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Disposición de arrollamientos	Configuración	S _{ccred} (MVA)	
					Alta	Baja
A	132-21	50	BATR	YNyd	7200	650
B	230-45	120	BATR	YNynd	19000	2000
C	220-66	150	BATR	YNynd	19000	3600
D	230-45	120	BART	YNynd	19000	2000
E	220-21	40	BART	YNyd	19000	650
F	136-21	30	TBAR	YNyd	7200	650
G	45-15	25	TBAR	Yyd	2000	650
H	45-15	15	TBAR	Yyd	2000	650
I	45-15	15	TBAR	Yyd	2000	650
J	132-45	30	TBAR	YNynd	7200	650
K	220-71	75	TBAR	YNynd	19000	3600

Tabla 6.3. Características base de los transformadores en estudio.

Se puede notar que entre los equipos elegidos se encuentran transformadores con distintas tensiones, potencias, ubicación del Terciario y regímenes de neutro. Todos los transformadores elegidos disponen de arrollamiento Terciario, aunque el programa permite realizar la simulación con el Terciario abierto o con el Terciario cerrado. No obstante, las distancias geométricas entre arrollamientos, entre éstos mismos y la cuba, etc, corresponden a un transformador con Terciario, aunque en la mayoría de los estudios¹⁸ esto no tiene influencia.

Las simulaciones presentadas en este capítulo se realizaron siempre con el transformador en la toma de mayor tensión. En la *Tabla 6.4* se muestran las impedancias ante secuencia directa de los transformadores en estudio en la toma mencionada considerando que existe un arrollamiento Terciario en triángulo cerrado. Como se indicó en el capítulo 3 [deL09], en un transformador de tres arrollamientos, la impedancia del arrollamiento ubicado en el centro puede ser negativa, esto va a tener una gran influencia en los resultados que se obtengan (*Tabla 6.4*). No obstante, cuando un transformador trabaja en la toma de mínima tensión es posible que las tres impedancias sean positivas, en cuyo caso los resultados pueden diferir de los que se mostrarán.

¹⁸ En todos salvo en aquellos transformadores en los que el arrollamiento terciario se encuentre ubicado entre el arrollamiento de AT y el arrollamiento de regulación (llamados transformadores BATR).

Transformador	Impedancia de AT	Impedancia de BT	Impedancia Terciario	Impedancia de cortocircuito	Disposición arrollamientos
A	-2,9	17,6	16,5	14,7	BATR
B	-4,1	19,6	20,5	15,5	BATR
C	-3,6	18,6	16,6	15	BATR
D	-3,6	18,2	22,3	14,6	BART
E	-0,1	13,8	26,9	13,7	BART
F	12,5	-1,0	5,2	11,5	TBAR
G	12,9	-1,4	7,6	11,5	TBAR
H	13,0	-1,2	6,3	11,8	TBAR
I	12,4	-1,0	5,9	11,4	TBAR
J	16,1	-1,1	7,1	15	TBAR
K	15,8	-0,9	5,9	14,9	TBAR

Tabla 6.4. Impedancias del circuito de secuencia directa e impedancia de cortocircuito de los transformadores en estudio.

La potencia de cortocircuito que figura en la *Tabla 6.3* es la potencia de cortocircuito normalizada por Unión Fenosa para sus redes eléctricas en función de la tensión, no obstante, esté parámetro, como muchos otros, se ha hecho variar durante el estudio.

Para el cociente entre la impedancia homopolar de la red y la impedancia de ésta ante secuencia directa (X_0/X_1) se ha tomado, para el caso de puesta a tierra, el valor de 3, ya que es una de las condiciones (< 3) para tener un sistema efectivamente puesto a tierra como se indicó en el capítulo 3.1. Sin embargo, para el caso de sistema aislado, se ha tomado un valor muy alto del orden de 10^{13} , para garantizar el aislamiento.

Todos los transformadores de la *Tabla 6.3* tienen regulación de tensión con preselector de tipo inversor. Aunque se disponía de datos de diseño para transformadores con regulación fina-gruesa, este tipo de transformadores no se analizaron, ya que el programa de cálculo de impedancias a partir de las dimensiones geométricas para ese tipo de transformadores no estaba operativo a la hora de realizar el estudio.

6.3 Estudio paramétrico

Los factores que se han variado en el estudio paramétrico para poder obtener conclusiones de aplicación más generales y que se pueda valorar la influencia de cada uno de los factores son los siguientes:

- Potencia de cortocircuito de la red.
- Régimen de neutro.
- Cociente entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa (Z_0/Z_1), cuando se trabaja con el circuito equivalente homopolar en T con un sólo grado de libertad respecto al circuito equivalente de secuencia directa.

Para el caso de utilizar el circuito de secuencia homopolar con tres grados de libertad se han hecho los siguientes estudios paramétricos:

- Para transformadores sin Terciario, reparto de la impedancia homopolar entre el arrollamiento de AT y el de BT conservando el valor de Z_{0AB} .
- Para transformadores sin Terciario, análisis de la influencia de la impedancia magnetizante de secuencia homopolar.
- Para transformadores con Terciario, análisis de la influencia de la impedancia homopolar de BT manteniendo las impedancias homopolares de AT y de Terciario.
- Para transformadores con Terciario, análisis de la influencia del reparto de la impedancia homopolar entre el arrollamiento de AT y el de BT conservando constante la impedancia homopolar del Terciario.

Por razones de tiempo en los diferentes estudios no se tomaron todos los transformadores de la [Tabla 6.3](#), sino una selección representativa de éstos, para poder observar los cambios en las corrientes de cortocircuito.

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos estudios.

6.3.1 Influencia de la potencia de cortocircuito de la red

Como se puede observar en la *Tabla 6.3*, las potencias de cortocircuito normalizadas dependen del nivel de tensión de la red. Sin embargo, las potencias de cortocircuito de las redes reales no necesariamente coinciden con las potencias de cortocircuito normalizadas, pues depende de si se tiene una red poco mallada o muy mallada, más o menos alejada de generación, etc. Por ello se realizó un análisis de sensibilidad variando dichas potencias para poder observar su influencia en los equipos.

Para realizar este estudio de sensibilidad se tomaron 5 transformadores con distintas disposiciones de arrollamientos, distintos regímenes de neutro y tensiones de AT y BT (*Tabla 6.5*). En cada uno de los transformadores se hizo variar la potencia de cortocircuito desde un 10% de la potencia expresada en la *Tabla 6.3*, hasta un 120% de la misma, con intervalos de 10%. Por lo tanto se ejecutaron un total de 60 casos con presencia de Terciario y otros 60 considerando el arrollamiento de estabilización abierto. En las simulaciones se hizo variar la potencia de cortocircuito de la red de AT y la de la red de BT con idéntico factor.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Disposición de arrollamientos	Configuración
A	132-21	50	BATR	YNyd
B	230-45	120	BATR	YNynd
D	230-45	120	BART	YNynd
G	45-15	25	TBAR	Yyd
K	220-71	75	TBAR	YNynd

Tabla 6.5. Equipos en el estudio de variación de la potencia de cortocircuito de la red.

Las corrientes de cortocircuito mostradas en los próximos apartados se han expresado en p.u. sobre la corriente asignada de cada arrollamiento (es decir,

la base de potencia para el arrollamiento Terciario es distinta de la de AT y BT), ya que esto proporciona una idea más clara de las sobrecorrientes en cada arrollamiento.

6.3.1.1 Influencia de la potencia de cortocircuito de la red en el caso de cortocircuito trifásico en BT

En la *Figura 6.44* se muestra la intensidad de cortocircuito de los transformadores analizados en función de la potencia de cortocircuito de la red de A.T¹⁹.

Como se puede observar en la *Figura 6.44* la corriente de cortocircuito del transformador aumenta al aumentar la potencia de cortocircuito de la red; para pequeñas potencias de cortocircuito la influencia de este parámetro en la corriente de cortocircuito es significativa mientras que para potencias de cortocircuito elevadas la influencia es muy reducida, pues para estos casos la impedancia interna de la red es despreciable frente a la del transformador. La dependencia de las corrientes de cortocircuito con la potencia de cortocircuito de la red sigue el mismo patrón para todos los transformadores estudiados, independientemente del rango de tensiones, potencia del equipo, disposición de arrollamientos, configuración o explotación del Terciario. Además, al tratarse de un cortocircuito simétrico las corrientes de cortocircuito en p.u. son idénticas en el lado de AT y BT.

¹⁹ En las simulaciones se aplicó, a la potencia de cortocircuito de las redes de AT y de BT, el mismo coeficiente.

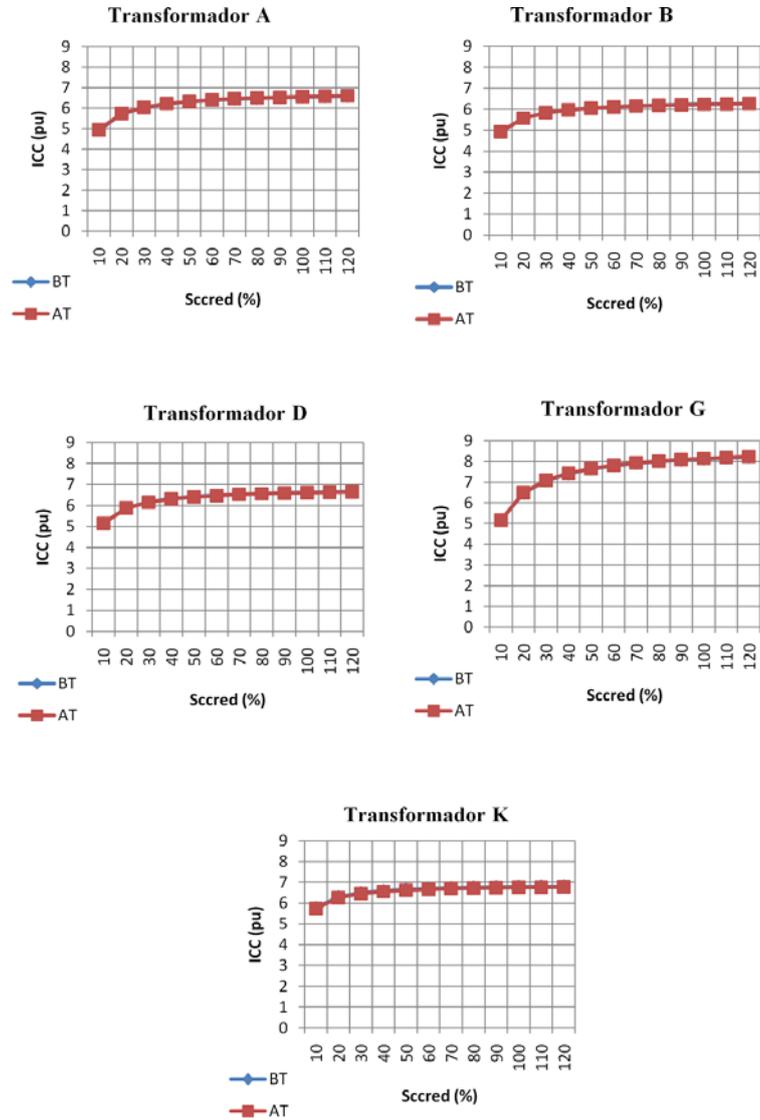


Figura 6.44. Corriente de cortocircuito trifásico en BT de los transformadores en estudio con variación en su potencia de cortocircuito.

6.3.1.2 Influencia de la potencia de cortocircuito de la red sobre la corriente de cortocircuito en caso de cortocircuitos monofásicos en transformadores sin Terciario

El circuito equivalente utilizado en este caso es el mostrado en la *Figura 6.45* (según el cortocircuito se realice en la red de AT o en la de BT). En los circuitos equivalentes ante secuencia homopolar se ha añadido un interruptor para simular el régimen de neutro de cada uno de los arrollamientos del transformador.

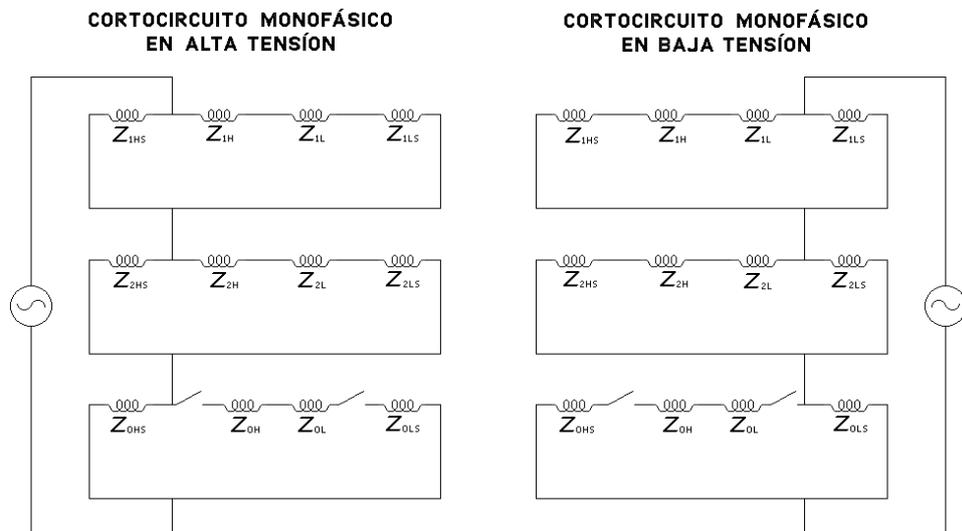


Figura 6.45. Circuitos equivalentes para cortocircuitos monofásicos.

En las *Figura 6.46* se muestra la corriente de cortocircuito en los diferentes transformadores en función de la potencia de cortocircuito de la red para el caso de un cortocircuito monofásico en AT o en BT. Como se observa, el comportamiento es muy semejante en todos los transformadores que tienen el neutro puesto a tierra tanto en AT como en BT (transformadores B, D y K).

En los transformadores B, D y K ambos lados del transformador están puestos a tierra, por ello las componentes de secuencia directa, de secuencia inversa y de secuencia homopolar de la corriente de

cortocircuito (expresadas en p.u.) son idénticas para el arrollamiento de AT que para el arrollamiento de BT, como se desprende de la *Figura 6.46*.

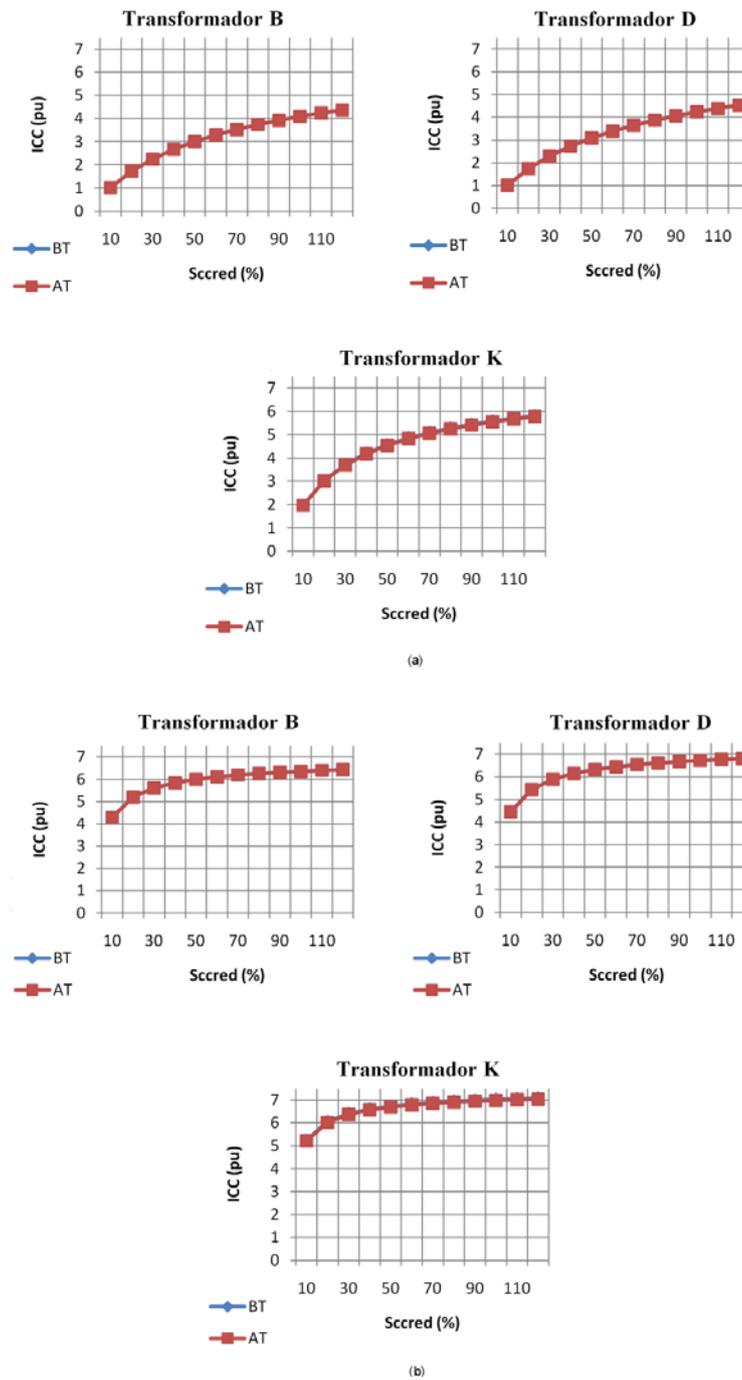


Figura 6.46. Corrientes de cortocircuito monofásico en los transformadores en estudio sin Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red: a) Cortocircuito monofásico en AT. b) Cortocircuito monofásico en BT.

Por el contrario, para el caso de que una de las dos redes carezca de neutro, el valor de la corriente de cortocircuito en p.u. es diferente para el arrollamiento de AT que para el arrollamiento de BT. Ello es debido a que sólo puede circular componente homopolar de corriente por el arrollamiento que tiene su neutro puesto a tierra, que de esta forma sufre corrientes más elevadas como se muestra en la *Figura 6.47*. Como es sabido, el hecho de que las componentes homopolares de los arrollamientos del transformador no estén balanceadas hace que la componente homopolar de corriente se convierta en una corriente magnetizante, por lo que circulan flujos homopolares por el transformador.

Adicionalmente, el hecho de que la impedancia homopolar que presenta el transformador en este caso sea más elevada, hace que las corrientes, expresadas en p.u., sean más reducidas que las que se tendrían si ambos neutros estuvieran puestos a tierra.

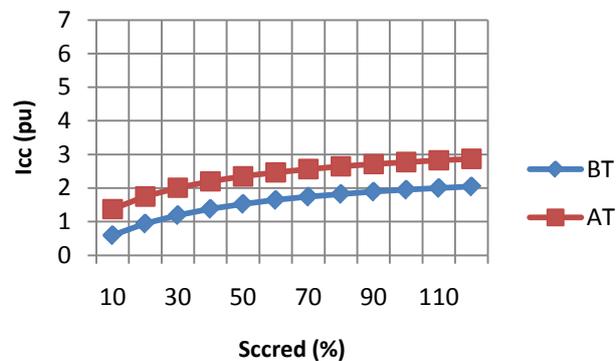


Figura 6.47. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A sin Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

6.3.1.3 Influencia de la potencia de cortocircuito de la red sobre la corriente de cortocircuito en caso de cortocircuitos monofásicos en transformadores con Terciario

En esta ocasión también es preciso diferenciar el caso de transformadores en los que uno de los lados tenga el neutro puesto a tierra mientras que el otro lado esté aislado, del resto de los supuestos.

A. Caso de transformadores YNyd

En el caso de que sólo uno de los lados del transformador tenga neutro (como ocurre en el caso del transformador A), al producirse un cortocircuito fase-neutro en el lado del transformador que tiene su neutro puesto a tierra, circula por este arrollamiento una componente homopolar de corriente que engendra en el arrollamiento Terciario una corriente homopolar (*Figura 6.48*). Al ser el dimensionado del arrollamiento Terciario de potencia menor a la de los otros dos arrollamientos, este arrollamiento queda fuertemente sobrecargado. Sin embargo, el arrollamiento que tiene su neutro aislado no tiene componente homopolar de corriente. Por ello la corriente en ese arrollamiento (expresada en p.u.) es menor que la del arrollamiento con el neutro puesto a tierra.

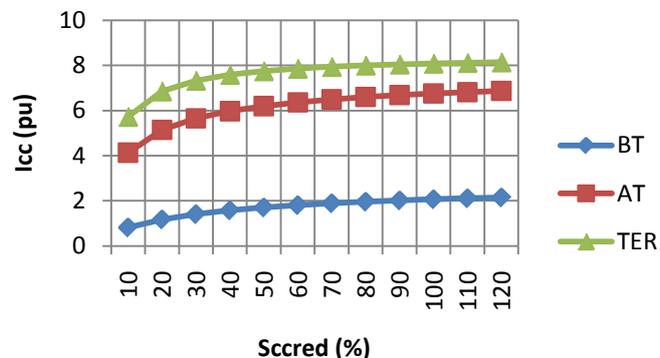


Figura 6.48. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

Comparando la *Figura 6.47* y *Figura 6.48* se observa que en el transformador A, en el caso de un cortocircuito monofásico en AT la corriente por el lado de BT es idéntica en los dos casos, sin embargo la corriente por el lado de AT es mucho mayor en el caso de transformador con Terciario (*Figura 6.48*), ya que la impedancia homopolar que presenta el transformador a la red de AT es mucho menor con Terciario que sin él.

B. Caso de transformadores YNynd

Para el caso de que tanto el arrollamiento de AT como el de BT tengan el neutro puesto a tierra, la cuantía de las corrientes y su evolución al variar la potencia de cortocircuito de la red depende de la ubicación de los diferentes arrollamientos y del lado en el que se produzca el cortocircuito.

B.1. Cortocircuito monofásico en AT de un transformador con disposición de arrollamientos BATR o BART

En transformadores BATR y BART la impedancia de AT tiene signo negativo. En la *Figura 6.49* se muestra el circuito para la determinación de la corriente de cortocircuito en este caso.

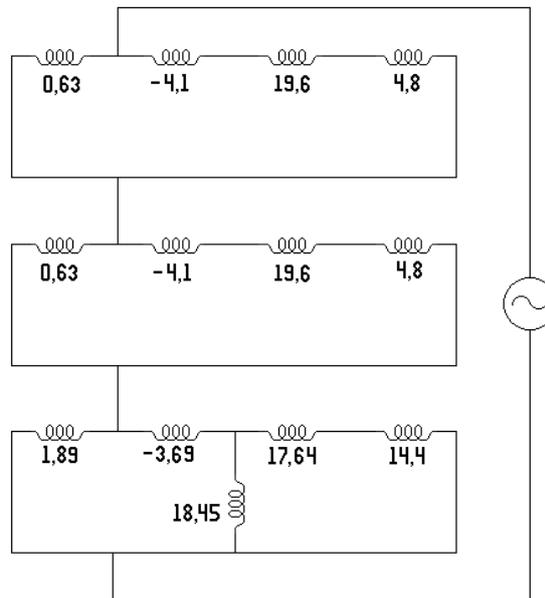


Figura 6.49. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en AT en el transformador B.

Al aumentar la potencia de cortocircuito se reduce la impedancia de la red, con lo que aumenta la corriente de cortocircuito en todos los arrollamientos, como se muestra en la [Figura 6.50](#) y [Figura 6.51](#).

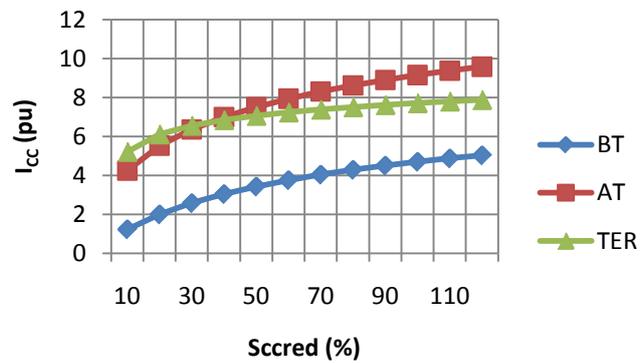


Figura 6.50. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador B con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

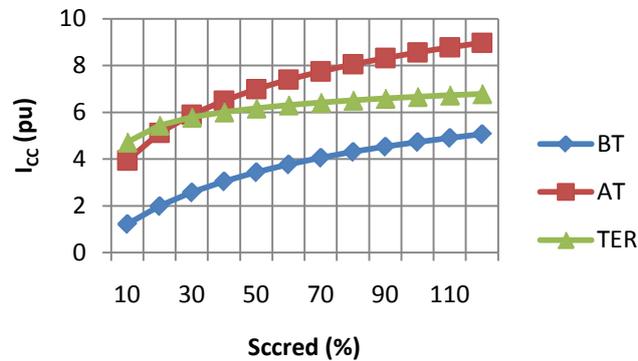


Figura 6.51. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador D con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

Como es sabido, por el arrollamiento Terciario sólo circula corriente homopolar. El reparto de la corriente homopolar que circula por el arrollamiento de AT y entre los arrollamientos de BT y Terciario viene dado por la parte inferior del circuito de la [Figura 6.49](#). Cuanto mayor sea la impedancia de la rama de la derecha (correspondiente a la suma de la impedancia homopolar del arrollamiento de BT y la impedancia homopolar de la red de BT) menos proporción de la corriente se derivará por esa rama y más por la rama del Terciario. Esto significa que al reducirse la impedancia de cortocircuito de la red la corriente que circula por el Terciario es proporcionalmente mayor, como se aprecia en la [Figura 6.50](#) y [Figura 6.51](#).

B.2. Cortocircuito monofásico en AT de un transformador con disposición de arrollamientos TBAR

En transformadores TBAR la impedancia de BT tiene signo negativo. En la [Figura 6.52](#) se muestra el circuito para la determinación de la corriente de cortocircuito en este caso.

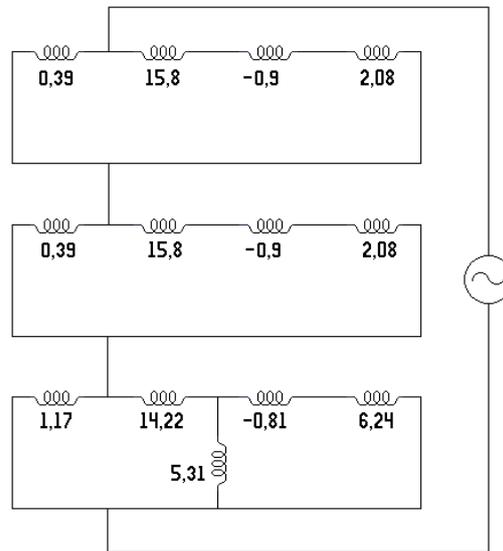


Figura 6.52. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en AT en el transformador K.

Como se puede observar en la parte inferior de la [Figura 6.52](#), la impedancia de la rama de la derecha es la suma, con su signo, de la impedancia homopolar de la red de BT y de la del arrollamiento de BT del transformador, dado que en este caso la impedancia del arrollamiento de BT es negativa, cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito de la red menor será la impedancia de esa rama, lo cual tiene dos efectos: de un lado aumenta la corriente de cortocircuito en el arrollamiento de AT y de otro disminuye la corriente que circula por el Terciario, como se muestra en la [Figura 6.53](#). Esta disminución de la corriente del Terciario conlleva un aumento proporcionalmente mayor de la corriente en el arrollamiento de BT que en el arrollamiento de AT.

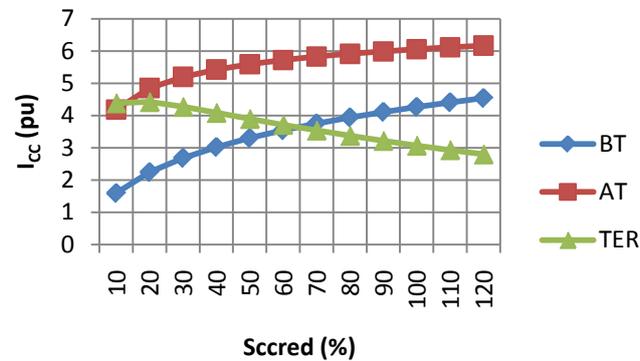


Figura 6.53. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador K con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

Por lo demás, en tanto que la impedancia homopolar del arrollamiento de BT sea inferior a la impedancia homopolar de la red de BT, la corriente en p.u. del arrollamiento de AT es mayor que la corriente en p.u. del arrollamiento de BT y que la corriente en p.u. del Terciario como es normal en este tipo de cortocircuito.

B.3. Cortocircuito monofásico en BT de un transformador con disposición de arrollamientos BATR o BART

En la *Figura 6.54* se muestra el circuito para la determinación de la corriente de cortocircuito en este caso.

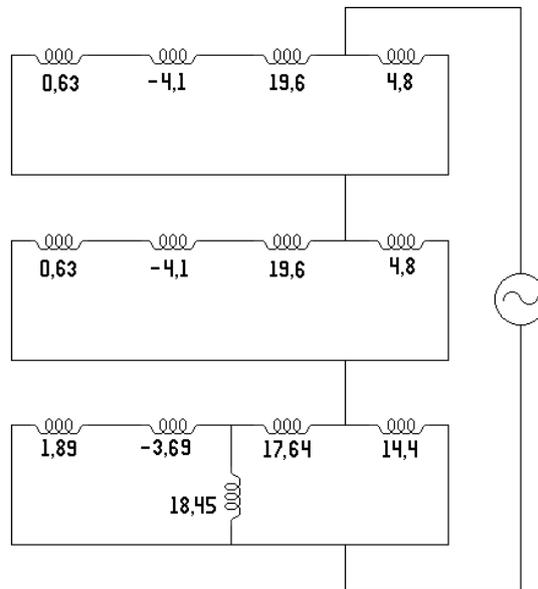


Figura 6.54. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en BT en el transformador B.

En este caso, al ser la impedancia de cortocircuito de la red de AT mucho menor que la impedancia de la red de BT, puede ocurrir que la impedancia de la rama de la izquierda del circuito equivalente ante secuencia homopolar sea negativa. Para valores reducidos de la potencia de cortocircuito, sin embargo, la impedancia de la izquierda es positiva, y en esas circunstancias la corriente en p.u. por el arrollamiento de BT es superior a la del arrollamiento de A.T. (*Figura 6.55* y *Figura 6.56*). Al aumentar la potencia de cortocircuito, y reducirse la impedancia homopolar de la red, llega un momento en el que la impedancia de la rama de la izquierda es nula, con lo que no circula intensidad alguna por el arrollamiento Terciario. Para valores progresivamente crecientes de la potencia de cortocircuito, la impedancia de la rama de la izquierda es negativa, y por ello cambia el ángulo de fase de la corriente por el arrollamiento de AT, de modo que la corriente en este arrollamiento supera a la de BT.

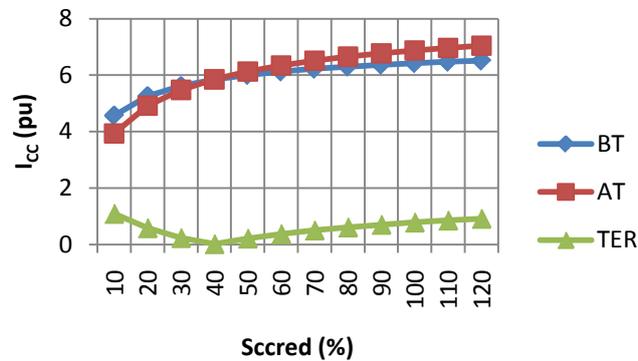


Figura 6.55. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador B con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

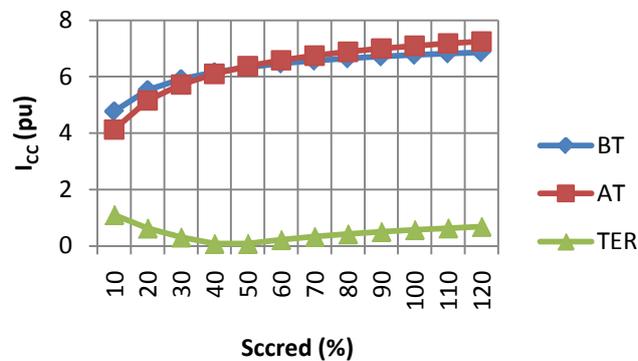


Figura 6.56. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador D con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

B.4. Cortocircuito monofásico en BT de un transformador con disposición de arrollamientos TBAR

Un razonamiento similar, en lo cualitativo al realizado en el punto B.1 de este apartado, puede aplicarse al caso de cortocircuitos monofásicos en la red de BT en el caso de transformadores TBAR. En la [Figura 6.57](#) se muestra el circuito que se utiliza para el cálculo de las corrientes de cortocircuito y en la [Figura 6.58](#) la variación de la corriente en los arrollamientos en función de la impedancia de cortocircuito de la red.

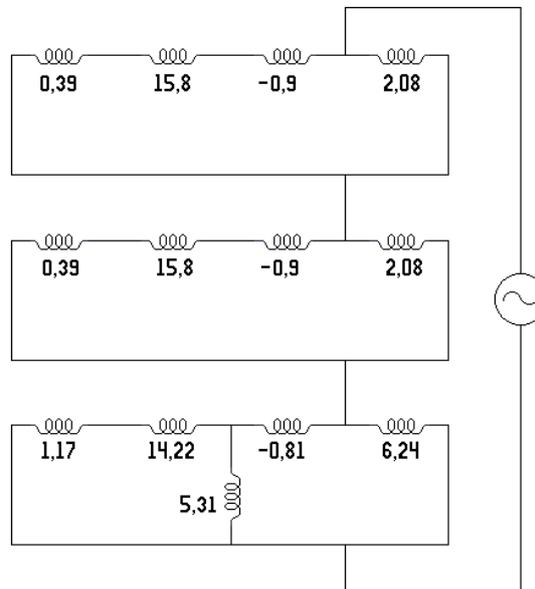


Figura 6.57. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en BT para el transformador K.

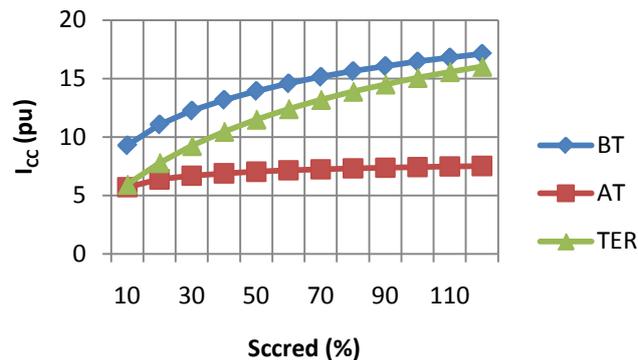


Figura 6.58. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador K con Terciario en función de la potencia de cortocircuito de la red.

Aunque la justificación de la evolución de las corrientes por los arrollamientos en este caso y en el caso del punto B.1 se puede justificar mediante el mismo razonamiento, es de destacar que la cuantía de las corrientes de BT y de Terciario en este caso es muy superior a la del apartado B.1. Esto es consecuencia de que en este caso la impedancia del Terciario es mucho más reducida que en el caso anterior, lo que hace que el transformador presente a la red una impedancia mucho menor a la del caso del apartado B.1.

6.3.2 Influencia del régimen de neutro

Con el fin de analizar la influencia que tiene el régimen de neutro de los arrollamientos del transformador, se han realizado simulaciones con los cuatro transformadores indicados en la *Tabla 6.6*.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Disposición de arrollamientos	Configuración
C	220-66	150	BATR	YNyNd
E	220-21	40	BART	YNyNd
F	136-21	30	TBAR	YNyNd
I	45-15	15	TBAR	YyD

Tabla 6.6. Equipos en el estudio de variación del régimen de neutro.

Las simulaciones se han realizado con la potencia de cortocircuito de la red del caso base y con las impedancias de los arrollamientos del caso base. Se han estudiado todas las posibilidades de puesta a tierra tanto en AT y BT, como en la combinación de ambas. Por lo tanto se han ejecutado un total de 16 casos con presencia de Terciario y otros 16 con la supresión del arrollamiento de estabilización.

6.3.2.1 Resultados de cortocircuito trifásico en BT

Como es lógico el régimen de neutro no influye a la corriente de cortocircuito en un fallo trifásico en BT (*Figura 6.59*). Los valores de corrientes de cortocircuito en AT y BT tienen valores similares en p.u por tratarse de un fallo simétrico mientras que por el Terciario la corriente es nula.

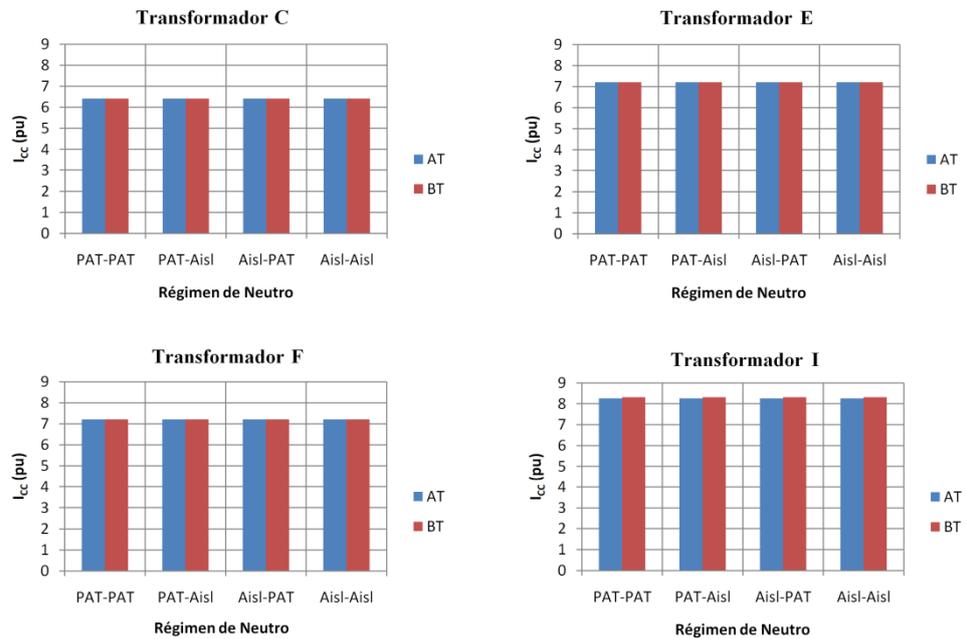


Figura 6.59. Corriente de cortocircuito trifásico en BT variando el régimen de neutro.

6.3.2.2 Resultados de cortocircuito monofásico en AT en transformadores con Terciario

El circuito equivalente para analizar este tipo de cortocircuito se muestra en la *Figura 6.60*. Los interruptores en dicha figura simulan la puesta a tierra (interruptor cerrado) o no (interruptor abierto) del neutro.

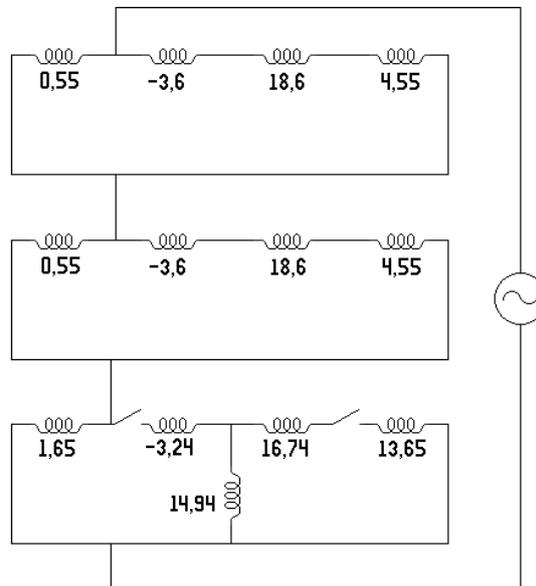


Figura 6.60. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en AT en el transformador C.

La impedancia homopolar de la red está muy relacionada con el régimen de neutro de dicha red. Para el caso de redes de 15 y 20 kV (como ocurre en el lado de BT de los transformadores E, F e I) la impedancia homopolar de la red es infinita.

En los cortocircuitos monofásicos la componente homopolar de la corriente de cortocircuito de los arrollamientos que tengan el neutro aislado será nula, sin embargo, pueden existir corrientes de secuencia directa y de secuencia inversa.

Como se aprecia en la [Figura 6.61](#) en caso de que las redes de AT y BT estén puestas a tierra, las corrientes de cortocircuito tanto en AT y BT son mayores si el transformador tiene su neutro puesto a tierra que si tiene el neutro aislado, ya que se reduce la impedancia homopolar del transformador.

Evidentemente, en los casos E, F e I (desde la [Figura 6.62](#) hasta la [Figura 6.64](#)) es irrelevante poner el neutro de BT a tierra o no, pues no

va a circular corriente homopolar por BT en ninguno de los casos ya que la red es una red de neutro aislado.

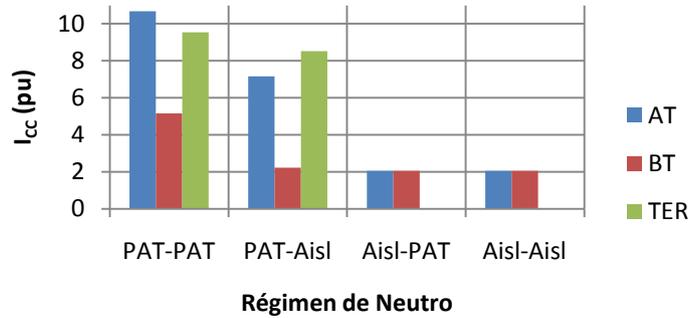


Figura 6.61. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador C (220/66 kV BATR) con Terciario variando el régimen de neutro.

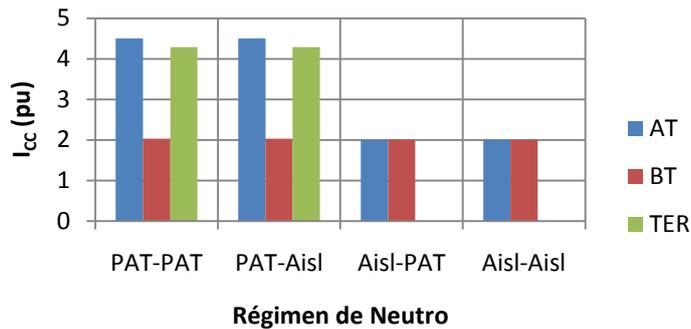


Figura 6.62. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador E (220/21 kV BART) con Terciario variando el régimen de neutro.

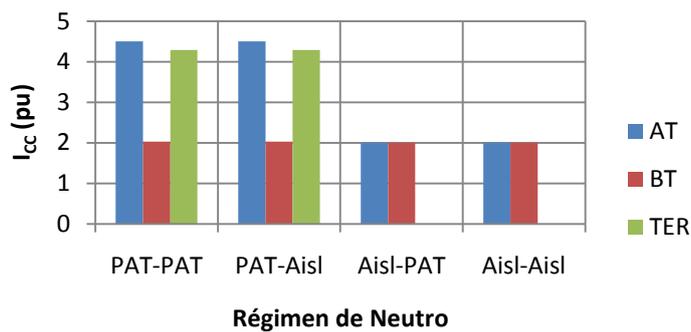


Figura 6.63. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador F (136/21 kV TBAR) con Terciario variando el régimen de neutro.

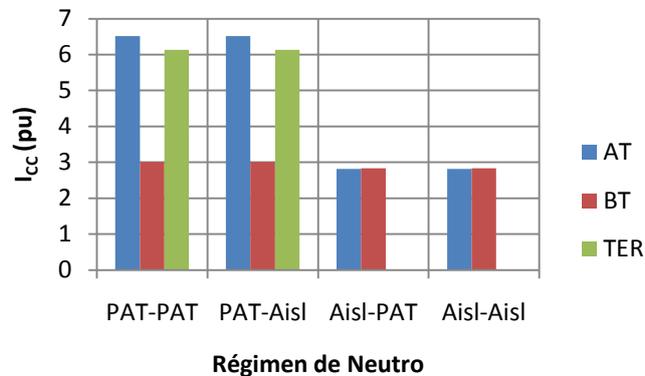


Figura 6.64. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador I (45/15 kV TBAR) con Terciario variando el régimen de neutro.

Para el caso de que el transformador tenga el neutro de AT aislado, la corriente en el arrollamiento de AT carece de componente homopolar, y por ello en caso de un cortocircuito fase-neutro en la red de AT²⁰, también carecen de componente homopolar las corrientes de BT y de Terciario, y esto se traduce en que las corrientes de AT y de BT (en p.u.) son idénticas y que la corriente por el Terciario es nula (desde la [Figura 6.61](#) hasta [Figura 6.64](#)).

6.3.2.3 Resultados de cortocircuito monofásico en BT en transformadores con Terciario

Para el caso de cortocircuitos monofásicos en BT ([Figura 6.65](#)) el patrón de corrientes es muy diferente en los transformadores C y E (en los que el Terciario es el arrollamiento externo o está alojado entre los arrollamientos de AT y de regulación) si se compara con los transformadores F e I (en los que el Terciario es interior), ya que en los dos primeros casos la impedancia homopolar de AT del transformador es negativa y las otras dos positivas, mientras que en los dos últimos la impedancia homopolar de BT es negativa.

²⁰ Se entiende que el cortocircuito no se produce *en bornas del transformador*, ya que éste no tiene neutro, sino en un punto de la red de AT.

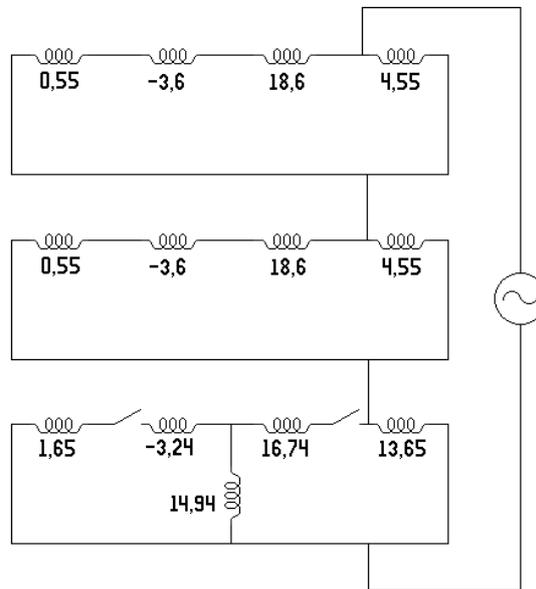


Figura 6.65. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en BT en el transformador C.

El caso más interesante es el caso del transformador E (*Figura 6.67*) con régimen de neutro PAT-PAT, pues la corriente por el Terciario es casi imperceptible debido a la gran impedancia de este arrollamiento. Por el contrario cuando el Terciario es el arrollamiento más interno las corrientes que circulan por dicho arrollamiento son más de 10 veces superiores a la corriente nominal (*Figura 6.68* y *Figura 6.69*). Estas simulaciones muestran los riesgos asociados a este tipo de diseño.

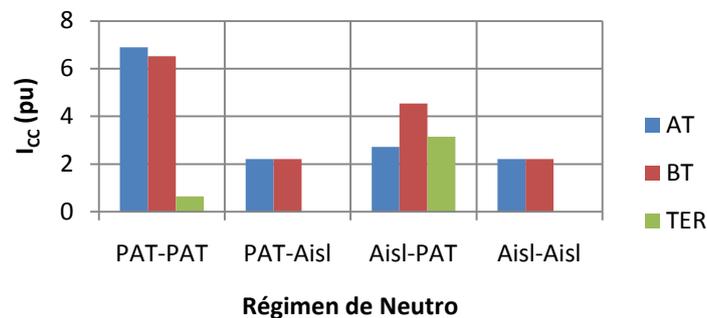


Figura 6.66. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador C (220/66 kV BATR) con Terciario variando el régimen de neutro.

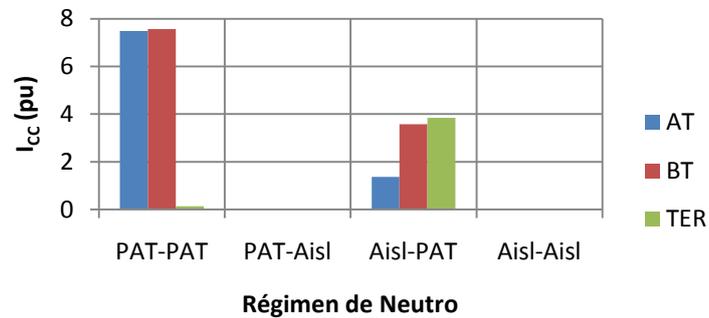


Figura 6.67. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador E (220/21 kV BART) con Terciario variando el régimen de neutro.

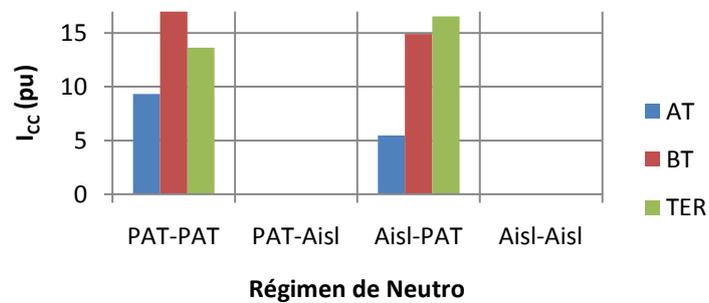


Figura 6.68. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador F (136/21 kV TBAR) con Terciario variando el régimen de neutro.

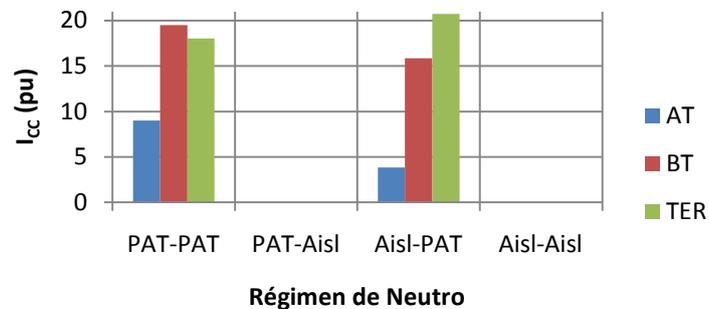


Figura 6.69. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador I (45/15 kV TBAR) con Terciario variando el régimen de neutro.

6.3.2.4 Resultados de cortocircuito monofásico en transformadores sin Terciario

Para la simulación con Terciario abierto, se puede observar (desde la [Figura 6.70](#) hasta la [Figura 6.77](#)) que en tanto en cuanto el tratamiento de neutro de las redes de AT y BT sea idéntico o bien sin ser idéntico si

que el neutro de AT está aislado y la red de BT es con neutro aislado, las corrientes de AT y BT son iguales.

En aquellos casos en los que está puesto a tierra el arrollamiento en el que se produce el cortocircuito y que el neutro del otro arrollamiento está aislado, las corrientes en los arrollamientos son diferentes dado que por uno de los arrollamientos puede circular una componente homopolar de corriente y por el otro no. Como se demuestra en los libros de texto de transformadores [Ras75] en este caso las corrientes homopolares no compensadas dan lugar a flujos desequilibrados en las tres columnas del transformador y a sobretensiones en las tensiones simples del mismo.

Las corrientes por los arrollamientos (desde la [Figura 6.70](#) hasta la [Figura 6.77](#)) son mucho menores que en el caso de Terciario en cortocircuito (desde la [Figura 6.61](#) hasta la [Figura 6.69](#)) debido al aumento de la impedancia homopolar del transformador.

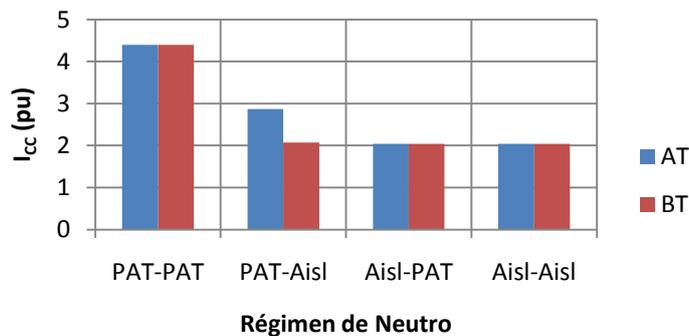


Figura 6.70. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador C (220/66 kV BATR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

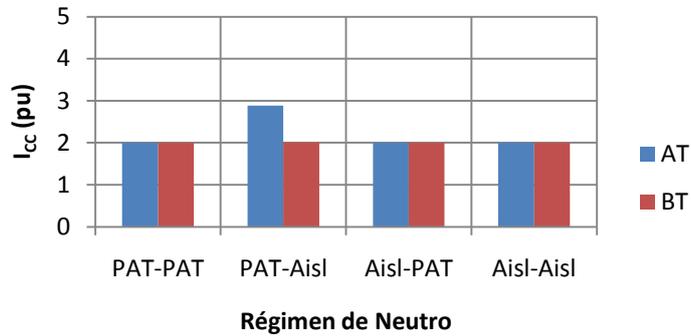


Figura 6.71. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador E (220/21 kV BART) sin Terciario variando el régimen de neutro.

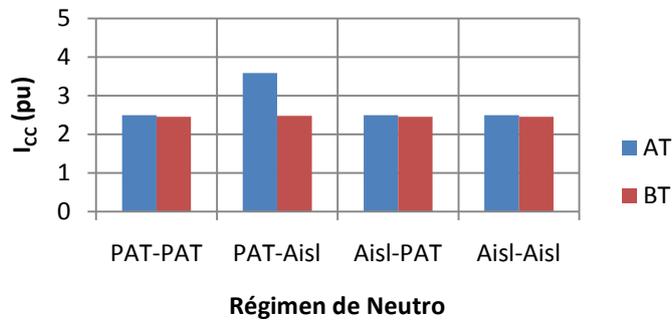


Figura 6.72. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador F (136/21 kV TBAR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

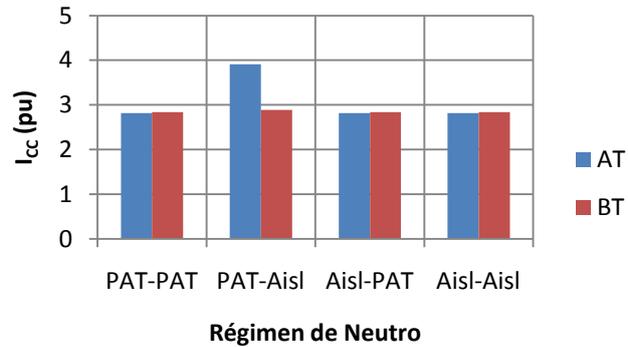


Figura 6.73. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador I (45/15 kV TBAR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

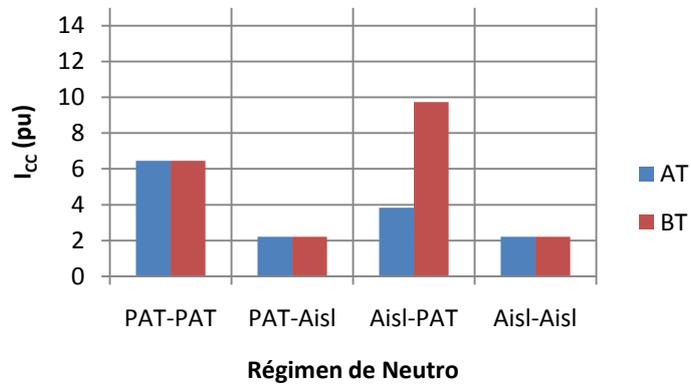


Figura 6.74. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador C (220/66 kV BATR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

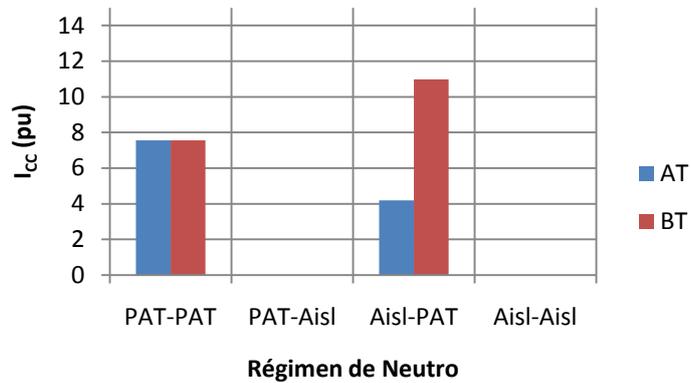


Figura 6.75. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador E (220/21 kV BART) sin Terciario variando el régimen de neutro.

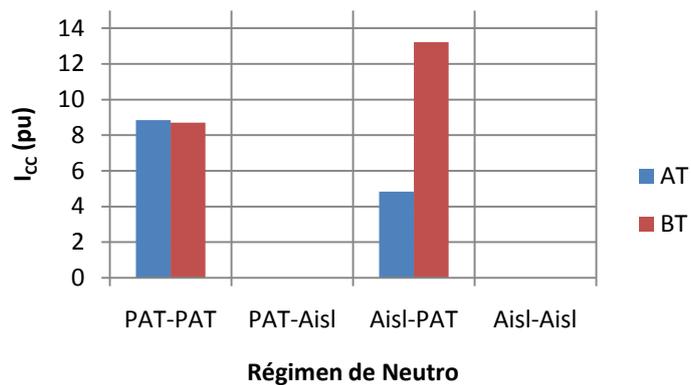


Figura 6.76. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador F (136/21 kV TBAR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

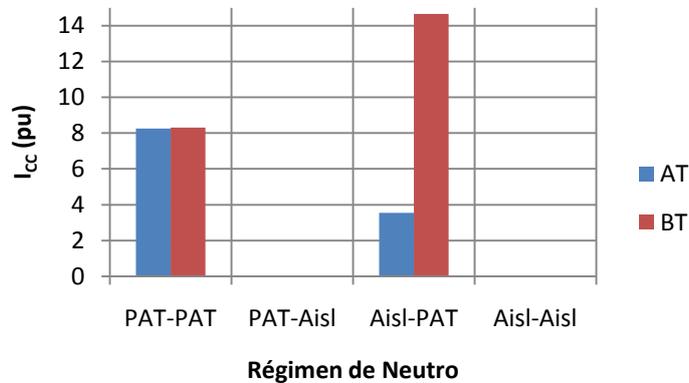


Figura 6.77. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador I (45/15 kV TBAR) sin Terciario variando el régimen de neutro.

6.3.3 Influencia del ratio de impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa

En los estudios realizados con el circuito equivalente que permite un sólo grado de libertad, se utilizó un ratio Z_0/Z_1 de 0,9 para los casos básicos en estudio, pues es una cifra común usada por un gran número de autores. No obstante, en los casos de transformadores sin Terciario y con régimen de neutro PAT-Aisl, se tomó igual a 10 para tener en cierto modo en cuenta la impedancia magnetizante. No obstante, el ratio 0,9 no se ajusta necesariamente a todos los equipos como se extrajo de ensayos realizados en fábrica.

Para estudiar la influencia de este ratio en el valor de la corriente de cortocircuito se han elegido 4 transformadores (*Tabla 6.7*) en los que se hizo un análisis de sensibilidad variando este ratio.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Disposición de arrollamientos	Configuración
A	132-21	50	BATR	YNyd
D	230-45	120	BART	YNynd
H	45-15	15	TBAR	Yyd
J	132-45	30	TBAR	YNynd

Tabla 6.7. Equipos en el estudio de variación de la impedancia homopolar.

El ratio se hizo variar desde 0,6 hasta 0,9 en tramos de 0,1, salvo en el caso del transformador A con ausencia de arrollamiento Terciario (PAT-Aisl), en el que se hizo variar el ratio desde 7 a 10 en intervalos de 1 para tener en cuenta la impedancia de magnetización. Por lo tanto se hicieron un total de 16 casos con Terciario cerrado y otros 16 con Terciario a circuito abierto.

6.3.3.1 Resultados de cortocircuito trifásico en BT en transformadores con variación de ratio Z_0/Z_1

Como es sabido, la impedancia homopolar no interviene en el valor de la corriente de un cortocircuito simétrico, por tanto la variación del ratio Z_0/Z_1 no influye a la corriente de cortocircuito en un fallo trifásico en BT como fue demostrado con las simulaciones.

6.3.3.2 Resultados de cortocircuito monofásico para transformadores sin Terciario con variación de ratio Z_0/Z_1

El circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de defecto es el circuito de la [Figura 6.78](#). Dado que el transformador A es un transformador YNy y que en ese caso las componentes homopolares de corriente de AT y de BT no están compensadas, se ha incluido una rama magnetizante en el circuito equivalente de secuencia homopolar. En los demás casos no se incluyó porque las componentes homopolares de corriente están compensadas o no existen.

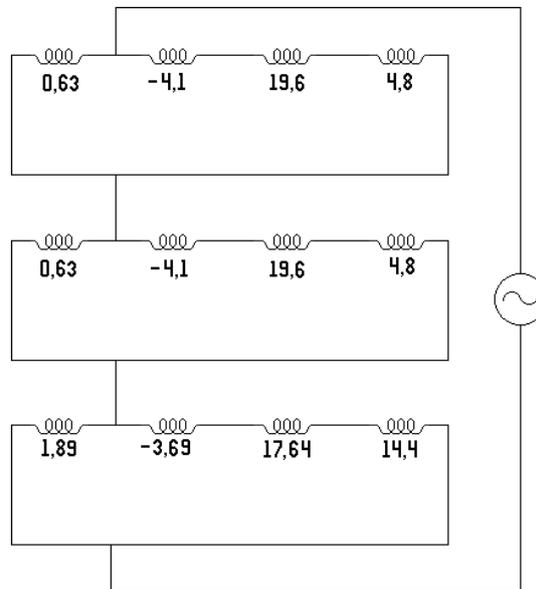


Figura 6.78. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en AT en el transformador B.

En las simulaciones realizadas en este apartado se han variado los tres parámetros del circuito homopolar del transformador en la misma proporción. Evidentemente, cuanto menor sea la impedancia homopolar mayor será la corriente, como se muestra desde la [Figura 6.80](#) hasta la [Figura 6.84](#). Las corrientes de AT y de BT aumentan en la misma cuantía al reducirse la impedancia homopolar excepto en el caso del transformador A ([Figura 6.79](#)), en el que no es posible que circulen componentes homopolares por el arrollamiento de BT mientras que sí que pueden circular en el arrollamiento de AT. En el transformador H ([Figura 6.81](#)) se tienen corrientes de AT y BT constantes pues al ser un transformador con sus neutros aislados de tierra, no circulan corrientes homopolares, por lo que la variación del ratio impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa, tiene una nula trascendencia.

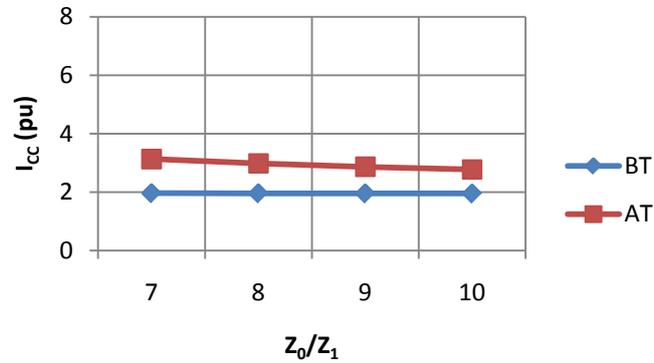


Figura 6.79. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

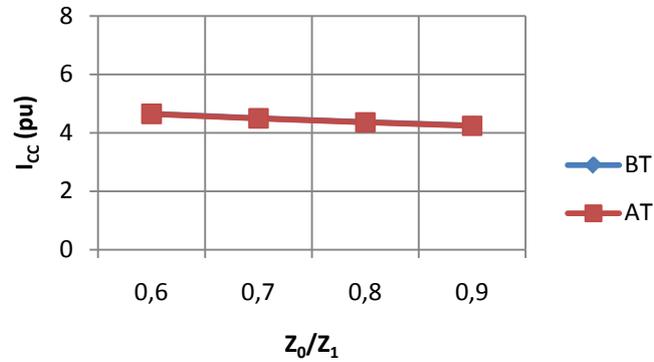


Figura 6.80. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador D sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

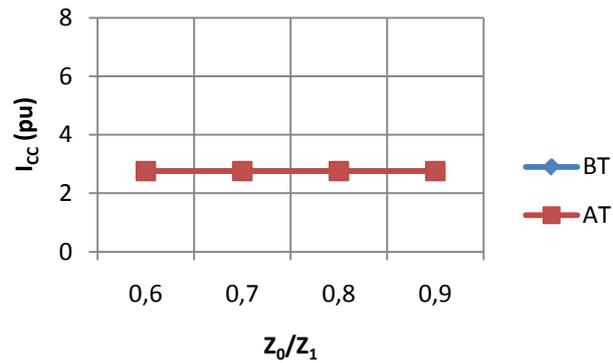


Figura 6.81. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador H sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

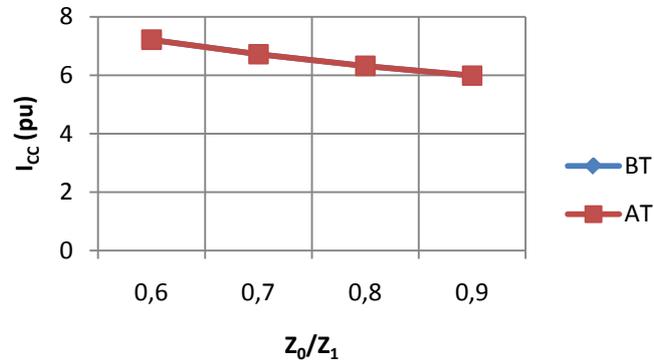


Figura 6.82. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador J sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

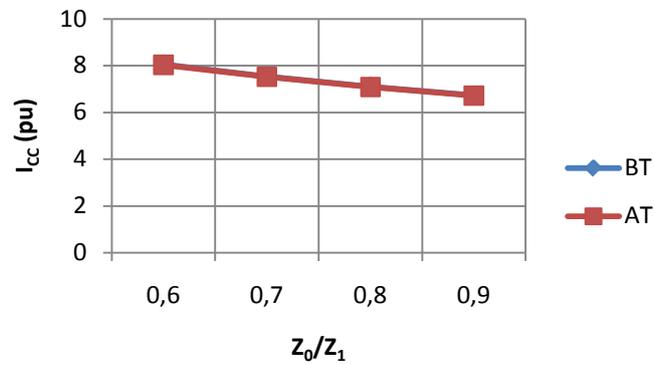


Figura 6.83. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador D sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

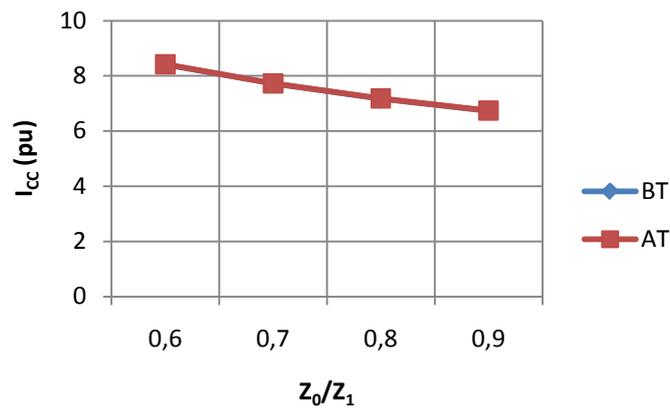


Figura 6.84. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador J sin Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

En el caso de cortocircuito monofásico en BT en los transformadores A y H no circula corriente alguna por los arrollamientos,

dato que las redes de 20 y 15 kV son redes con neutro aislado de tierra, de modo que un cortocircuito monofásico no produce corriente alguna.

6.3.3.3 Resultados de cortocircuito monofásico para transformadores con Terciario con variación de ratio Z_0/Z_1

Como se indicó anteriormente, el circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de defecto es el circuito de la [Figura 6.49](#) o [Figura 6.54](#). Por comodidad la [Figura 6.49](#) se repite a continuación.

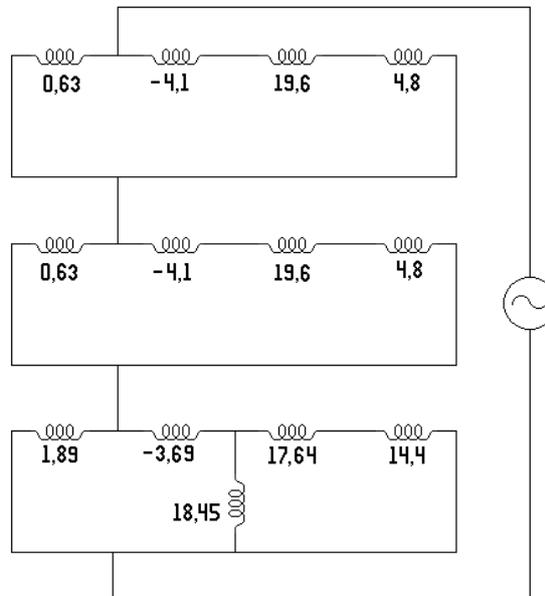


Figura 6.49. Circuito para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en AT en el transformador B.

En las simulaciones realizadas en este apartado se han variado los tres parámetros del circuito homopolar del transformador en la misma proporción. Evidentemente, cuanto menor sea la impedancia homopolar mayor será la corriente, como se muestra desde la [Figura 6.86](#) hasta la [Figura 6.89](#). Las corrientes de AT y de BT no aumentan en la misma cuantía al reducirse la impedancia homopolar, ya que la impedancia

homopolar de la red de BT es muy elevada mientras que la impedancia de AT es muy reducida.

En la *Figura 6.87* se puede observar que el arrollamiento Terciario se encuentra descargado a causa de que el transformador tiene sus neutros aislados, por lo que no podrán circular corrientes homopolares.

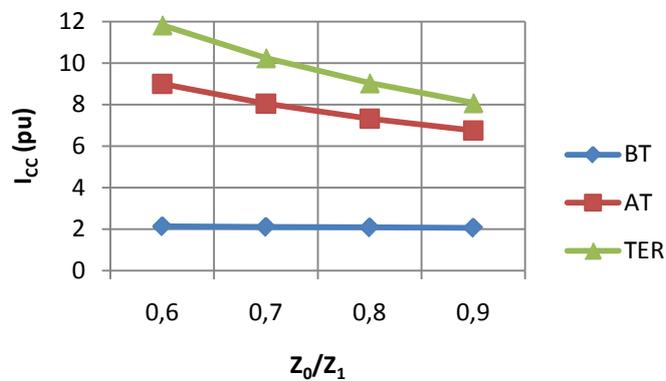


Figura 6.85. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

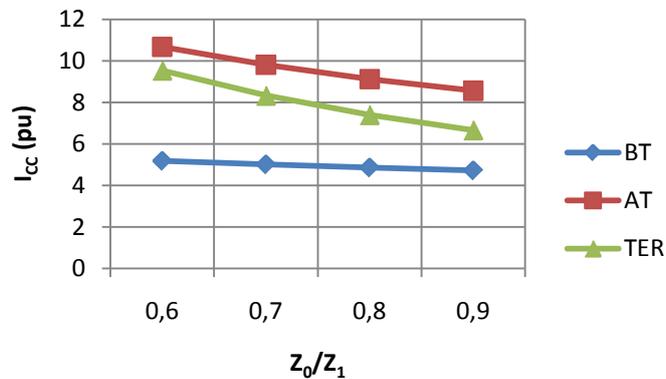


Figura 6.86. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador D con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

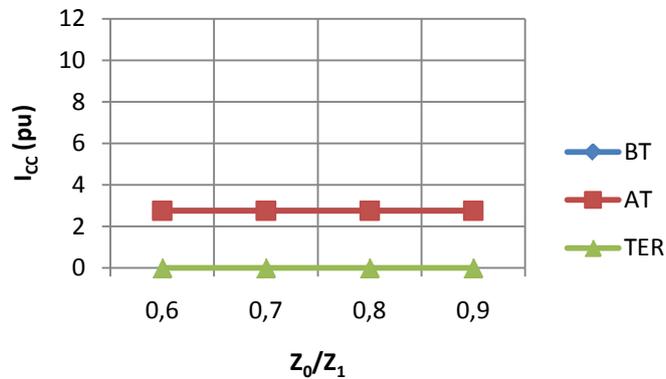


Figura 6.87. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador H con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

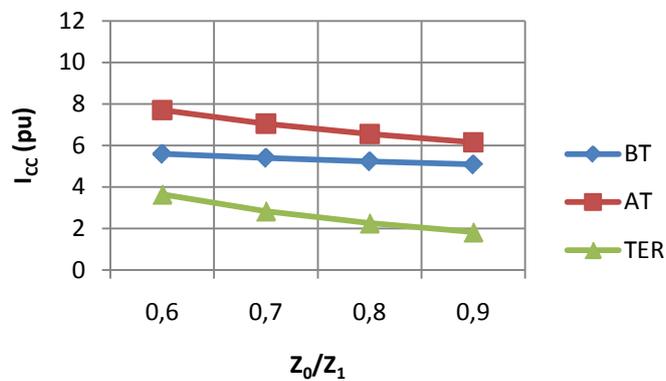


Figura 6.88. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador J con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

La [Figura 6.89](#) y [Figura 6.90](#) muestran la corriente por los arrollamientos en el caso de faltas monofásicas en BT. El diferente comportamiento de los transformadores D y J se justifica por el diferente signo de la impedancia homopolar de AT y BT (para el transformador D la impedancia homopolar del arrollamiento de AT es negativa y la del arrollamiento de BT es positiva, mientras que para el transformador J ocurre lo contrario) y por la diferente magnitud de la impedancia homopolar en uno y otro caso.

En los transformadores A y H no existen corrientes de cortocircuito en una falta monofásica en BT puesto que su régimen de neutro para el lado BT es aislado de tierra.

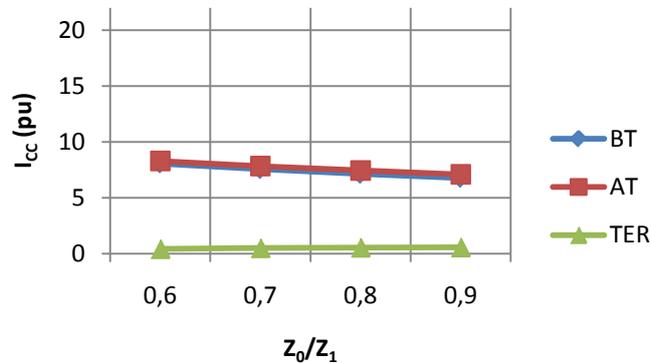


Figura 6.89. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador D con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

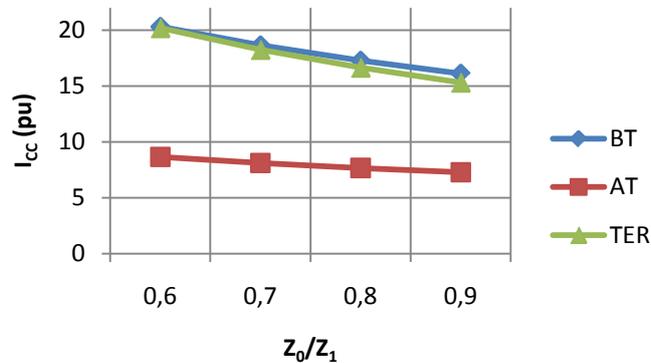


Figura 6.90. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador J con Terciario con variación del ratio Z_0/Z_1 .

6.3.4 Análisis de la influencia del reparto de la impedancia homopolar Z_{0AB} entre los arrollamientos de AT y de BT en transformadores sin Terciario

Como se ha podido observar en ensayos de obtención de la impedancia homopolar en transformadores sin Terciario, la suma de las impedancias de secuencia directa del AT y BT, es similar a la suma de las impedancias homopolares del lado AT y BT, aunque su reparto no sigue una pauta fija ($Z_{1AT} + Z_{1BT} = Z_{0AT} + Z_{0BT}$).

En el ensayo de medida de impedancia homopolar se determina la impedancia Z_{0AB} . Si se hace un número suficiente de ensayos es posible separar

la impedancia Z_{0AB} en sus dos sumandos Z_{0AT} y Z_{0BT} , pero si no se han hecho estos ensayos, sólo cabe estimar el reparto de la impedancia Z_{0AB} , a riesgo de equivocarse en la estimación. Por eso en este apartado se han realizado simulaciones para ver la influencia del reparto de la impedancia de Z_{0AB} . Se ha considerado que las impedancias Z_{0AT} y Z_{0BT} son ambas positivas, porque en algunos transformadores disponibles esto ocurría así. No obstante, es de notar que en uno de los transformadores disponibles que tenía regulación gruesa-fina (disposición de arrollamientos TBARgRf) la impedancia de AT resultaba negativa.

En la *Tabla 6.8* se pueden ver los transformadores estudiados en este ensayo. Estas simulaciones se han llevado a cabo para transformadores sin arrollamiento Terciario.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Configuración
A	132-21	50	YNy
B	230-45	120	YNyn
C	220-66	150	YNyn
D	230-45	120	YNyn
E	220-21	40	YNy
F	136-21	30	YNy
G	45-15	25	Yy
H	45-15	15	Yy
I	45-15	15	Yy
J	132-45	30	YNyn
K	220-71	75	YNyn

Tabla 6.8. Equipos para el análisis de sensibilidad en las impedancias homopolares de alta y baja tensión.

Los repartos de las impedancias homopolares serán en un porcentaje de 10%, 30%, 50%, 70% y 90% de la suma de impedancias de secuencia directa de los arrollamientos de AT y BT. Por lo tanto se tendrá un total de 55 casos.

6.3.4.1 Resultados de cortocircuito trifásico en BT con reparto de la impedancia Z_{0AB}

Como en ocasiones precedentes, la corriente de cortocircuito es independiente del valor de la impedancia homopolar, es por ello que sólo se presentará una sola figura, ya que el resto de equipos presentan valores similares (*Figura 6.91*).

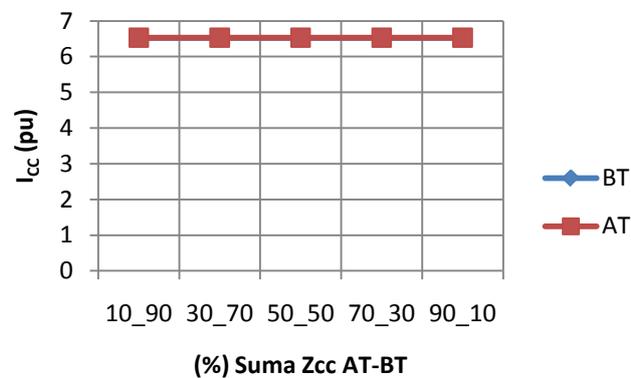


Figura 6.91. Corriente de cortocircuito trifásico en BT en el transformador J con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

6.3.4.2 Resultados de cortocircuito monofásico en AT con reparto de la impedancia Z_{0AB}

La corriente de cortocircuito para el caso de cortocircuitos monofásicos en AT casi no está afectada por el reparto de los sumandos de la impedancia de cortocircuito (*Figura 6.92* hasta *Figura 6.102*), esto es debido probablemente a que la impedancia de cortocircuito de la red de AT es muy reducida y la impedancia magnetizante del transformador es elevada.

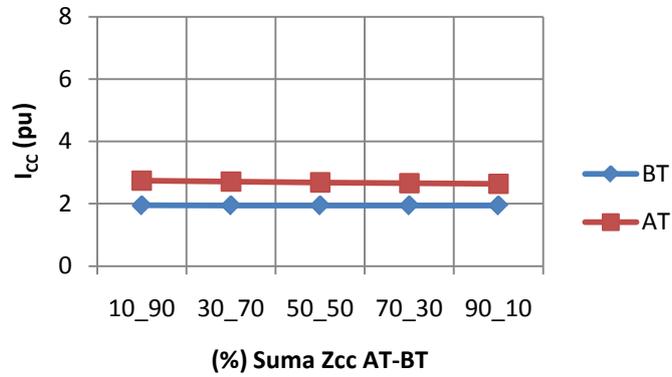


Figura 6.92. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

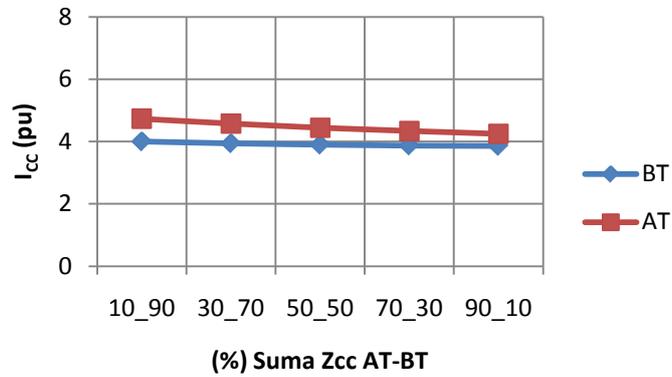


Figura 6.93. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador B con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

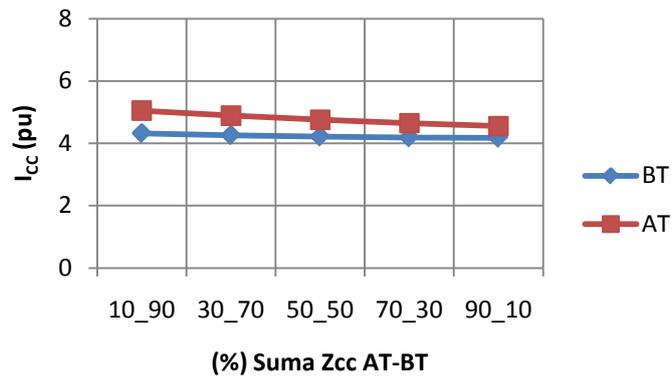


Figura 6.94. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador C con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

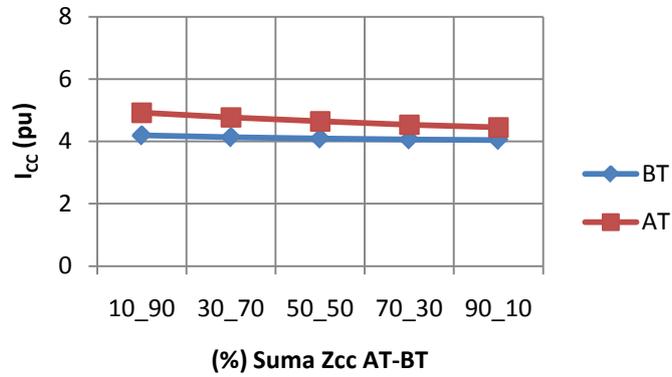


Figura 6.95. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador D con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

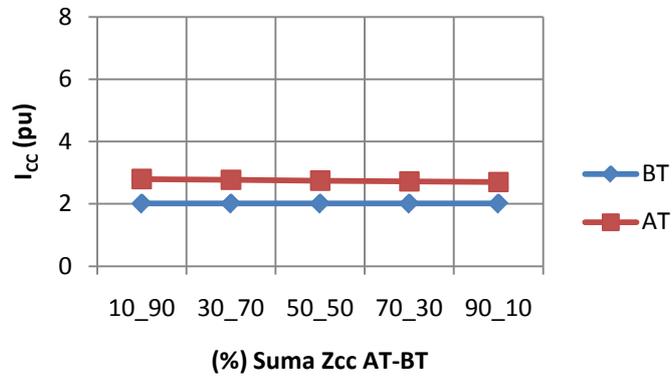


Figura 6.96. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador E con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

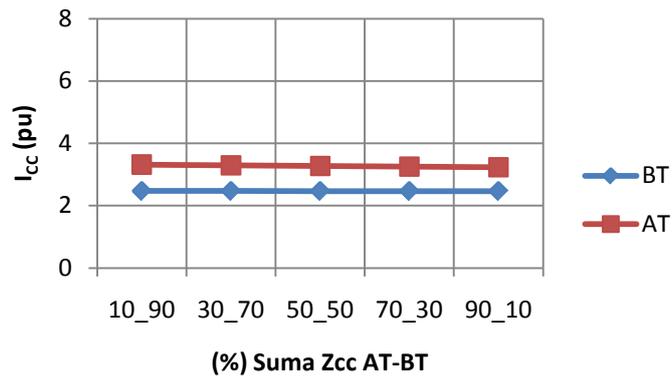


Figura 6.97. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador F con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

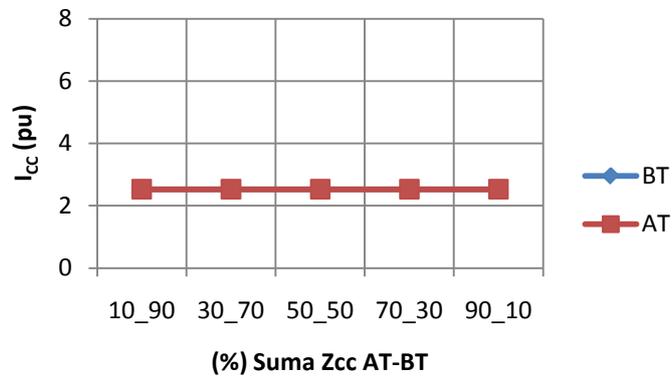


Figura 6.98. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador G con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

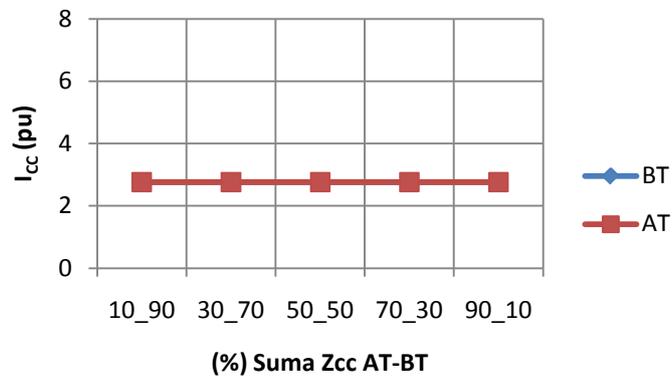


Figura 6.99. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador H con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

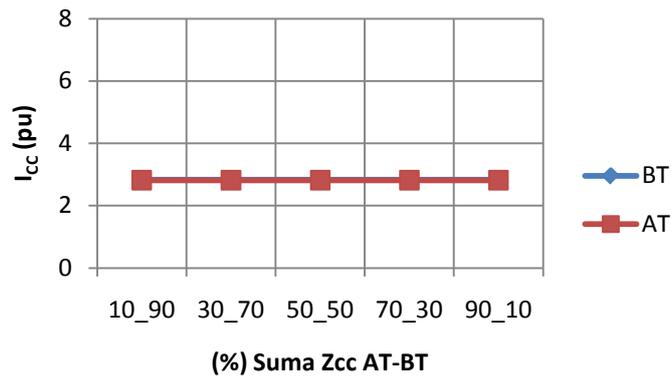


Figura 6.100. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador I con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

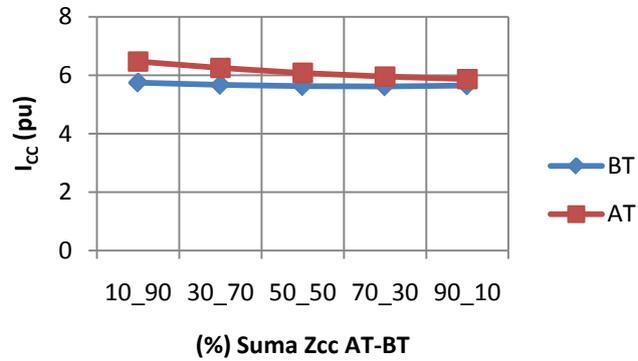


Figura 6.101. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador J con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

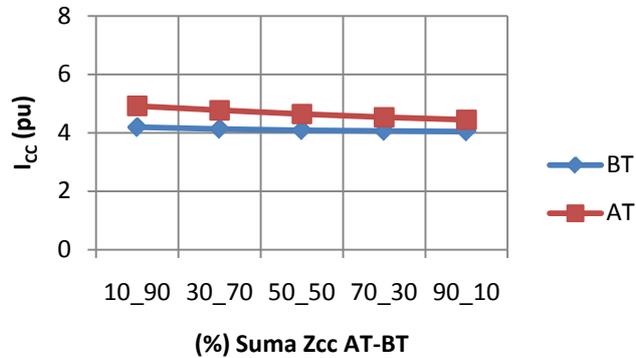


Figura 6.102. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador K con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

En el caso de cortocircuitos monofásicos en BT (desde la [Figura 6.103](#) hasta [Figura 6.107](#)) la dependencia es algo mayor, posiblemente debido a la mayor impedancia de la red de BT, que hace que las variaciones en la impedancia del transformador sean más significativas.

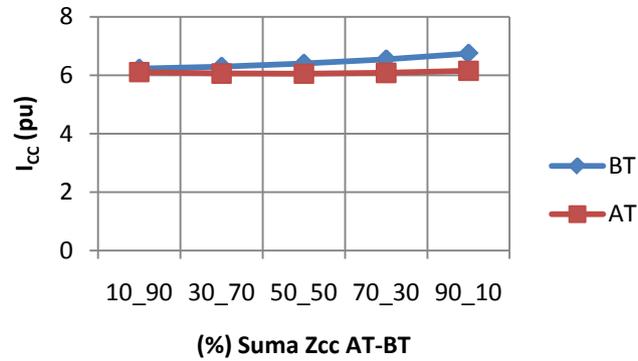


Figura 6.103. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador B con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

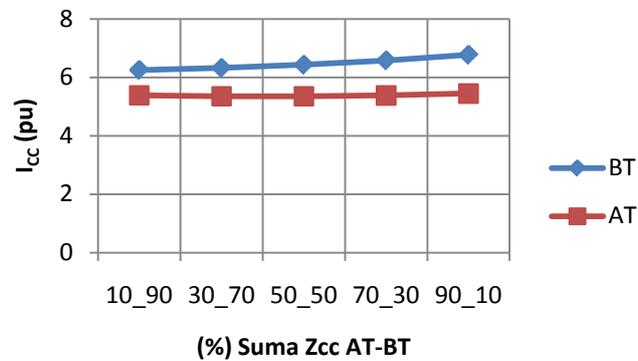


Figura 6.104. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador C con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

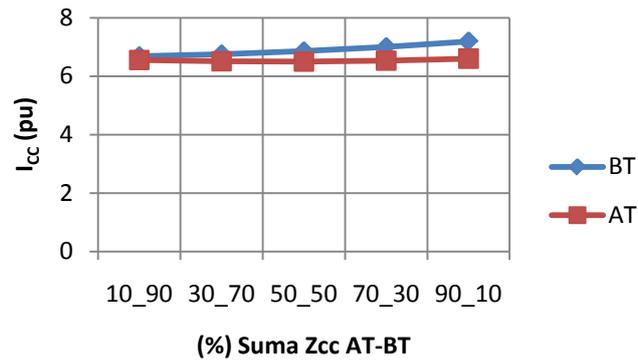


Figura 6.105. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador D con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

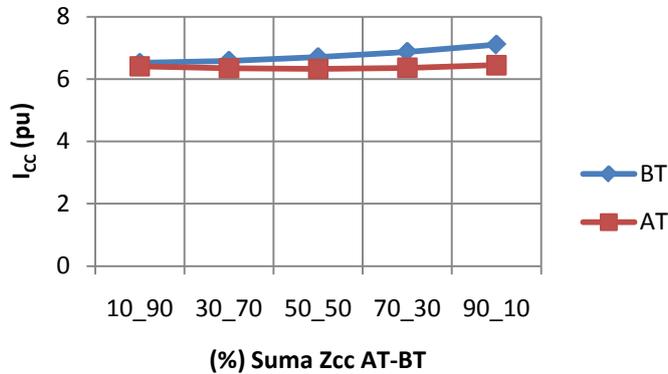


Figura 6.106. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador J con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

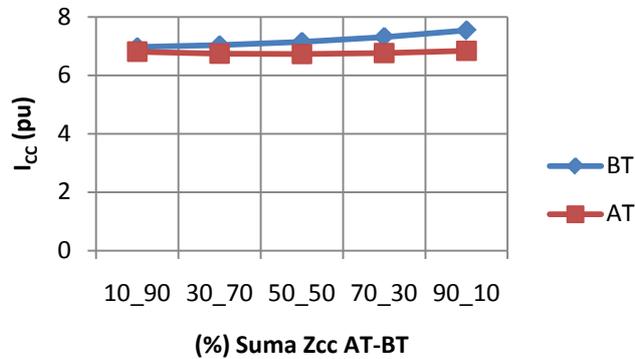


Figura 6.107. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador K con reparto de la impedancia Z_{0AB} .

6.3.5 Análisis de la influencia de la impedancia magnetizante de secuencia homopolar en transformadores sin Terciario

Como se indicó en el apartado anterior, en transformadores sin Terciario, la suma de las impedancias homopolares de AT y de BT tiene un valor semejante a la impedancia de cortocircuito de secuencia directa [IEC97]. El circuito equivalente ante secuencia homopolar tiene forma de T donde las impedancias Z_{0AT} y Z_{0BT} están separadas por la impedancia magnetizante, cuyo valor suele ser muy inferior a la impedancia magnetizante ante secuencia directa.

En este apartado se analiza la influencia del valor de la impedancia magnetizante sobre la corriente de cortocircuito. Para ello se ha hecho variar la impedancia magnetizante desde 40% hasta el 150% de la impedancia base, en escalones de 40%, 60%, 80%, 100%, 125% y 150%, dejando fijas las impedancias de los arrollamientos de alta y baja tensión, que se han considerado iguales al 50% de la impedancia de cortocircuito en secuencia directa del transformador.

El estudio se realizó sobre 2 transformadores (*Tabla 6.9*), lo que supone un total de 12 casos.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Configuración
C	220-66	150	YNyn
K	220-71	75	YNyn

Tabla 6.9. Equipos para el análisis de sensibilidad de la impedancia magnetizante.

6.3.5.1 Resultados de cortocircuito trifásico en BT variando Z_{0M}

Como en ocasiones precedentes, la corriente de cortocircuito es independiente del valor de la impedancia homopolar (*Figura 6.108* y *Figura 6.109*).

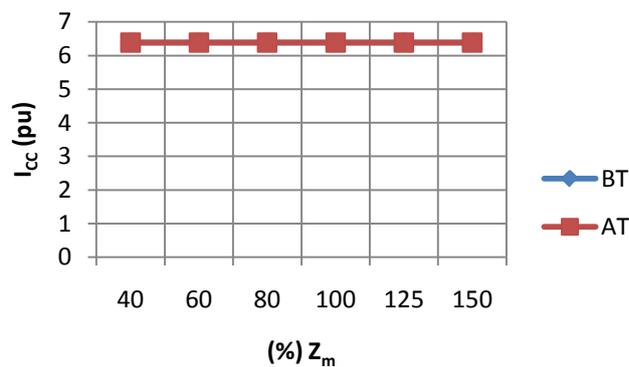


Figura 6.108. Corriente de cortocircuito trifásico en BT del transformador C variando Z_{0M} .

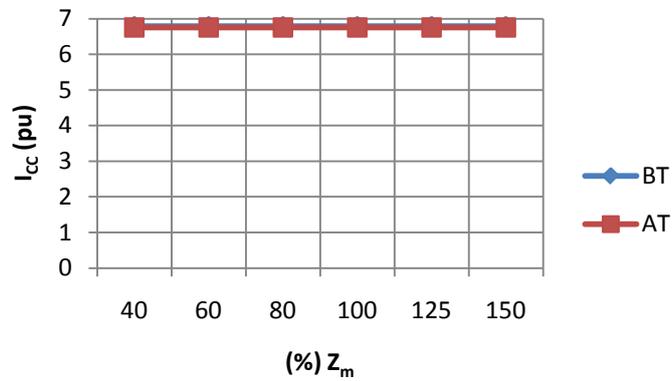


Figura 6.109. Corriente de cortocircuito trifásico en BT del transformador K variando Z_{0M} .

6.3.5.2 Resultados de cortocircuitos monofásicos variando Z_{0M}

La influencia de la impedancia magnetizante homopolar es reducida como se muestra desde la [Figura 6.110](#) hasta la [Figura 6.113](#).

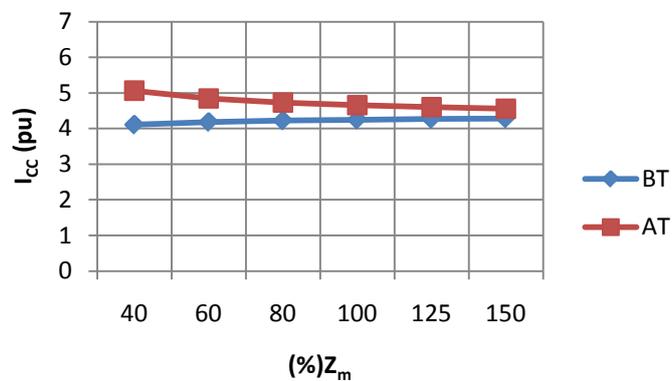


Figura 6.110. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador C variando Z_{0M} .

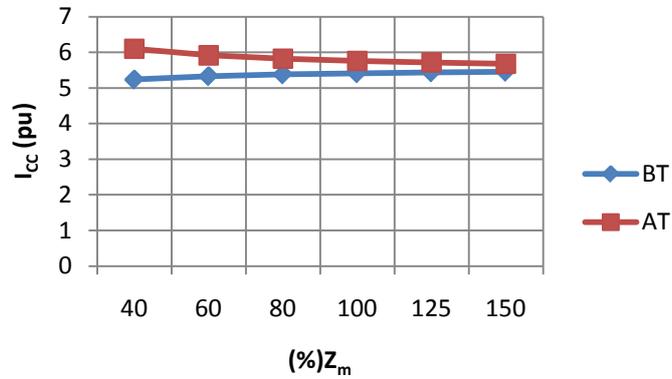


Figura 6.111. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador K variando Z_{0M} .

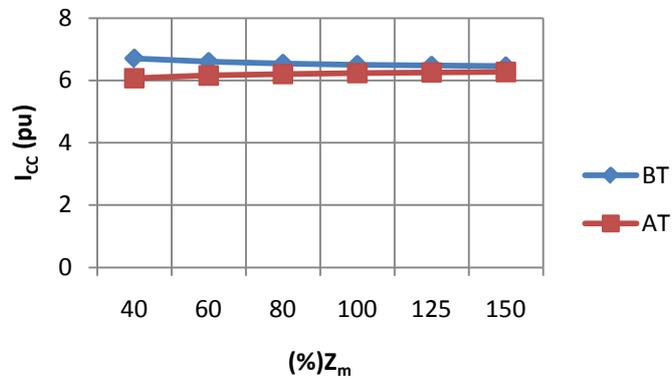


Figura 6.112. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador C variando Z_{0M} .

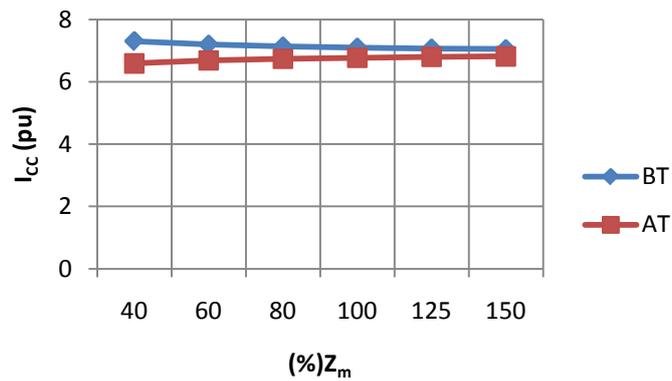


Figura 6.113. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador K variando Z_{0M} .

6.3.6 Análisis de la influencia de la impedancia homopolar de BT en transformadores con Terciario

De los ensayos de impedancia homopolar disponibles en transformadores TBAR se desprende que las impedancias homopolares de AT y de Terciario tienen un valor comprendido entre 1 y 0,8 veces el valor correspondiente en secuencia directa. Sin embargo, esto no ocurre con la impedancia homopolar de BT. Ocurre que al calcular las corrientes de cortocircuito en ocasiones se toma que todas las impedancias del circuito equivalente varían en la misma proporción, por eso se hace necesario ver qué consecuencias tiene el hecho de que la impedancia de BT se mueva en un rango mayor a las impedancias de AT y de Terciario. Cabe pensar que conclusiones semejantes a las que se obtienen en este apartado se obtendrían si se variase la impedancia de AT en transformadores BATR o BART.

Para comprobar la influencia del valor de la impedancia homopolar de BT, se realizaron simulaciones para 2 transformadores con Terciario (*Tabla 6.10*). En estas simulaciones se fijaron las impedancias homopolares del Terciario y de alta tensión al 90% de sus impedancias de secuencia directa, mientras que la impedancia homopolar del arrollamiento de BT se fijó a un 40%, 55%, 75% y 90% de la impedancia de secuencia directa. Por lo tanto se realizaron un total de 8 simulaciones.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Disposición de arrollamientos	Configuración
F	136-21	30	TBAR	YNyd
K	220-71	75	TBAR	YNynd

Tabla 6.10. Equipos en ensayos con circuito en T para transformadores TBAR.

6.3.6.1 Cortocircuito trifásico en BT variando Z_{0BT}

Evidentemente la corriente de cortocircuito trifásico no depende del valor de la impedancia homopolar (*Figura 6.114* y *Figura 6.115*).

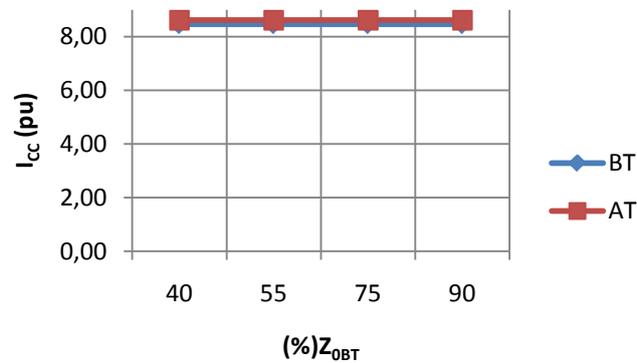


Figura 6.114. Corriente de cortocircuito trifásico en BT del transformador F variando Z_{0BT} .

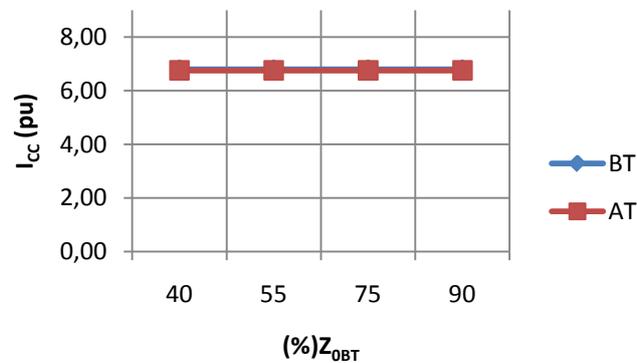


Figura 6.115. Corriente de cortocircuito trifásico en BT del transformador K variando Z_{0BT} .

6.3.6.2 Cortocircuitos monofásico variando Z_{0BT}

Como se aprecia en la [Figura 6.116](#) y [Figura 6.117](#) la influencia de la impedancia homopolar de BT sobre las corrientes de un cortocircuito monofásico en AT son prácticamente insignificantes. Algo mayor es la influencia sobre las corrientes en el caso de un cortocircuito en BT ([Figura 6.118](#)), aunque tampoco es excesiva. En el transformador F no existen corrientes de cortocircuito en una falta monofásica en BT puesto que el neutro del lado BT está aislado de tierra.

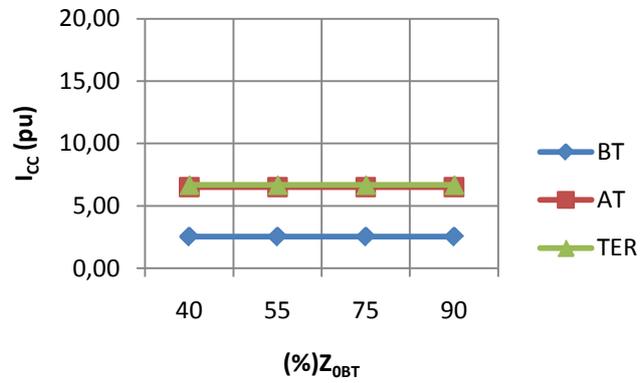


Figura 6.116. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador F variando Z_{0BT} .

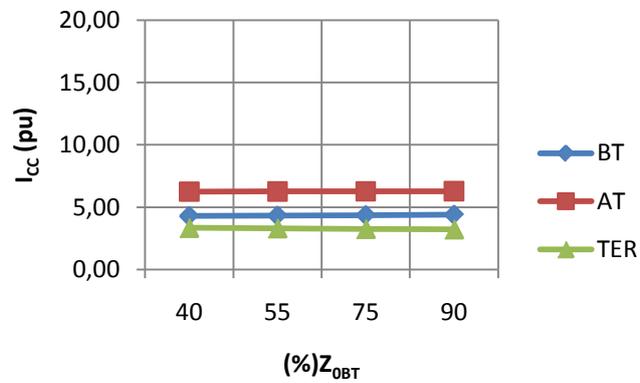


Figura 6.117. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador K variando Z_{0BT} .

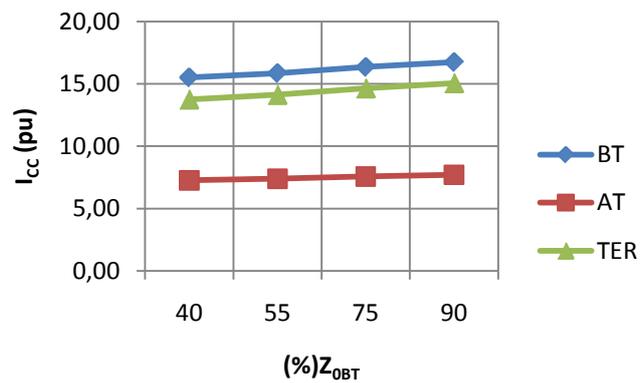


Figura 6.118. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador K variando Z_{0BT} .

6.3.7 Análisis de la influencia del reparto de la impedancia Z_{0AB} entre AT y BT en transformadores con Terciario

En este apartado se analiza la influencia del reparto de la impedancia de Z_{0AB} entre sus dos sumandos. Se ha considerado que las impedancias Z_{0AT} y Z_{0BT} son ambas positivas y su suma idéntica a la impedancia de cortocircuito ante secuencia directa. De los transformadores disponibles sólo el transformador que tenía regulación gruesa-fina (disposición de arrollamientos TBARgRf) tenía ambas impedancias positivas cuando trabajaba con el Terciario cerrado, en el resto de los equipos, una de las impedancias resulta negativa.

La impedancia homopolar del Terciario se mantuvo constante en el 80% del valor correspondiente a secuencia directa.

En la *Tabla 6.11* se pueden ver los transformadores estudiados en este ensayo.

Transformador	Tensiones (kV)	Potencia (MVA)	Configuración
A	132-21	50	YNy
B	230-45	120	YNyn
C	220-66	150	YNyn
D	230-45	120	YNyn
E	220-21	40	YNy
F	136-21	30	YNy
G	45-15	25	Yy
H	45-15	15	Yy
I	45-15	15	Yy
J	132-45	30	YNyn
K	220-71	75	YNyn

Tabla 6.11. Equipos para el análisis de sensibilidad en las impedancias homopolares de alta y baja tensión.

Los repartos de las impedancias homopolares serán en un porcentaje de 10%, 30%, 50%, 70% y 90% de la suma de impedancias de secuencia directa de los arrollamientos de alta y baja tensión. Por lo tanto se tendrá un total de 55 casos.

6.3.7.1 Resultados de cortocircuito trifásico en BT variando el reparto Z_{0AB}

Como en ocasiones precedentes, la corriente de cortocircuito es independiente del valor de la impedancia homopolar, por lo tanto sólo se mostrará una única figura, perteneciente al transformador C (*Figura 6.119*).

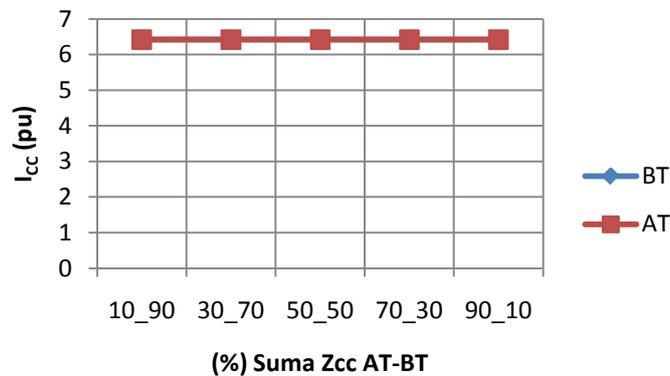


Figura 6.119. Corriente de cortocircuito trifásico en BT del transformador C variando el reparto de Z_{0AB} .

6.3.7.2 Cortocircuitos monofásico variando el reparto Z_{0AB}

Como se aprecia en las siguientes figuras (desde la *Figura 6.120* hasta la *Figura 6.128*) para el caso de cortocircuitos monofásicos en AT, al variar el reparto de la impedancia Z_{0AB} entre sus dos sumandos se observa un patrón semejante en todos los transformadores analizados.

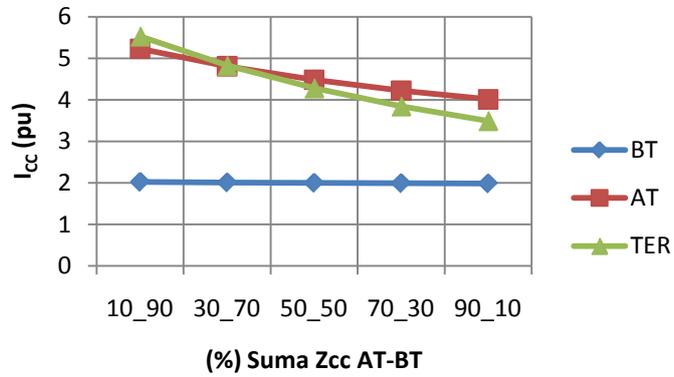


Figura 6.120. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador A variando el reparto de Z_{0AB} .

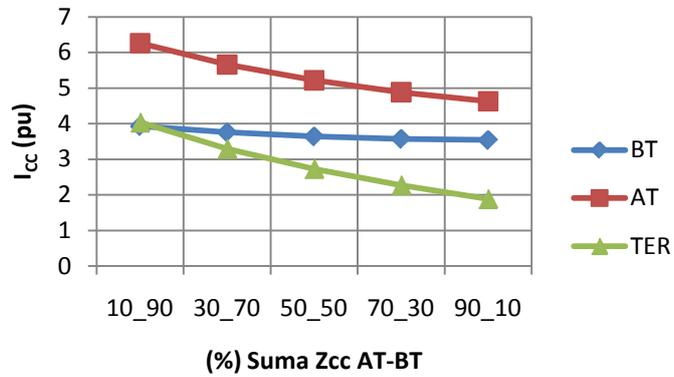


Figura 6.121. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador B variando el reparto de Z_{0AB} .

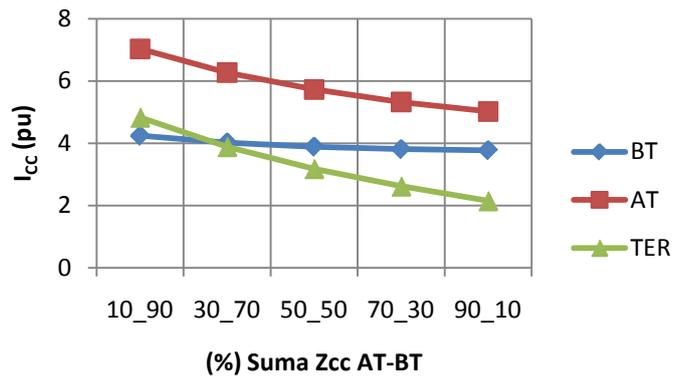


Figura 6.122. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador C variando el reparto de Z_{0AB} .

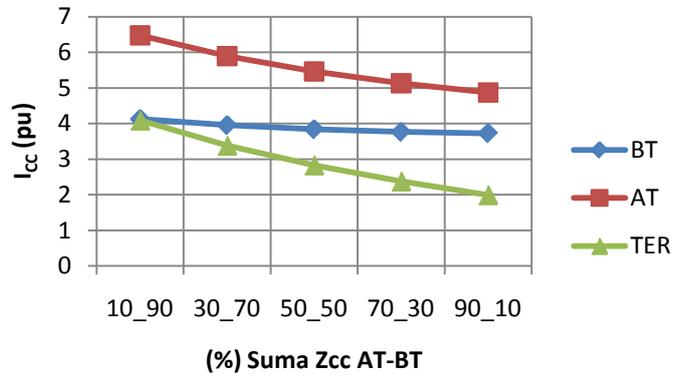


Figura 6.123. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador D variando el reparto de Z_{0AB} .

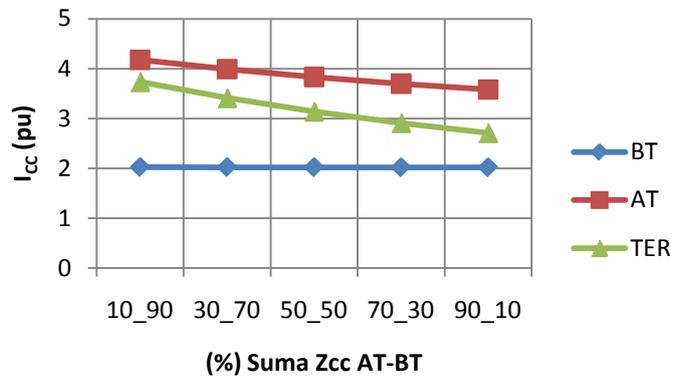


Figura 6.124. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador E variando el reparto de Z_{0AB} .

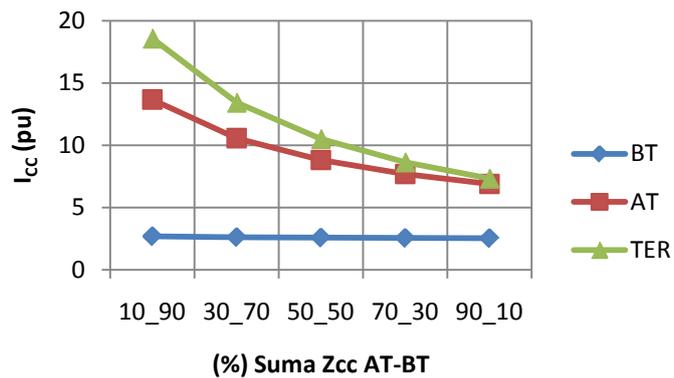


Figura 6.125. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador F variando el reparto de Z_{0AB} .

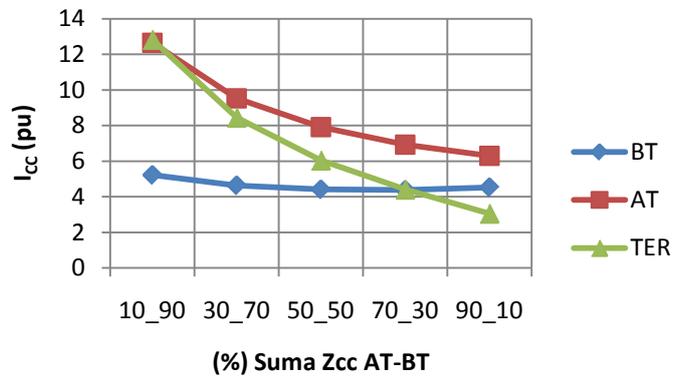


Figura 6.126. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador J variando el reparto de Z_{0AB} .

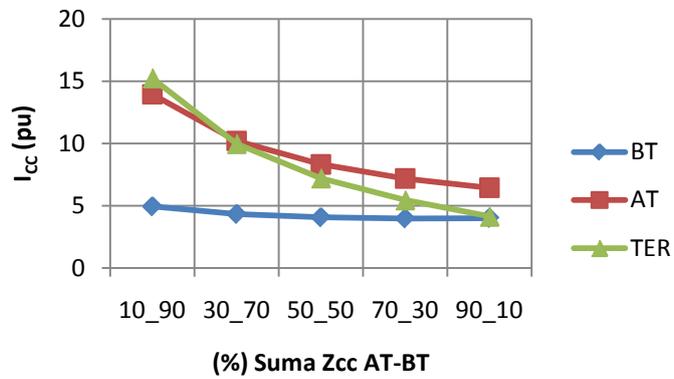


Figura 6.127. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador K variando el reparto de Z_{0AB} .

En las siguientes figuras (desde la [Figura 6.128](#) hasta la [Figura 6.130](#)) se puede notar que el arrollamiento Terciario no se encuentra cargado ya que estos transformadores tienen sus neutros aislados de tierra, por lo que no existirá corriente homopolar en sus arrollamientos Terciarios.

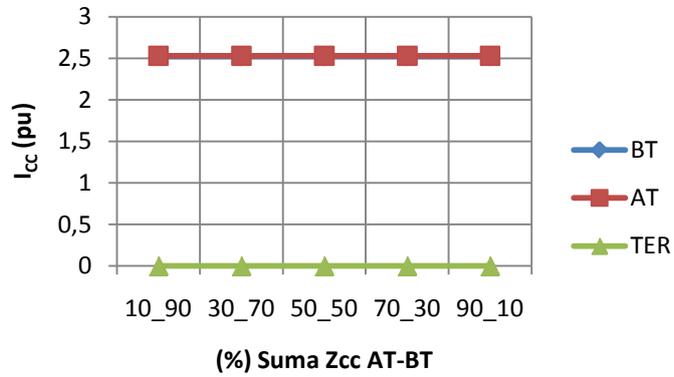


Figura 6.128. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador G variando el reparto de Z_{0AB} .

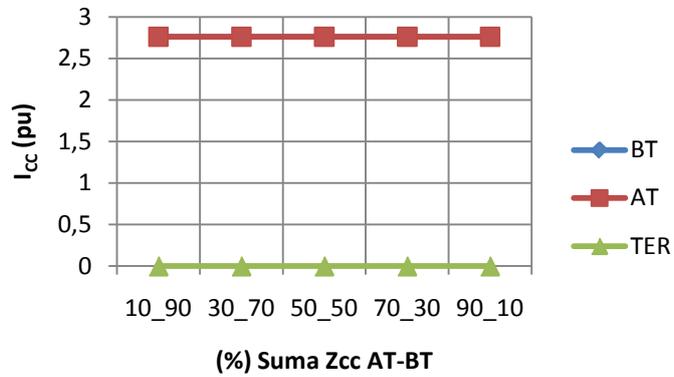


Figura 6.129. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador H variando el reparto de Z_{0AB} .

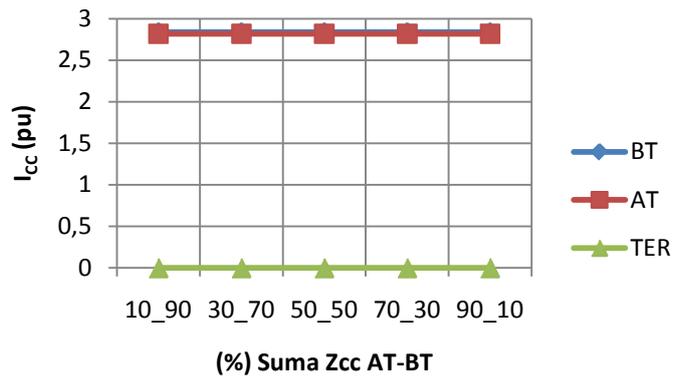


Figura 6.130. Corriente de cortocircuito monofásico en AT del transformador I variando el reparto de Z_{0AB} .

De los 11 transformadores analizados en este apartado, en los cinco primeros la impedancia del Terciario es relativamente elevada (entre el 13% y el 22% para la impedancia de secuencia homopolar de Terciario), mientras que en los 6 últimos la impedancia es muy reducida (entre el 4% y el 6%), este hecho se refleja en un cambio en el aspecto de las curvas de variación de la corriente en función del reparto de impedancias.

Si el cortocircuito se produce en el lado de BT (desde la *Figura 6.131* hasta la *Figura 6.135*) el efecto es justo el opuesto, de modo que:

- Si en las figuras del grupo anterior la corriente en el arrollamiento de BT era relativamente insensible al reparto de la impedancia Z_{0AB} , en las de este grupo es la corriente en AT la que casi no depende del reparto.
- Si en las figuras del grupo anterior las corrientes en AT y en el Terciario disminuyen al aumentar el porcentaje de impedancia del arrollamiento AT, en las figuras de este grupo, las corrientes de BT y de Terciario aumentan al aumentar el porcentaje de impedancia del arrollamiento AT.

Estas diferencias son debidas al hecho de que la impedancia de cortocircuito de la red de AT es mucho más reducida que la de la red de BT.

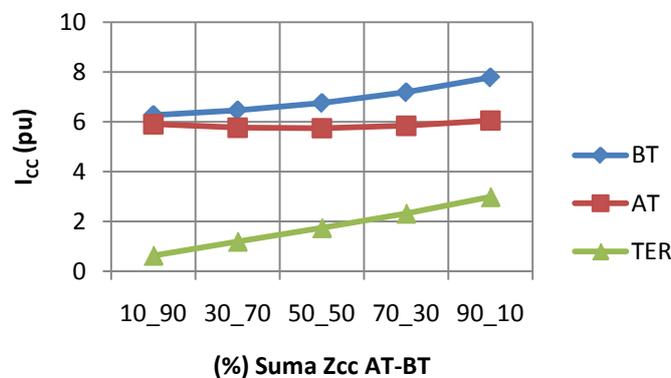


Figura 6.131. Corriente de cortocircuito monofásica en BT del transformador B variando el reparto de Z_{0AB} .

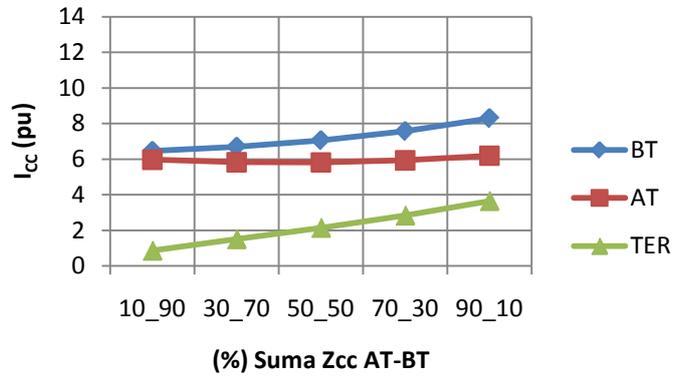


Figura 6.132. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador C variando el reparto de Z_{0AB} .

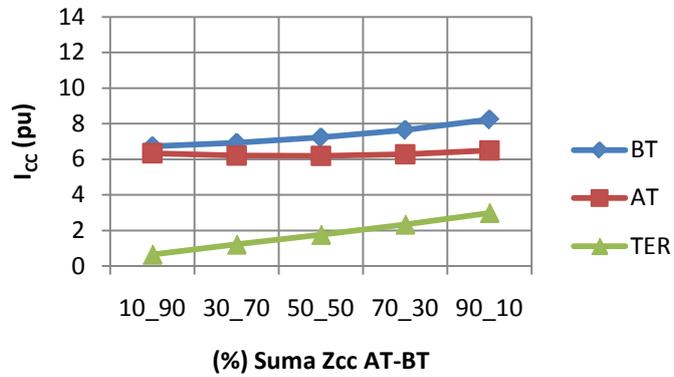


Figura 6.133. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador D variando el reparto de Z_{0AB} .

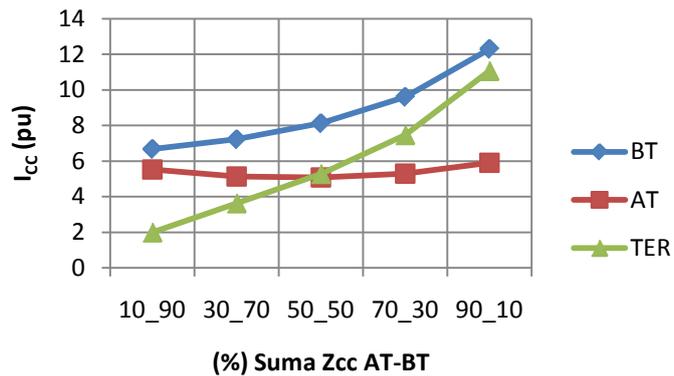


Figura 6.134. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador J variando el reparto de Z_{0AB} .

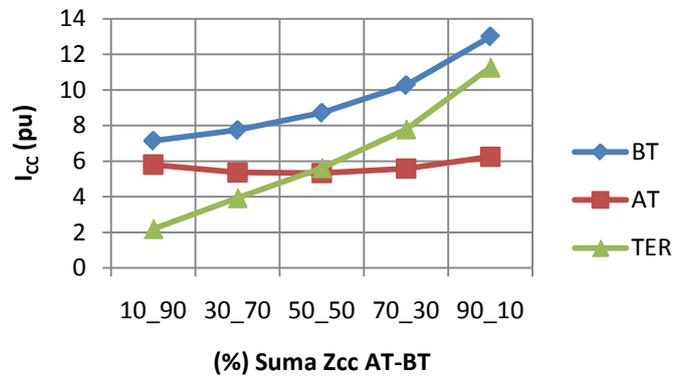


Figura 6.135. Corriente de cortocircuito monofásico en BT del transformador K variando el reparto de Z_{0AB} .



Capítulo 7

Resumen y conclusiones

7.1 Resumen del trabajo realizado

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha realizado un estudio de la influencia de determinados factores en la corriente de cortocircuito monofásico y trifásico de transformadores en configuración estrella-estrella, pero especialmente la influencia de la presencia o ausencia del arrollamiento Terciario. Para realizar el estudio se han llevado a cabo más de 300 simulaciones, en cada una de las cuales se obtuvo el resultado de tres tipos de cortocircuitos diferentes:

- Cortocircuito trifásico en BT.
- Cortocircuito monofásico en AT.
- Cortocircuito monofásico en BT.

No se realizó el estudio del cortocircuito trifásico en AT por ser menos peligroso para el transformador que el cortocircuito trifásico en BT. Pero es fácil llegar a la conclusión que las tendencias de los resultados serán semejantes.

Los principales factores cuya influencia se ha analizado son:

- Presencia o ausencia de arrollamiento Terciario de estabilización.
- Potencia de cortocircuito de la red.
- Régimen de neutro de AT y BT (neutro aislado o puesto a tierra).
- Disposiciones espaciales de los arrollamientos, ya que en algunos transformadores Yyd el Terciario es el arrollamiento más próximo al núcleo mientras que en otros el Terciario es el arrollamiento más externo o se encuentra ubicado entre el arrollamiento de AT y el de Regulación.
- Impedancia homopolar del transformador, en aquellos casos en los que la potencia de cortocircuito se especifica como un cierto porcentaje de la impedancia de secuencia directa. En aquellos casos en los que no se dispone de ensayos para la obtención de la impedancia homopolar del transformador es práctica habitual tomar de forma simplificada que el valor de esta impedancia es entre un 85% y un 100% de la impedancia de secuencia directa.

Para aquellos casos en los que el número de ensayos no sea suficiente como para obtener un circuito equivalente detallado, sería posible utilizar un circuito equivalente ante secuencia homopolar utilizando para ello los datos de los ensayos de cortocircuito ante secuencia directa y valores típicos de determinadas impedancias. Para comprobar la influencia de las hipótesis admitidas en los resultados se ha analizado la repercusión en las corrientes de cortocircuito calculadas de determinados factores tales como:

- Para transformadores YNyn sin Terciario la norma IEC 60076-8 [IEC97] especifica que la impedancia homopolar Z_{0AB} es idéntica a la de secuencia directa, en la que la ubicación de la rama magnetizante es arbitraria. Para comprobar ese aspecto se ha analizado la influencia del reparto de la impedancia

homopolar Z_{0AB} entre el arrollamiento de AT y el de BT en transformadores con Terciario y en transformadores sin Terciario.

- Influencia del valor de la impedancia magnetizante en transformadores sin Terciario.
- Influencia del valor de la impedancia homopolar de BT para transformadores con Terciario.

Las principales conclusiones del estudio se indican en el apartado siguiente.

7.2 Principales conclusiones obtenidas

7.2.1 Presencia o ausencia del arrollamiento de estabilización

La corriente de cortocircuito trifásico depende única y exclusivamente de la impedancia de cortocircuito del transformador, que es una especificación de compra de los transformadores de potencia. El fabricante debe conseguir la impedancia de cortocircuito especificada tanto si existe arrollamiento de estabilización como si no existe.

En transformadores sin Terciario, los valores de corriente de un cortocircuito trifásico son superiores a los de un cortocircuito monofásico en AT, sin embargo tienen valores similares en las corrientes de cortocircuito en un cortocircuito monofásico en BT cuando tenemos la red de BT puesta a tierra.

Las corrientes de cortocircuito monofásico más severas en el caso de transformadores con Terciario externo²¹ (YNynd), son las producidas en AT,

²¹ En este capítulo la expresión Terciario externo hace referencia a los transformadores BART y a los BATR.

mientras que para transformadores con Terciario interno²², son las producidas en BT.

También hay que reseñar que en los cortocircuitos monofásicos circulan corrientes por el arrollamiento Terciario que pueden tener un valor varias veces superior a la corriente nominal de dicho arrollamiento. Esto es especialmente cierto en cortocircuitos monofásicos en AT en transformadores con Terciario externo y en cortocircuitos monofásicos en BT en transformadores con Terciario interno. Es por ello que los transformadores con arrollamiento Terciario deben ser objeto de un diseño más cuidadoso, ante todo en lo relacionado con las resistencias mecánicas de los arrollamientos, ya que los esfuerzos electrodinámicos en los arrollamientos (en especial en el Terciario) serán presumiblemente elevados a causa de los altos valores de corriente de cortocircuito extraídos de las simulaciones.

Como era de esperar, la adicción de un arrollamiento Terciario aumenta las corrientes de cortocircuito monofásicos, llegando a ser, en algunos casos, el doble del valor que tendría el transformador sin Terciario. Esto es así a causa de que la adicción del arrollamiento Terciario conlleva una disminución de la impedancia homopolar. Aunque este hecho lleva a otros beneficios como es la mejora del transformador ante calentamiento y degradación de material aislante (como por ejemplo la supresión de flujos dispersos que crean puntos calientes en la cuba), no lo es así para el comportamiento del transformador ante cortocircuitos monofásicos.

7.2.2 Influencia de la potencia de cortocircuito de la red

Como regla general un aumento de la potencia de cortocircuito de la red supone un aumento de la corriente por todos los arrollamientos del transformador. Sin embargo, en algunos casos la corriente en el arrollamiento

²² Para esta expresión se entiende la referencia a transformadores TBAR.

Terciario puede disminuir al aumentar la potencia de cortocircuito. Esto es debido al efecto de las impedancias negativas del circuito equivalente del transformador y se da en redes de baja impedancia de cortocircuito cuando el cortocircuito se produce en:

- El lado de AT, para transformadores con Terciario interno.
- El lado de BT en transformadores con el Terciario externo.

7.2.3 Influencia del régimen de neutro

En transformadores sin Terciario, los cortocircuitos monofásicos pueden conllevar corrientes mayores si el transformador está unido a dos redes puestas a tierra y ambos lados del transformador están puestas a tierra, porque de esta forma ambas redes pueden aportar corriente homopolar al transformador.

En el caso de que una de las redes tenga su neutro aislado, es más perjudicial un cortocircuito cuando el transformador tiene uno sólo de sus lados puesto a tierra.

7.2.4 Influencia del ratio de impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa

La corriente de cortocircuito trifásica es independiente del valor de la impedancia homopolar.

Por lo que se refiere a los cortocircuitos monofásicos, cuanto más baja es la impedancia homopolar más elevada es la corriente correspondiente a una falta monofásica. Dado que la impedancia de la red que alimenta al transformador está en serie con la impedancia de éste, la influencia de la impedancia homopolar del transformador sobre la corriente de cortocircuito monofásico en AT es reducida, mientras que la influencia es mayor si el cortocircuito monofásico es en BT.

Por lo demás, la influencia del ratio de impedancia homopolar entre impedancia de secuencia directa, tiene una influencia mucho más acusada en transformadores con Terciario que en transformadores sin Terciario.

7.2.5 Transformadores Yy: Influencia de la división de la impedancia homopolar Z_{0AB} en sus dos sumandos

Como se indicó en el apartado 6.3.4, en transformadores Yy sin Terciario la división de Z_{0AB} en dos partes separadas por la rama magnetizante es poco relevante en el caso de que el cortocircuito se produzca tanto en el lado de AT como en el lado de BT del transformador.

7.2.6 Transformadores Yyd: Influencia de la división de la impedancia homopolar Z_{0AB} en sus dos sumandos

A diferencia del caso del transformador Yy, en un transformador Yyd la rama derivación del circuito equivalente tiene un valor reducido, y por ello la influencia de la división de la impedancia Z_{0AB} en sus dos sumandos es muy elevada.

Si se admite que tanto las impedancias Z_{0AT} como Z_{0BT} son ambas positivas (cosa que no es siempre cierta), la corriente de cortocircuito es tanto mayor cuanto más pequeña es Z_{0AT} y mayor es Z_{0BT} , ello es debido a que la impedancia Z_{0AT} se encuentra en serie con la impedancia de la red de AT (cuyo valor es muy reducido), mientras que la impedancia Z_{BT} se encuentra en serie con la impedancia de la red BT (cuyo valor es mucho mayor). De esta manera, si tanto la impedancia de la red como la del transformador son ambas de valor reducido la impedancia que ofrece el transformador a la fuente es reducida.

7.2.7 Influencia del valor de la impedancia magnetizante de secuencia homopolar

En transformadores Yy sin Terciario, cuanto más grande es la impedancia magnetizante de secuencia homopolar, más similares serán los valores de las corrientes de cortocircuito de los arrollamientos de AT y BT. Esto es así a causa de que al ir aumentando el valor de esta impedancia, la corriente de cortocircuito tenderá a fluir en menor medida por la derivación impuesta por la impedancia magnetizante y más por el arrollamiento libre de la falta.

7.2.8 Influencia del valor de la impedancia homopolar de BT

Como se indicó en el apartado 6.3.6, en transformadores Yyd la cuantía de la impedancia homopolar de BT influye poco en el valor de la corriente de cortocircuito monofásico en AT, posiblemente debido al reducido valor de la potencia de cortocircuito de la red de BT. Sin embargo, si el cortocircuito monofásico se produce en la red de BT y la impedancia de BT es de signo negativo, la corriente aumenta (aunque de forma poco acusada) cuanto mayor es el valor absoluto de esta impedancia.

7.3 Sugerencias para trabajos futuros

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha analizado la influencia de los parámetros del circuito equivalente homopolar en las corrientes de cortocircuito. En algunos casos los cálculos realizados pueden dar una idea clara de si los esfuerzos a los que se somete el transformador son mayores o menores. Sin embargo en otros casos la comparación no es inmediata, ya que en los casos en los que la disposición del arrollamiento Terciario sea distinta, la capacidad del Terciario para soportar los esfuerzos provenientes de un cortocircuito



dependerá de su ubicación (interna o externa). Por eso, sería deseable calcular los esfuerzos a los que se ve sometido el transformador como consecuencia de las corrientes calculadas.

Sólo se ha analizado el estudio con los transformadores en las tomas de máxima tensión. Sería interesante repetir el estudio para el caso de que los transformadores trabajasen en una toma diferente.



Referencias

- [Ber98] Bertagnolli, G.: *Short-Circuit duty of power transformers. The ABB approach*. 2ª edición. Legnano (Milano), Italia, 1998.
- [Bur10] Burgos, J. C.: *Tema 3 - transformadores monofásicos*. Apuntes circuitos magnéticos y transformadores. Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [Cre75] Crespo, F. *Sobretensiones en las redes de alta tensión*. ASINEL. Mayo 1975.
- [deL09] De León F.; Martínez J.A.: *Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements*. IEEE Transactions on power delivery, vol. 24. Nº 1. Enero 2009.
- [Fra03] Fraile Mora, J.: *Máquinas Eléctricas*. Mc Graw Hill. 5ª edición. Madrid, España, 2003. ISBN: 84-481-3913-5.
- [IE391] ANSI/IEEE Std. 142: *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. 1991.
- [IEC00] IEC 60076-5: *Ability to withstand short circuit*. Julio 2000.
- [IEC97] IEC 60076-8: *Power Transformers. Application guide*. Primera edición 1997.
- [Kul04] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A.: *Transformer Engineering. Design and practice*. Marcel Dekker, inc. Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai, India, 2004. ISBN: 0-8247-5653-3.



- [Mor08] Moreno, M^a.A.: *Transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos*. Universidad Carlos III de Madrid, octubre 2008.
- [Nor03] Nordman, H.; Lahtinen M.: *IEEE Transactions on power delivery*. Vol. 18. Nº1. Enero 2003.
- [Ram10] Ramos, A.: *Consideraciones acerca de la utilización de arrollamientos de estabilización en transformadores de potencia estrella-estrella y su aplicación a la red de Unión Fenosa Distribución*. Tesis de máster, Universidad Carlos III de Madrid, febrero 2010.
- [Ras75] Ras, E.: *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Marcombo Boixareu Editores. 3^a edición 1975.
- [Roe70] Roeper, R.: *Las corrientes de cortocircuito en las redes eléctricas*. Editorial Dossat. 5^o edición. Noviembre 1970.
- [Tra04] *Transformer Handbook*. ABB Business Unit Transformers. 2004.
- [Wan09] Wang J.; Lascu R.: *Zero sequence circuit of three-legged core type transformers*. IEEE. 2009.
- [Wil56] Willheim, R.; Waters, M.: *Neutral grounding in high-voltage transmission*. Elsevier. 1956.