

# CRITERIOS DE PROTECCIÓN EN REDES RADIALES DE MEDIA TENSIÓN

*Guillermo Nicolau González  
Pedro Cruz Romero*

COLECCIÓN  
AULA DE LA LUZ

1



# CRITERIOS DE PROTECCIÓN EN REDES RADIALES DE MEDIA TENSIÓN

*Guillermo Nicolau González  
Pedro Cruz Romero*



CÁTEDRA ENDESA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

© Guillermo Nicolau González y Pedro Cruz Romero

© 2013: Cátedra Endesa de la Universidad de Sevilla  
endesared@esi.us.es  
Sevilla (España)

ISBN: 978-84-616-7191-5  
DL: SE-XXXX-2013

*Producción editorial:*  
Los Papeles del Sitio

[ Queda prohibida cualquier forma de reproducción o transformación de esta obra sin previa autorización escrita de los editores, salvo excepción prevista por la ley ]

(Hecho en España)

# Índice general

Presentación de la colección “Aula de la Luz”	IX
Prólogo	XI
Prefacio de los autores	XIII
<b>1. Perfiles básicos de red radial, MT</b>	<b>1</b>
<b>2. Recomendaciones TT/I</b>	<b>3</b>
2.1. Disposición . . . . .	3
2.2. Características básicas . . . . .	4
<b>3. Función 51F</b>	<b>7</b>
3.1. Tipo de curva . . . . .	8
3.2. Intensidad de ajuste . . . . .	9
3.2.1. Límites superiores . . . . .	9
3.2.2. Límites inferiores . . . . .	11
3.3. Punto de paso . . . . .	12
3.3.1. Elemento de protección único en circuito . . . . .	13
3.3.2. Elemento de protección no único en circuito . . . . .	13
<b>4. Función 50F</b>	<b>15</b>
4.1. Intensidad de ajuste . . . . .	16
4.1.1. Elemento de protección único en circuito . . . . .	16
4.1.2. Elemento de protección no único en circuito . . . . .	16

<b>5. Característica combinada 51F + 51TD</b>	<b>19</b>
5.1. Precaución general . . . . .	19
5.2. Función 51TD . . . . .	20
5.2.1. Intensidad de ajuste . . . . .	20
5.2.2. Tiempo de operación . . . . .	21
<b>6. Función 51N</b>	<b>23</b>
6.1. Tipo de curva . . . . .	23
6.2. Intensidad de ajuste . . . . .	24
6.2.1. Límite superior . . . . .	24
6.2.2. Límites inferiores . . . . .	24
6.3. Punto de paso . . . . .	26
6.3.1. Elemento de protección único en circuito . . . . .	26
6.3.2. Elemento de protección no único en circuito . . . . .	31
6.4. Comprobación final . . . . .	32
<b>7. Característica combinada 51N + 51N,TD</b>	<b>33</b>
7.1. Precaución general . . . . .	33
7.2. Función 51N,TD . . . . .	34
7.2.1. Intensidad de ajuste . . . . .	34
7.2.2. Tiempo de operación . . . . .	35
7.3. Función 51N: punto de paso en característica combinada . . . . .	36
7.4. Comprobación final . . . . .	36
<b>8. Función 67N, redes a neutro aislado</b>	<b>37</b>
8.1. Tipo de curva . . . . .	37
8.2. Ajustes . . . . .	38
8.2.1. Intensidad y tensión homopolares . . . . .	38
8.2.2. Angulares . . . . .	40
8.2.3. Temporales . . . . .	40
<b>9. Faltas a tierra muy resistivas</b>	<b>43</b>
9.1. Dos escenarios concretos . . . . .	43
9.2. Técnicas . . . . .	46
9.3. Limitaciones . . . . .	46
9.4. Aplicación . . . . .	48
9.4.1. Redes a neutro aislado . . . . .	48
9.4.2. Redes con neutro puesto a tierra mediante impedancia . . . . .	48
9.5. Otras consideraciones . . . . .	51

<b>10. Prontuario</b>	<b>53</b>
10.1. Transductores de intensidad (TT/I)	53
10.1.1. TT/I de fases	53
10.1.2. T/I toroidal homopolar	53
10.2. Función 51F	53
10.2.1. Tipo de curva	53
10.2.2. Intensidad de ajuste	54
10.2.3. Punto de paso	54
10.3. Función 50F	55
10.3.1. Intensidad de ajuste	55
10.4. Característica combinada 51F + 51TD	56
10.4.1. Inhibición elemento 51	56
10.4.2. Intensidad de ajuste, 51TD	56
10.4.3. Tiempo de operación 51TD	56
10.4.4. Coherencia en característica combinada 51+51F,TD	56
10.5. Función 51N	56
10.5.1. Tipo de curva	57
10.5.2. Intensidad de ajuste	57
10.5.3. Punto de paso	57
10.6. Característica combinada 51N + 51N,TD	58
10.6.1. Inhibición elemento 51N	58
10.6.2. Intensidad de ajuste	58
10.6.3. Tiempo de operación	58
10.6.4. Coherencia en característica combinada 51N+51N,TD	58
10.7. Función 67N (redes con neutro aislado)	58
10.7.1. Tipo de curva	58
10.7.2. Ajustes intensidad y tensión homopolares	59
10.7.3. Ajustes angulares	59
10.7.4. Ajustes temporales	59
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>63</b>
<b>Apéndice A. Faltas monofásicas a tierra, red MT</b>	<b>73</b>
A.1. Escenario	73
A.2. Dipolos y cuadrípolos equivalentes	74
A.2.1. Red AT	74
A.2.2. Transformador	76

A.2.3. Circuitos MT vecinos . . . . .	83
A.2.4. Circuito MT en falta . . . . .	85
A.2.5. Cargas en circuitos . . . . .	86
A.3. Cortocircuito y red involucrada . . . . .	88
A.4. Redes de secuencia . . . . .	90
A.4.1. Secuencia (1) . . . . .	91
A.4.2. Secuencia (2) . . . . .	92
A.4.3. Secuencia (0) . . . . .	93
A.5. Equivalentes Thévenin en redes de secuencia . . . . .	95
A.5.1. Secuencia (1) . . . . .	95
A.5.2. Secuencia (2) . . . . .	96
A.5.3. Secuencia (0) . . . . .	96
A.6. Cálculo de magnitudes en el cortocircuito . . . . .	97
A.7. Magnitudes y ángulos relativos, secuencia (0) . . . . .	98
A.7.1. Régimen de neutro MT aislado . . . . .	98
A.7.2. Régimen de neutro MT conectado a tierra mediante reactancia . . . . .	100
A.7.3. Régimen de neutro MT conectado a tierra mediante impedancia predominantemente resistiva . . . . .	103
<b>Apéndice B. Desequilibrio serie, red MT</b>	<b>109</b>
B.1. Escenario . . . . .	109
B.2. Ecuaciones en magnitudes unitarias . . . . .	110
B.3. Análisis de casos particulares . . . . .	111
B.3.1. Ausencia de impedancias serie . . . . .	111
B.3.2. Impedancias serie idénticas . . . . .	111
B.3.3. Impedancia serie en una única fase . . . . .	112
B.3.4. Fase abierta . . . . .	113
B.4. Redes unitarias de secuencia . . . . .	114
B.4.1. Impedancias / admitancias de secuencia . . . . .	114
B.5. Recopilatorio: intensidades de secuencia frente a escenario . . . . .	117
B.6. Conclusiones . . . . .	118

# Presentación de la colección “Aula de la Luz”

La Cátedra Endesa Red de la Universidad de Sevilla, creada a finales de 2007, fue concebida para afianzar una dilatada y fructífera relación entre ambas instituciones, englobando bajo un único marco diversas actividades de apoyo a la investigación, enseñanzas de postgrado, becas, etc. que se venían realizando durante más de dos décadas.

Sus ejes de actuación se centran preferentemente en la calidad de servicio, fundamental para mantener la competitividad del sector productivo, la eficiencia energética, la utilización de nuevas tecnologías para el desarrollo de redes de distribución inteligentes y el fomento de sistemas energéticos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Los instrumentos creados por la Cátedra Endesa tratan esencialmente de crear vasos comunicantes entre el mundo universitario y el de la empresa, para el beneficio mutuo. En el ámbito académico, el resultado tangible más relevante es el “Aula de la Luz”, un entorno virtual que permite a los alumnos de grado y postgrado, en cualquier momento y desde cualquier lugar del mundo, tener acceso a las presentaciones realizadas por investi-

gadores de primera fila y profesionales del sector eléctrico a lo largo de estos años.

Con este volumen iniciamos una nueva y esperamos que fructífera actividad del “Aula de la Luz”: una colección de monografías técnicas cuyo objetivo es complementar la bibliografía disponible en los circuitos comerciales, cubriendo nichos específicos de conocimiento no adecuadamente abordados, o bien aportando un enfoque más aplicado del que a veces carecen los libros de texto al uso.

Estoy convencido de que el trabajo de los doctores Nicolau y Cruz será de gran utilidad, tanto para los estudiantes de últimos cursos en ingeniería eléctrica como para los profesionales que den sus primeros pasos en el tema de protecciones en redes de distribución, y en esa andadura necesitan el apoyo del experto, con lo cual se habrá reforzado el cumplimiento de uno de los objetivos fundacionales de la Cátedra Endesa en la Universidad de Sevilla, que no es otro que la diseminación altruista del conocimiento.

Antonio Gómez Expósito  
IEEE Fellow  
Director de la Cátedra Endesa

# Prólogo

Cuando Schumacher escribió su ensayo *Lo pequeño es hermoso*, seguro que no estaba pensando en el mundo de las protecciones eléctricas, pero el mismo título podría servir para encabezar el trabajo de los doctores Nicolau y Cruz.

Las protecciones eléctricas son, para la mayoría de los ingenieros, algo mágico que, aunque no entendemos bien cómo funcionan, pensamos que son las responsables de la mayor parte de los grandes episodios de la red. Un antiguo jefe me decía que los ingenieros hemos pasado de resolver problemas técnicos y económicos, usando fundamentos matemáticos y electrotécnicos, al mundo de lo esotérico, en el que hay que aplicar las reglas de la magia y la prestidigitación. En ese mundo mágico aparecen las figuras de los “Responsables de protecciones”, que actúan como verdaderos “Druidas” de sus respectivos poblados. Estos “sabios” de protecciones, han desarrollado sus “remedios y pociones” basados en experiencias vividas en sus empresas de origen, que compartían, no sin críticas y escepticismos, con sus colegas de otras latitudes.

Ahora nos toca vivir una época complicada. Por una parte, pasamos de planteamientos locales (“del mundo de las aldeas”), a la *One Company* del mundo global. En este escenario, ya no son válidas las soluciones que usábamos hasta ahora, basadas en la experiencia y la observación. Ahora

es el momento de justificar nuestros planteamientos basados en modelos matemáticos, hipótesis razonables y condiciones de contorno. De esta manera, estaremos todos seguros de aplicar las mejores configuraciones a cada tipo de red.

Por otra parte, vivimos tiempos de escasez, en los que debemos valorar muy bien dónde y por qué aplicamos los recursos disponibles en cada momento y lugar. El coste de las protecciones en una instalación es pequeño respecto a la importancia que tienen, de hecho no llega al 5 % del total, mientras que su respuesta eficiente puede resolver muchas situaciones complicadas. No parece que sea el tipo de instalaciones donde haya que aplicar los ahorros.

En la obra de los doctores Nicolau y Cruz, se mezclan los enfoques empresariales y académicos, explicando con técnicas ingenieriles los planteamientos que deben regir el diseño y regulación de este tipo de elementos, evitando así la aplicación de soluciones distintas a los mismos problemas en la red. Esto realmente es hacer *One Company* evitando discusiones y comentarios no basados en modelos.

Ángel Arcos Vargas  
Doctor Ingeniero Industrial  
Vicepresidente de Distribución - Endesa

## Prefacio de los autores

Con el nuevo siglo recién estrenado (el XXI, se entiende), me tocó vivir una situación “a media luz”, y no del tipo “Corrientes, 348, 2º piso, ascensor...”, que entonaría el insigne Carlos Gardel.

El trance fue más literal; sucedió que, tras un incidente eléctrico en el que más de un elemento (no humano, por supuesto) anduvo “flojo de remos”, un amplio sector geográfico se quedó, literalmente, “a media luz”. Para colmo, nevaba; adivinando que la noche sería larga e ... inolvidable, recuerdo haber entrado en una cafetería antes de presentarme (de forma voluntaria y como acusado, claro está) al “consejo de guerra” que intuí se reunía con carácter de urgencia en la compañía eléctrica. Cuál sería mi sorpresa cuando, al solicitar un café largo, la persona entrada en años que atendía el local me dijo: “Lo siento; tenemos luz, pero no tenemos fuerza; y la cafetera funciona con la fuerza”.

La realidad era diferente, pero equivalente: la tensión de uso doméstico quedó tan por debajo de su valor declarado, que la moderna cafetera (algo de *smart* tendría) se declaró en huelga.

Una vez normalizado el servicio, más aprisa de lo recomendado por el entorno y la prudencia (alguien definió al gremio como “bomberos excelentes”), vino la penitencia. Como todo “gran incidente”, centrifugó prisas, caos, neurosis y alguna que otra frase por demás celeberrima, afortu-

nadamente ya caída en el olvido. Simultáneamente, sin preaviso alguno, irrumpieron los consabidos tirones de orejas impartidos por las autoridades competentes a diestro y siniestro, para todo aquél que tuviera que ver algo con el Sector Eléctrico. De milagro se salvó el lampista de mi escalera. . .

Una de las autoridades competentes en materia eléctrica, concretamente, la Comisión Nacional de la Energía, planteó una idea (de obligatorio cumplimiento, por supuesto) brillante: todas las compañías del Sector, tanto transportistas como distribuidoras, debían establecer los criterios de ajuste para los sistemas de protección en las fronteras transporte – distribución peninsulares, tal que los problemas de coordinación observados en dicho incidente, y en otros anteriores, no volvieran a evidenciarse.

Establecido el grupo de trabajo, costó lo indecible ponerse de acuerdo en los primeros compases; hasta que se llegó a una metodología eficaz, por demás lógica: afrontar el problema mediante intervalos, ya fueran éstos de intensidad, tensión, impedancia, tiempo, etc. Cada intervalo tendría un límite superior y un límite inferior. Denominando ( $LI$ ) y ( $LS$ ) a sendos límites, el ajuste ( $X$ ) del sistema de protección analizado verificaría la inecuación

$$LI \leq X \leq LS .$$

El límite superior, garante en la detección del cortocircuito, se determina obteniendo el mínimo entre ciertos valores ( $v_1, v_2, \dots, v_n$ ). El límite inferior, garante de la selectividad / coordinación entre los sistemas de protección, se determina obteniendo el máximo entre ciertos valores ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ). Es decir,

$$\begin{aligned} LI &= \text{mín}(v_1, v_2, \dots, v_n) \\ LS &= \text{máx}(u_1, u_2, \dots, u_n) . \end{aligned}$$

Si bien el trabajo resultó oneroso, los resultados superaron las expectativas: los criterios, prontos a ver la luz, constituirán la piedra angular para ajustar los sistemas de protección en redes del alta tensión (AT), trascendiendo más allá de las fronteras transporte – distribución. Asimismo, la metodología utilizada puso de manifiesto, matemáticamente, que determinado equipamiento incumplía la inecuación base. Así, se han adoptado funciones 21 (distancia) como alternativa a determinadas funciones 51 (sobretensión) en transformadores  $AT_1/AT_2$  y en acoplamientos AT. Se ha reafirmado, una vez más, que los sistemas de protección unitarios (principio diferencial) continúan siendo los más adecuados; y que las teleprotecciones no son un capricho de “la gente de protecciones”.

No obstante, el alcance del grupo de trabajo (y el tratado) finaliza en la red AT. De hecho, para los transformadores AT/MT, el análisis se circunscribe a sistemas de protección asociados al devanado AT.

Resultaba obligado completar, de forma consecuente, los criterios para el resto del sistema eléctrico; y, como empresa distribuidora, ENDESA Distribución Eléctrica asumió la obligación. Así surgieron las páginas que siguen (más ásperas, todo hay que decirlo, que este prefacio). La metodología utilizada se fundamenta en límites superiores, límites inferiores e intervalos.

Ha sido menester abjurar de ciertos principios; he renunciado a mis criterios de ajuste “de toda la vida”, basados en una colección breve de valores concretos, por demás proclives al “copiar y pegar” en situaciones de semejanza. Ya basta. Los relés electromecánicos abandonan el mercado y, cada vez más, las instalaciones; los relés actuales incorporan oscilografía (con el aprendizaje diario que ello supone), y cual calculadoras, respetan las ecuaciones matemáticas. Si dos circuitos pueden tener el mismo ajuste, sea; pero que las matemáticas lo demuestren.

Agradezco infinito a las personas de ENDESA que se han molestado en leer, releer y descubrir erratas durante la evolución del documento en aras a la mejora continuada; y rindo pleitesía a las personas de ENDESA que ya se han atrevido a ajustar relés con criterios aquí expuestos.

Guardo la mención de honor para los doctores Don Antonio Gómez Expósito y Don Pedro Cruz Romero, del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. El Dr. Cruz, con su oficio, dedicación y conocimientos académicos ha pulido y enriquecido, una y otra vez, el documento hasta dejarlo lo suficientemente presentable para no avergonzarme. Y el Dr. Gómez nos propuso, a ambos, hacer un libro de ... esto. ¡Cuán arriesgada valentía la suya! ¡A quién se le ocurre!

**Nota:** Para facilitar la lectura de las expresiones matemáticas se ha incluido una nomenclatura después de la bibliografía.

Guillermo Nicolau  
Barcelona, septiembre 2013

Ha sido para mí un honor haber colaborado en la redacción de este libro con el que es quizá el mayor especialista en protecciones de Endesa Distribución. Cuando recibí la primera versión elaborada por el Dr. Nicolau me sorprendió gratamente el rigor y la lógica subyacente en todo el documento, plasmada en una formulación matemática impecable. Mi tarea se ha limitado a revisar concienzudamente la formulación, figuras, etc. y, sobre todo, contrastar los criterios de ajuste de los relés con la bibliografía especializada. Es por ello que se han añadido numerosas notas aclaratorias a pie de página que aluden a prácticas recomendadas por libros y monografías especializados, convenientemente referenciados.

La experiencia ha sido muy positiva, por cuanto ha permitido complementar los conocimientos teóricos y un tanto academicistas, propios de un profesor universitario, con las restricciones tan diversas que surgen en el día a día de la explotación de una red eléctrica. Es mi deseo que este sea el primero de una fructífera serie de colaboraciones enmarcadas dentro de la Cátedra Endesa con el fin último de mejorar la preparación técnica de los ingenieros de las empresas eléctricas y de los egresados de la universidad.

Pedro Cruz  
Sevilla, septiembre 2013

# Capítulo 1

## Perfiles básicos de red radial, MT

Es conveniente, dado que el libro trata de redes radiales, recordar brevemente qué es una red radial MT. Una red radial MT tiene típicamente las siguientes características:

- Explotación habitual: conexión a cabecera única (SE, SM, CR);
- Topología: normalmente capilar (consumos múltiples en derivaciones, fig. 1.1), o, excepcionalmente, dedicada (consumo único);
- Regímenes de neutro: único neutro en SE/SM cabecera ó en SE alimentadora a CR;
- Tipos de impedancia de puesta a tierra del neutro:

$$Z_{pat} = R \text{ (resistiva);}$$

$$Z_{pat} = jX \text{ (inductiva);}$$

$$Z_{pat} = R + jX \text{ (mixta);}$$

$$Z_{pat} \rightarrow \infty \text{ (neutro aislado) .}$$

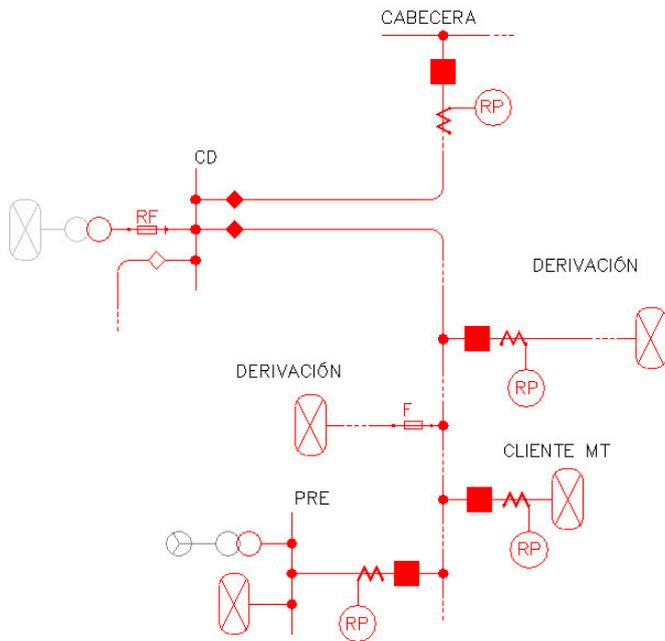


Figura 1.1: Red radial MT, topología capilar: conexiones en derivación que pueden darse.

## Capítulo 2

# Recomendaciones TT/I

El sistema de protección comienza en los transductores (transformadores de intensidad y/o tensión) y finaliza en los interruptores automáticos, pasando por los circuitos secundarios, relés de protección, baterías de tensión auxiliar para alimentación y circuitos de control.

Las redes radiales de distribución equipan típicamente relés de protección basados en la medida de intensidad y, ocasionalmente, de tensión. La elección correcta de los transformadores de intensidad (en lo sucesivo, TT/I) es clave para el correcto funcionamiento de todo el sistema: deben librar a los relés de protección, mediante el factor de reducción oportuno, la réplica más exacta posible de las intensidades primarias, con márgenes dinámicos de hasta 3 órdenes de magnitud. Se enuncian a continuación los requisitos que deben cumplir.

### 2.1. Disposición

Existen dos disposiciones para los TT/I:

- 1 T/I por fase;
- 1 T/I por fase y 1 T/I toroidal de homopolar<sup>1</sup> (conteniendo las tres fases), fig. 2.1.

---

<sup>1</sup>Denominado también T/I toroidal de neutro; para evitar confusión con T/I instalado en puesta a tierra en neutro del transformador de potencia, se denominará T/I toroidal homopolar.

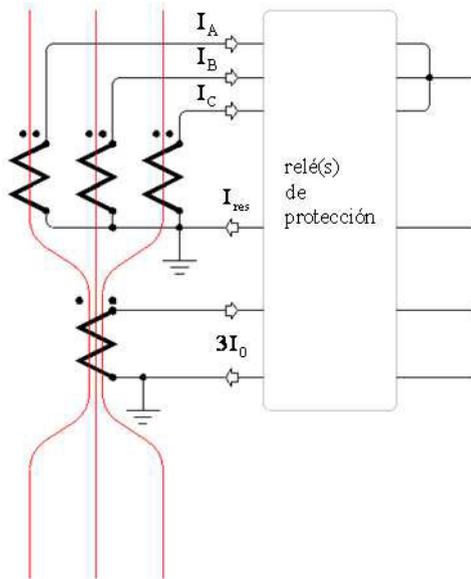


Figura 2.1: Esquema disposición TT/I para relés de protección, circuitos MT.

## 2.2. Características básicas

TT/I de fases:

- Intensidad primaria nominal superior a 1,2 veces máxima carga admisible por circuito protegido<sup>2</sup>:

$$I_{P,nom} \geq 1,2 \cdot I_{m\acute{a}x,carga}^{CP}; \quad (2.1)$$

- Máxima intensidad de cortocircuito primaria soportada sin saturación secundaria: superior o igual a la máxima intensidad de cortocircuito trifásica en barras MT donde conecte cabecera de circuito:

$$I_{P,cc,m\acute{a}x}^{NO SAT} \geq I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}^{BAR}; \quad (2.2)$$

<sup>2</sup>De este modo, los TT/I son capaces de soportar permanentemente la máxima carga del circuito protegido, así como sobrecargas temporales.

**Observación:** si los TT/I ofrecen más de una intensidad nominal primaria, seleccionable mediante toma, deberá escogerse, precisamente, la que satisfaga (2.2).

- Intensidad primaria nominal (para funciones de sobreintensidad homopolar que operen mediante suma secundaria de las intensidades de fase) [5]: al objeto de minimizar los errores de medida ante intensidades débiles:

$$I_{P,nom} \leq 0,5 \cdot (3I_{0,m\acute{a}x}^{CF}) . \quad (2.3)$$

T/I toroidal de homopolar:

Con independencia del régimen en puesta a tierra del neutro (aislado, mediante impedancia) se ha de cumplir lo siguiente:

- Intensidad primaria nominal<sup>3</sup>:

$$(3I_{0,m\acute{a}x,carga}^{CP}) \leq I_{P,nom} \leq 0,5 \cdot (3I_{0,m\acute{a}x}^{CF}) ; \quad (2.4)$$

- Intensidad límite de precisión asignada (máxima intensidad primaria soportada, en cortocircuito, sin saturación)[7]: superior o igual a la máxima intensidad monofásica de cortocircuito en barras MT donde conecte cabecera de circuito<sup>4</sup>.

$$I_{P,cc,m\acute{a}x}^{NO SAT} \geq 3I_{0,m\acute{a}x}^{CF} . \quad (2.5)$$

---

<sup>3</sup>El valor  $(I_{P,nom})$  ha de ser inferior a  $(3I_{0,m\acute{a}x}^{CF})$  para evitar un error excesivo en escenarios de faltas a tierra resistivas; y debe ser superior a  $(3I_{0,m\acute{a}x,carga}^{CP})$ , dado que no se le exige exactitud secundaria para intensidades de valores inferiores.

<sup>4</sup>De este modo, de producirse un defecto monofásico franco en cabecera del circuito, el error del T/I estará por debajo del límite normalizado.



## Capítulo 3

# Función 51F

Si bien su misión fundamental es detectar y eliminar cortocircuitos polifásicos (entre fases y/o entre fases y tierra), históricamente ha prestado más servicios, a pesar de las restricciones implícitas propias de su sencillez operativa: protección de sobrecarga, protección de TT/I, etc. Todo ello con una curva intensidad - tiempo que ofrece dos únicos grados de libertad: la intensidad de ajuste y un punto de paso. A lo sumo, la elección del tipo de curva permite cierto margen, siempre y cuando sea la misma respecto a elementos tanto “aguas arriba” como “aguas abajo” del relé considerado.

Si los TT/I de fase verifican (2.1), la función 51F queda liberada en lo que a protección de TT/I se refiere. Para la sobrecarga del circuito, y de incorporar la facilidad el relé, se recomienda utilizar la función térmica (49), cuyo comportamiento contempla los procesos de calentamiento y enfriamiento de los conductores, descrito a continuación.

En cualquier caso, se citan a continuación criterios para proteger, mediante función 51F, los TT/I y la sobrecarga de conductores; en el bien entendido que esta última no queda completamente cubierta, al no contemplarse el calentamiento / enfriamiento.

### 3.1. Tipo de curva

Se obtiene teniendo en cuenta la característica térmica de los conductores:

$$t = \tau_1 \ln \left( \frac{\left( \frac{I}{I_{m\acute{a}x,carga}} \right)^2}{\left( \frac{I}{I_{m\acute{a}x,carga}} \right)^2 - 1} \right), I > I_{m\acute{a}x,carga}, \text{ temp. inicial} = 20 - 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

- $(t)$  es el tiempo máximo soportable por el conductor cuando por este circula  $(I > I_{m\acute{a}x,carga})$ ;
- $(\tau_1)$  es la constante de tiempo asociada al proceso de calentamiento del conductor.

La curva que más se acomoda a dicha característica es la extremadamente inversa (EI):

$$t = \frac{k}{\left( \frac{I}{I_{aj}} \right)^2 - 1}, I > I_{aj}. \quad (3.1)$$

Véase gráfica comparativa, curvas de sobrecorriente (normal inversa, NI; muy inversa, MI; extremadamente inversa, EI) frente a característica térmica (fig. 3.1).

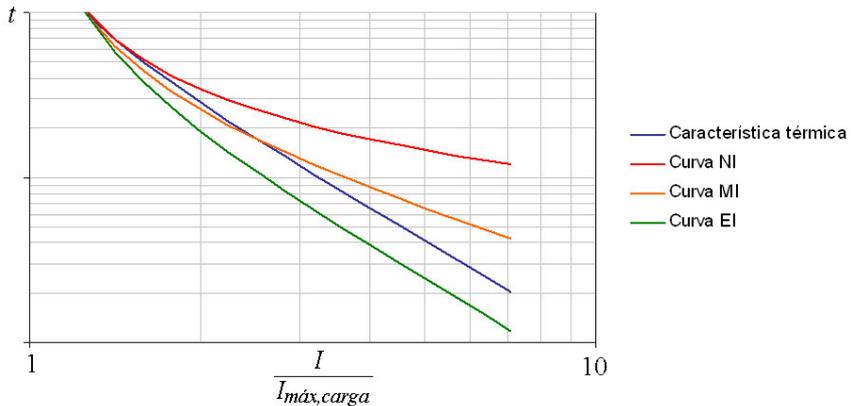


Figura 3.1: Característica térmica del conductor y curvas NI, MI, EI.

En cualquier caso, resulta recomendable aplicar el mismo tipo de curva (NI, MI, EI) que la empleada en elementos de protección [1]:

- “aguas abajo”: fusibles e instalaciones con interruptor y protección (*reclosers*, clientes, PRE, etc.);
- “aguas arriba”:
  - Circuitos con cabeceras en SE / SM: transformador AT/MT (en SE) / transformador MT/MT (en SM);
  - Circuitos con cabeceras en CR: circuito(s) alimentador(es)

para obtener coordinación con el mayor número de elementos.

## 3.2. Intensidad de ajuste

### 3.2.1. Límites superiores

**Mínima intensidad de cortocircuito bifásico que pueda darse en circuito protegido**<sup>1</sup>: normalmente, en punto del circuito eléctricamente más alejado de cabecera. De existir margen, se recomienda asumir cierta resistencia de falta<sup>2</sup> ( $R_F$ ); por ejemplo,  $R_F = 2\Omega$ :

$$I_{aj,51F} < I_{cc,2\phi,mín} . \quad (3.2)$$

Si “aguas abajo” del relé objeto de estudio existieran  $N$  dispositivos de protección (fusibles, relés), se ha de procurar que el relé objeto de estudio actúe como respaldo, disparando en el caso de cortocircuito bifásico en el extremo lejano del tramo  $TP_1$  protegido por cada dispositivo de protección [5]:

$$I_{aj,51F} < \text{mín} \left\{ I_{cc,2\phi,mín}^{TP_1}, I_{cc,2\phi,mín}^{TP_2}, \dots, I_{cc,2\phi,mín}^{TP_N} \right\} . \quad (3.3)$$

Obviamente, de verificarse (3.3), se verifica también (3.2).

**Máxima intensidad de carga permanente soportada**: si el circuito protegido comprende tramos de diferente conductor o con diferentes condiciones de instalación (aéreo, subterráneo), se contemplará:

<sup>1</sup>Este límite (3.2) es imprescindible en ausencia de función 50F; en su presencia, garantiza actuación en respaldo.

<sup>2</sup>En [8] se sugiere que  $I_{aj,51F} < 0,5I_{cc,2\phi,mín}$  y en [6] que  $I_{aj,51F} < 0,8I_{cc,2\phi,mín}$ , pues se considera resistencia de falta nula.

- la intensidad máxima de carga (en permanencia) de todos y cada uno de los tramos ( $T_1, T_2, \dots, T_N$ );
- el valor mínimo de dichas intensidades constituye la referencia para el límite inferior de ajuste<sup>3</sup>:

$$I_{aj,51F} \cong 1,2 \cdot \min \left\{ I_{máx,carga}^{T_1}, I_{máx,carga}^{T_2}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right\} . \quad (3.4)$$

Si el circuito protegido comprende un único tramo se verificará:

$$I_{aj,51F} \cong 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP} . \quad (3.5)$$

**Máxima intensidad permanente soportada por TT/I de fases:** si no se verifica (2.1) se contemplará<sup>4</sup>:

$$I_{aj,51F} \cong 1,2 \cdot I_{P,nom} . \quad (3.6)$$

Por tanto, la intensidad máxima de ajuste queda definida mediante la inequación

$$I_{aj,51F} \leq \min \left\{ 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP}; 1,2 \cdot I_{P,nom}; 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right] \right\} (3.7)$$

**Observación:** si la evaluación del miembro derecho de (3.7) fuera

$$1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP} ,$$

el ajuste debería ser

$$I_{aj,51F} = 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP} . \quad (3.8)$$

<sup>3</sup>Obsérvese que  $I_{aj,51F} \neq I_{máx,carga}$ , ya que es necesario un factor de seguridad para evitar actuación del relé en caso de "carga fría" o corriente de conexión de transformadores, así como para permitir una cierta sobrecarga transitoria. En [3] se aconseja un valor mínimo de 1,5, y se habla incluso de un factor 2 para tener en cuenta la sobrecarga transitoria admitida en redes de distribución bajo condiciones de emergencia. En [8] y [5] también se aconseja 2. En [4] se recomienda un factor de seguridad que se aplica **no a  $I_{máx,carga}$  sino a la máxima carga transitoria** (*short-time maximum load*). Se aconseja un factor 1,2 para las curvas MI y EI, y un factor 1,5 para NI [4]. La razón de este criterio es que las curvas MI y EI tienen un tiempo de operación mayor para pequeñas sobrecargas. En [6] se aconseja un factor de 1,25 - 1,5 para líneas, pero que puede ser 2 para alimentadores principales bajo condiciones de emergencia.

<sup>4</sup>Esta condición obliga a que exista una cierta coordinación entre TT/I y el relé: de circular precisamente ( $I_{aj,51F}$ ) por el circuito protegido, los TT/I deben soportarla un tiempo suficiente.

Si el resultado fuera

$$1, 2 \cdot \text{mín} \left[ I_{\text{máx,carga}}^{T_1}, I_{\text{máx,carga}}^{T_2}, \dots, I_{\text{máx,carga}}^{T_N} \right], \quad (3.9)$$

el ajuste debería ser

$$I_{aj,51F} = 1, 2 \cdot \text{mín} \left[ I_{\text{máx,carga}}^{T_1}, I_{\text{máx,carga}}^{T_2}, \dots, I_{\text{máx,carga}}^{T_N} \right], \quad (3.10)$$

al objeto de no sobrepasar la máxima carga, ni en el circuito, ni en tramo alguno del mismo.

### 3.2.2. Límites inferiores

**Selectividad:** Si “aguas abajo” del circuito protegido existen otros elementos de protección, deberá garantizarse coordinación con todos y cada uno de ellos. Aunque la coordinación se realiza “uno contra uno” (relé objeto de estudio contra elemento de protección aguas abajo), se dan redes (fig. 3.2) con algunas derivaciones protegidas por sus correspondientes elementos (relés, fusibles, etc.).

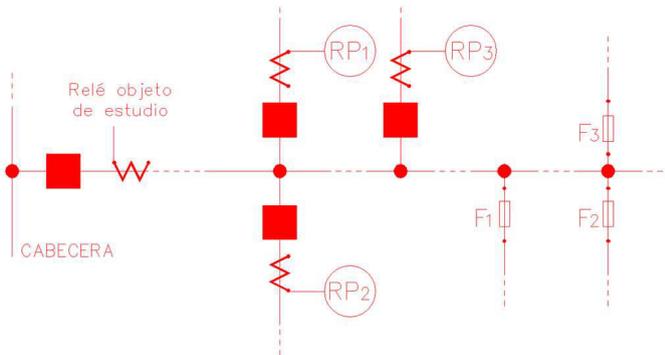


Figura 3.2: Coordinación relé objeto de estudio – elementos de protección “aguas abajo”.

- En el caso particular de  $K$  fusibles (o ruptofusibles)<sup>5</sup>:

$$I_{aj,51F} \geq (1, 3, \dots, 1, 4) \cdot \text{máx} \left\{ I_{FUSIÓN}^{F_1}, I_{FUSIÓN}^{F_2}, \dots, I_{FUSIÓN}^{F_K} \right\} ; \quad (3.11)$$

- En el caso particular de  $M$  relés de protección<sup>6</sup>:

$$I_{aj,51F} \geq 1, 2 \cdot \text{máx} \left\{ I_{aj,51F}^{RP_1}, I_{aj,51F}^{RP_2}, \dots, I_{aj,51F}^{RP_M} \right\} . \quad (3.12)$$

Obviamente, si el circuito comprende fusibles (o ruptofusibles) y relés de protección (fig. 3.2):

$$I_{aj,51F} \geq \text{máx} \left\{ (1, 3, \dots, 1, 4) \cdot \text{máx} \left[ I_{FUSIÓN}^{F_1}, \dots, I_{FUSIÓN}^{F_K} \right]; 1, 2 \cdot \text{máx} \left[ I_{aj,51F}^{RP_1}, \dots, I_{aj,51F}^{RP_M} \right] \right\} . \quad (3.13)$$

**Observación:** el margen de seguridad es inferior para relés respecto al recomendado para los fusibles, dado el grado de dispersión en curvas (I/t) de éstos.

### 3.3. Punto de paso

Independientemente al tipo de curva empleado (NI, MI, EI), una vez definida la intensidad de ajuste queda por determinar el parámetro( $K$ ); en efecto:

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_{aj}}\right)^\alpha - 1}; \quad \alpha = \begin{cases} 0,02; & NI \\ 1; & MI \\ 2; & EI \end{cases} ; \quad (3.14)$$

y este queda totalmente definido si, para una intensidad determinada( $I_{op}$ ), se desea un tiempo de operación concreto( $t_{op}^{I_{op}}$ ):

$$K = \left[ \left( \frac{I_{op}}{I_{aj}} \right)^\alpha - 1 \right] t_{op}^{I_{op}} .$$

El par ( $I_{op}$ ); ( $t_{op}^{I_{op}}$ ) constituye un punto de paso, el cual depende de los dos escenarios detallados a continuación.

<sup>5</sup>Se recuerda la conveniencia de emplear curva extremadamente inversa, en el relé objeto de estudio, cuando ha de coordinar con fusibles.

<sup>6</sup>Típicamente, de verificarse (3.8) o (3.10) para todos los relés involucrados, se verifica (3.12).

### 3.3.1. Elemento de protección único en circuito

No existe elemento de protección alguno “aguas abajo” (fusibles, ruptofusibles, derivaciones con interruptor y protección, *reclosers*, clientes, PRE, etc.).

En tal escenario, debe salvaguardarse, entre los tramos ( $T_1, T_2, \dots, T_N$ ) del conductor, aquél que resulte “más débil” (es decir, ante el cortocircuito que presente el menor tiempo admisible de eliminación); sea dicho tramo ( $T_i$ ). Deberá calcularse, en ( $T_i$ ), el cortocircuito trifásico franco  $I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}^{T_i}$  situado en el punto eléctricamente más próximo a cabecera.

La característica térmica del tramo ( $T_i$ ) indicará el tiempo límite  $t_{l\acute{i}m,I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}}^{T_i}$  ante tal intensidad. Se distinguen dos casos, presencia o ausencia de función 50F:

- Presencia de función 50F. La función 51F actúa como respaldo del 50F:

$$\Delta t \leq t_{op,51F}^{T_i} < t_{l\acute{i}m,I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}}^{T_i} ; \quad (3.15)$$

- Ausencia de función 50F. La función 51F actúa como función principal:

$$t_{op,51F}^{T_i} < t_{l\acute{i}m,I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}}^{T_i} . \quad (3.16)$$

### 3.3.2. Elemento de protección no único en circuito

Además de los criterios descritos en (3.15) o (3.16), debe garantizarse selectividad con elementos de protección “aguas abajo” (fusibles, ruptofusibles, derivaciones con interruptor y protección, *reclosers*, clientes, PRE, etc.).

En efecto: considérense los tramos del circuito ( $TP_1, TP_2, \dots, TP_N$ ) equipados respectivamente con elementos de protección ( $EP_1, EP_2, \dots, EP_N$ ).

Para un tramo cualquiera ( $TP_i$ ) del circuito, debe garantizarse, en escenario de cortocircuito trifásico, coordinación entre la función 51F objeto de análisis con elemento ( $EP_i$ ), es decir<sup>7</sup>,

$$t_{op,51F}^{TP_i} \geq t_{op,EP_i}^{TP_i} + \Delta t . \quad (3.17)$$

<sup>7</sup>Se supone que si se verifica (3.16) (selectividad para la intensidad máxima de cortocircuito en cabecera del tramo  $T_i$  [6]) también se verificará selectividad para cualquier otra corriente de cortocircuito en  $T_i$ , ya que se asumen curvas homogéneas en  $EP_i$  y en el relé objeto de estudio.

Caso de no satisfacerse simultáneamente (3.15) y (3.17), o (3.16) y (3.17) será preciso equipar relé de protección objeto de análisis con función 51TD.

Asimismo, se ha de procurar que el relé objeto de estudio actúe de respaldo ante un fallo en un dispositivo de protección “aguas abajo” (tramo  $TP_i$ ):

$$t_{op,51F}^{I_{cc,3\phi,max}^{TP_i}} \leq t_{\acute{lim},I_{cc,3\phi,max}}^{TP_i} . \quad (3.18)$$

# Capítulo 4

## Función 50F

De naturaleza instantánea, debe centrarse exclusivamente en la detección y eliminación de cortocircuitos polifásicos de intensidad relevante (muy superior a la sobrecarga), si bien su capacidad de coordinación con elementos de protección ubicados “aguas abajo” ofrece muy poco margen; en ocasiones, totalmente nulo.

Adicionalmente, la aparición de intensidades transitorias, debidas a la magnetización de transformadores MT/BT subsidiarios del circuito protegido, puede dar lugar a actuaciones intempestivas, de no considerarse dicho particular durante los cálculos de ajuste.

Afortunadamente, la oscilografía que equipan los relés de protección actuales permite valorar el orden de magnitud para dichas intensidades transitorias, estableciendo una cota y una duración máximas, dada la naturaleza estocástica de las mismas. Las observaciones oscilográficas repetitivas establecerán tales cotas.

## 4.1. Intensidad de ajuste

### 4.1.1. Elemento de protección único en circuito

#### Límite superior

En general, se considera satisfactorio<sup>1</sup>:

$$I_{aj,50F} \leq 0,8 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR}, \quad (4.1)$$

garantizándose eliminación instantánea ante cortocircuitos polifásicos, francos y cercanos a cabecera.

#### Límite inferior

Impuesto por intensidades transitorias de conexión. Resulta recomendable:

$$I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot \max \{I_{TRAN}\}. \quad (4.2)$$

De ignorarse  $\max \{I_{TRAN}\}$ , puede resultar útil un límite inferior acotado según<sup>2</sup>:

$$5 \cdot I_{aj,51F} \leq I_{aj,50F} < 8 \cdot I_{aj,51F}. \quad (4.3)$$

Véase ejemplo ilustrativo, fig. 4.1, para registro obtenido en instalación.

### 4.1.2. Elemento de protección no único en circuito

Además del criterio expuesto en (3.1.1), debe garantizarse selectividad con elementos de protección “aguas abajo” (fusibles, derivaciones con interruptor y protección, *reclosers*, clientes, PRE, etc.).

En tal caso, y dada su actuación instantánea, todo disparo ordenado por función objeto de análisis debe producirse por defectos ubicados entre

- la cabecera del circuito protegido, y
- el punto eléctricamente más cercano ( $P_i$ ) al relé objeto de estudio, perteneciente al tramo protegido ( $TP_i$ ) “aguas abajo” del citado relé.

<sup>1</sup>En [3] se recomienda  $I_{aj,50F} \leq 0,5 \cdot I_{cc,3\phi}^{BAR} \approx 0,6 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR}$ .

<sup>2</sup>En [3] y [6] se propone expresión similar con la intensidad máxima de carga:  $6I_{máx,carga}^{CP} \leq I_{aj,50F} \leq 10I_{máx,carga}^{CP}$ . Teniendo en cuenta (3.8) este criterio es prácticamente equivalente a (4.3).

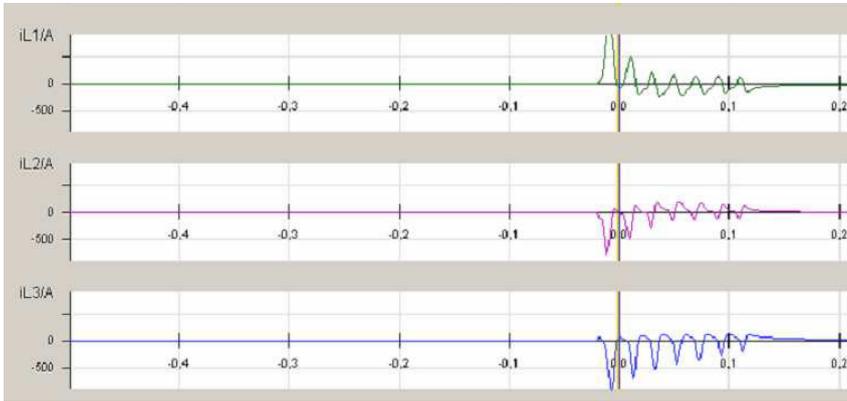


Figura 4.1: Ejemplo para intensidades transitorias de conexión (fases), circuito 15 kV. Escalado vertical en valores primarios. Escalado horizontal en segundos.

**Observación:** nótese que el punto eléctricamente más cercano ( $P_i$ ) no tiene por qué coincidir con el punto físicamente más cercano, que puede corresponder (o no) al tramo protegido ( $TP_i$ ).

Con objeto de garantizar plena selectividad [9]<sup>3</sup>:

$$I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot I_{cc,3\phi}^{P_i} . \quad (4.4)$$

En tal caso, deberán satisfacerse tres condiciones:

$$I_{aj,50F} \leq 0,8 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR} ; I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{I_{TRAN}\} ; I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot I_{cc,3\phi}^{P_i} ,$$

que, anotadas en inecuación única resulta

$$1,25 \cdot \text{máx} \left\{ \text{máx} [I_{TRAN}] ; I_{cc,3\phi}^{P_i} \right\} \leq I_{aj,50F} \leq 0,8 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR} . \quad (4.5)$$

De no satisfacerse al completo dicha inecuación, la función 50F deberá estar fuera de servicio; será menester utilizar una característica (I/t) 51F + 51TD.

<sup>3</sup>En [8] y [5] se recomienda lo mismo. En [9] se indica que, con este ajuste, la función 50F cubre alrededor del 80 % de la sección de la línea.



## Capítulo 5

# Característica combinada 51F + 51TD

Las limitaciones impuestas por la naturaleza de la función 50F recomiendan, en múltiples ocasiones, utilizar “un instantáneo con tiempo adicional” (denominación popular para la función 51TD), al objeto de satisfacer plenamente inecuaciones operativas que la función 50F no resuelve por sí sola.

El uso de la función 51TD combinada con la función 51F amplía los dos únicos grados de libertad de esta última, permitiendo mayor versatilidad en escenarios de coordinación con elementos de protección situados “aguas abajo”.

### 5.1. Precaución general

La combinación 51F + 51TD presenta una gráfica genérica según fig. 5.1.

En algunos relés de protección, ambas funciones (51F, 51TD) pueden estar en servicio y operar de forma independiente. En tal caso, puede presentarse el escenario descrito en fig. 5.1, un valor de intensidad ( $I_{CR}$ ) tal que

$$\begin{aligned} I_{CR} &< I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}^{BAR} \\ t_{op,51F}^{I>I_{CR}} &< t_{op,51TD}^{I>I_{CR}} . \end{aligned}$$

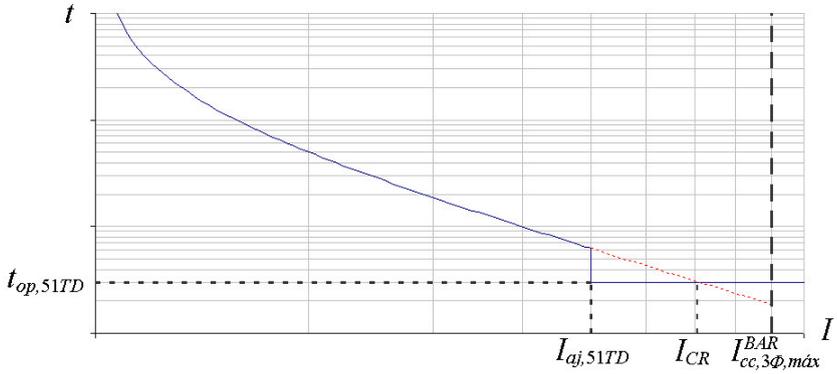


Figura 5.1: Característica combinada sobreintensidad fases, curva + tiempo definido.

Si se desea evitar dicho comportamiento, bastará con inhibir función 51F para intensidades superiores al ajuste de función 51TD:

$$I_{INH,51} = I_{aj,51TD} .$$

## 5.2. Función 51TD

### 5.2.1. Intensidad de ajuste

#### Límite superior

De permitirlo las intensidades transitorias de conexión y el estudio de selectividad, puede reducirse respecto a la función 50F<sup>1</sup>:

$$I_{aj,51TD} \leq \alpha \cdot I_{cc,2\phi,BAR} , \quad \alpha < 0,8 . \tag{5.1}$$

#### Límite inferior

Impuesto por inmunidad ante intensidades transitorias de conexión. Suponiendo ya escogido el tiempo de operación ( $t_{op,51TD}$ ) para la función

---

<sup>1</sup>El motivo de esta reducción es porque con la función 51TD se puede ajustar el tiempo de operación para facilitar la selectividad con dispositivos “aguas abajo”; esto no es posible con la función 50F.

51TD (mediante estudio de coordinación con elementos “aguas abajo”), y asumiendo conocido el tiempo máximo de las intensidades transitorias de conexión, se plantean dos escenarios:

- $t_{m\acute{a}x}\{I_{TRAN}\} \leq 0,75(t_{op,51TD})$ ; límite inferior independiente a intensidades transitorias de conexión;
- $t_{m\acute{a}x}\{I_{TRAN}\} \geq 0,75(t_{op,51TD})$ ; el límite inferior debe satisfacer

$$I_{aj,51TD} \geq 1,25 \cdot \text{m\acute{a}x}\{I_{TRAN}\} . \quad (5.2)$$

En la práctica, y de desconocerse alguno de ambos valores:

- $\text{m\acute{a}x}\{I_{TRAN}\}$ ;
- $t_{m\acute{a}x}\{I_{TRAN}\}$ ,

puede resultar útil establecer un límite inferior ( $LI_{51TD}$ ), similar a (4.3), según:

$$5 \cdot I_{aj,51F} \leq LI_{51TD} < 8 \cdot I_{aj,51F} . \quad (5.3)$$

## 5.2.2. Tiempo de operación

### Límite superior

Es el tiempo de operación asociado a función 51F. Para garantizar que se verifique el trazado de la fig. 5.1<sup>2</sup>:

$$t_{aj,51TD} = t_{op,51TD} \leq t_{op,51F}^{I_{aj,51TD}} . \quad (5.4)$$

### Límite inferior

Impuesto por la selectividad. Considerando de nuevo los tramos ( $TP_1, TP_2, \dots, TP_n$ ) equipados con elementos de protección ( $EP_1, EP_2, \dots, EP_n$ ), para el punto ( $P_i$ ) eléctricamente más cercano de un tramo cualquiera ( $TP_i$ ) debe garantizarse, en escenario de cortocircuito trifásico, coordinación entre función 51TD y elemento ( $EP_i$ ), es decir,

$$t_{op,51TD}^{I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}^{P_i}} \geq t_{op,EP_i}^{I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}^{P_i}} + \Delta t .$$

---

<sup>2</sup>Esta condición garantiza que la función combinada (I/t) nunca sea creciente.



# Capítulo 6

## Función 51N

Esta función se aplicará, exclusivamente, en redes con neutro conectado a tierra mediante impedancia. Véase en el capítulo 1 los regímenes de neutro considerados. Su misión principal es detectar y eliminar cortocircuitos (normalmente monofásicos) fase - tierra.

Teniendo en cuenta el contexto, los cortocircuitos fase - tierra resultan de intensidad moderada; de hecho, la intensidad circulante por la fase en falta puede situarse en valores inferiores o iguales a los máximos de carga permitidos. Concluyendo, puede establecerse que los tiempos de eliminación, ante faltas a tierra, no resultan críticos para el material, asumiendo que este debe soportar, en las dos fases no afectadas por la falta, la sobretensión fase - tierra consecuente (valor máximo:  $\sqrt{3}$  veces la tensión simple).

Dependiendo del ajuste, será necesario asociar la función 51N al T/I toroidal homopolar, al objeto de evitar errores de medida ante intensidades moderadas de falta.

### 6.1. Tipo de curva

Habitualmente, en circuitos MT, la curva de la función 51N suele ser más rápida que la curva de la función 51F. En tal caso, si la función 51F respeta la característica térmica del conductor, esta queda automáticamente respetada por la función 51N.

En [5] se indica que el tipo de curva más común es la MI. No obstante,

de existir fusibles “aguas abajo”, la característica térmica de los mismos presenta un trazado más acomodado a la curva extremadamente inversa (EI) que a ninguna otra. Dado que los fusibles captan cualquier tipo de cortocircuito, resulta muy aconsejable evitar desconexiones de cabecera por actuación de protecciones no coordinadas con los fusibles; la mejor coordinación con los fusibles se consigue con la curva (EI).

En general, al igual que en función 51F, resulta recomendable aplicar el mismo tipo de curva (NI, MI, EI) que la empleada en elementos de protección:

- “aguas abajo”: fusibles e instalaciones con interruptor y protección (*reclosers*, clientes, PRE, etc.);
- “aguas arriba”:
  - Circuitos con cabeceras en SE / SM: transformador AT/MT (en SE) / transformador MT/MT (en SM);
  - Circuitos con cabeceras en CR: circuito(s) alimentador(es) para obtener coordinación con el mayor número de elementos.

## 6.2. Intensidad de ajuste

### 6.2.1. Límite superior

Es la mínima intensidad de cortocircuito monofásico que pueda darse en circuito protegido. Véase, en nomenclatura, definición para  $\{3I_{0,mín}^{CF}\}$

$$I_{aj,51N} < 3I_{0,mín}^{CF} \quad (6.1)$$

### 6.2.2. Límites inferiores

#### Criterio de máxima( $3I_0$ ) circulante en carga

Véase definición en nomenclatura. Resulta conveniente realizar mediciones secundarias para determinar el valor de ( $3I_{0,máx,carga}$ ) en circuito protegido; consecuentemente<sup>1</sup>:

$$I_{aj,51N} \geq 1,25 \cdot \{3I_{0,máx,carga}\} \quad (6.2)$$

<sup>1</sup>De este modo se garantiza la actuación con un factor de seguridad 1,25 respecto al escenario en ausencia de defecto alguno.

La medida de ( $3I_{0,m\acute{a}x,carga}$ ) debe realizarse en secundario de TT/I utilizados para la funci3n. En redes con poco desequilibrio [4, 10] suele ser inferior a 0,5 A primarios (medidos con toroidal). Si se emplean 3 TT/I debe contemplarse el criterio siguiente.

### Criterio de error en la medida de ( $3I_0$ ) mediante TT/I de fase

Al objeto de inmunizar la funci3n 51N ante tales errores, se recomienda [10]:

$$I_{aj,51N} \geq 0,1I_{P,nom} . \quad (6.3)$$

**Observaci3n:** ello puede implicar, una vez calculado el ajuste necesario, captar ( $3I_0$ ) en T/I toroidal homopolar para la funci3n 51N.

### Selectividad

Si “aguas abajo” del circuito protegido hay otros elementos de protecci3n, deber3 garantizar selectividad con todos y cada uno de ellos; en particular, con el de mayor ajuste.

- En el caso particular de  $K$  fusibles (o ruptofusibles):

$$I_{aj,51N} \geq (1,3,\dots,1,4) \cdot \text{m}\acute{a}\text{x} \left\{ I_{FUSI3N}^{F_1}, I_{FUSI3N}^{F_2}, \dots, I_{FUSI3N}^{F_K} \right\} ; \quad (6.4)$$

- En el caso particular de  $M$  rel3s de protecci3n:

$$I_{aj,51N} \geq 1,2 \cdot \text{m}\acute{a}\text{x} \left\{ I_{aj,51N}^{RP_1}, I_{aj,51N}^{RP_2}, \dots, I_{aj,51N}^{RP_M} \right\} . \quad (6.5)$$

Obviamente, si el circuito comprende fusibles (o ruptofusibles) y rel3s de protecci3n:

$$I_{aj,51N} \geq \text{m}\acute{a}\text{x} \left\{ (1,3,\dots,1,4) \cdot \text{m}\acute{a}\text{x} \left[ I_{FUSI3N}^{F_1}, \dots, I_{FUSI3N}^{F_K} \right] ; 1,2 \cdot \text{m}\acute{a}\text{x} \left[ I_{aj,51N}^{RP_1}, \dots, I_{aj,51N}^{RP_M} \right] \right\} . \quad (6.6)$$

**Observaci3n:** el margen de seguridad es inferior para rel3s respecto al recomendado para los fusibles, dado el grado de dispersi3n en curvas (I/t) de 3stos.

### 6.3. Punto de paso

Tal y como se ha indicado previamente, asumiendo curva 51N más rápida (para cualquier intensidad de falta a tierra) que la curva 51F, no se precisa contemplar la característica térmica de tramo alguno.

#### 6.3.1. Elemento de protección único en circuito

##### Caso de intensidades residuales captadas por suma secundaria de intensidades de fase

En ausencia de falta, las intensidades transitorias de conexión provocan ausencias secundarias residuales de error, transitorias y no nulas; en efecto, si bien en magnitudes primarias:

$$I_A + I_B + I_C = I_{A,TRAN} + I_{B,TRAN} + I_{C,TRAN} = 0$$

el comportamiento individual en cada uno de los 3 TT/I, por errores de medida:

- ante componentes asimétricas;
- ante contenido armónico,

da lugar, en secundario:

$$\begin{aligned} I_{A,SEC} + I_{B,SEC} + I_{C,SEC} = \\ I_{A,TRAN,SEC} + I_{B,TRAN,SEC} + I_{C,TRAN,SEC} = I_{RES,TRAN,SEC} \neq 0. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Véase en fig. 6.1 un ejemplo de intensidad residual secundaria transitoria asociada a conexión.

Las intensidades secundarias residuales de error transitorias presentan las características siguientes:

- Son independientes a la limitación impuesta por el régimen de neutro;
- Solamente las mediciones sistemáticas y repetitivas con instrumentación adecuada permiten establecer acotaciones (en intensidad y tiempo) para un escenario de carga concreto;
- Presentan componente asimétrica y contenido armónico (fig. 6.2).

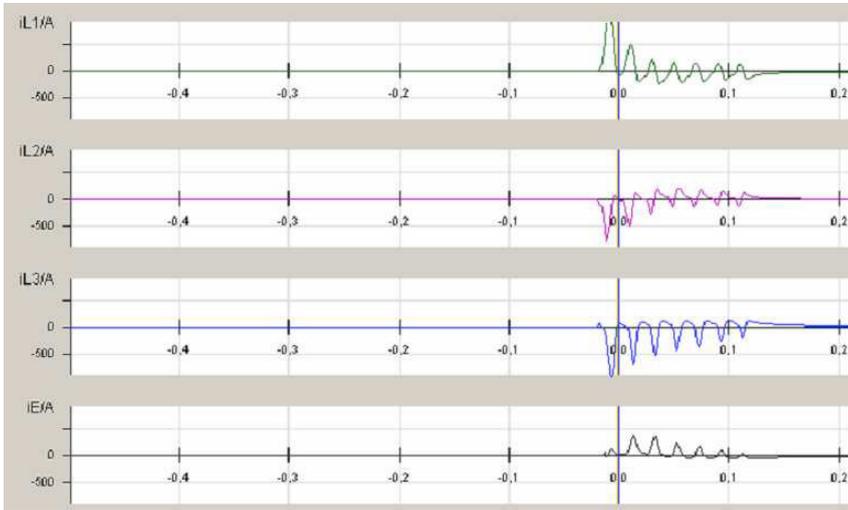


Figura 6.1: Ejemplo para intensidades transitorias de conexión (fases y residual), circuito 15 kV. Escalado vertical en valores primarios. Escalado horizontal en segundos.

Vistas las singularidades, conviene apuntar una solución práctica que garantice la inmunidad de la función 51N ante intensidades secundarias residuales de error transitorias. Véase fig. 6.3, donde se traza, en función del tiempo, y asumiendo conexión en  $t=0$

$$ENV\{I_{RES,TRAN}\} ,$$

es decir, la evolución temporal para la envolvente, del valor eficaz asociado a la intensidad residual transitoria. Obviamente, para

$$t \geq t [ENV\{I_{RES,TRAN}\} = I_{aj,51N}] ,$$

la función 51N no opera, puesto que

$$ENV\{I_{RES,TRAN}\} < I_{aj,51N} .$$

Por tanto, basta con fijar

$$t_{op,51N}^{\forall I} \geq t [ENV\{I_{RES,TRAN}\} = I_{aj,51N}] + \Delta t_{TRAN} . \quad (6.8)$$

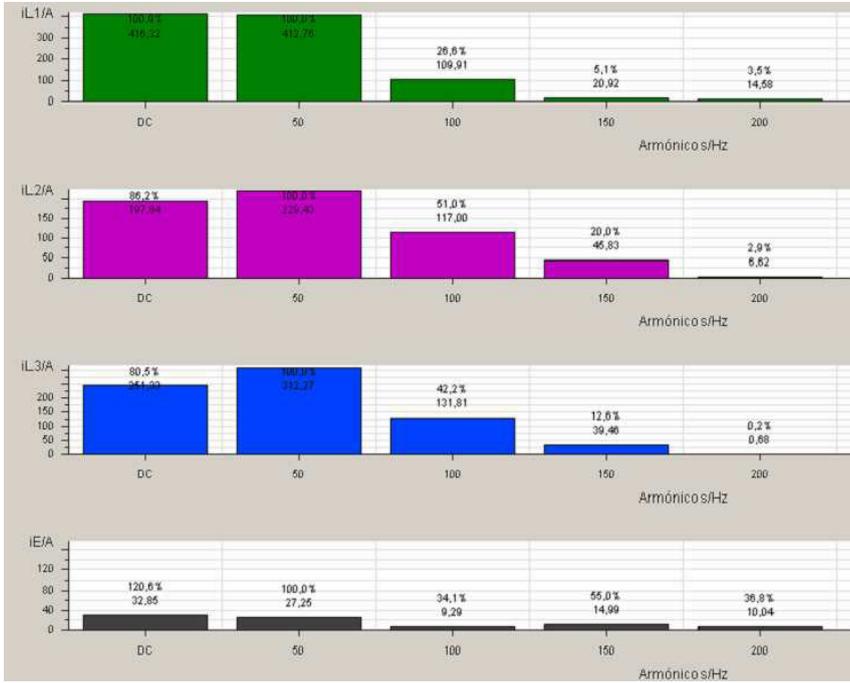


Figura 6.2: Análisis espectral para oscilograma de la fig. 6.1. Escalado vertical en valores primarios. Escalado horizontal en Hz.

Sabiendo que el mínimo tiempo tendrá lugar para la máxima corriente ( $3I_{0,máx}^{CF}$ ), se deduce, teniendo en cuenta (3.14), que

$$K \geq \left[ \left( \frac{3I_{0,máx}^{CF}}{I_{aj,51N}} \right)^\alpha - 1 \right] (t_0 + \Delta_{TRAN}) . \quad (6.9)$$

**Observación:** la mayor inmunidad ante tal fenómeno se obtiene migrando de la captación por suma secundaria a la captación por toroidal homopolar.

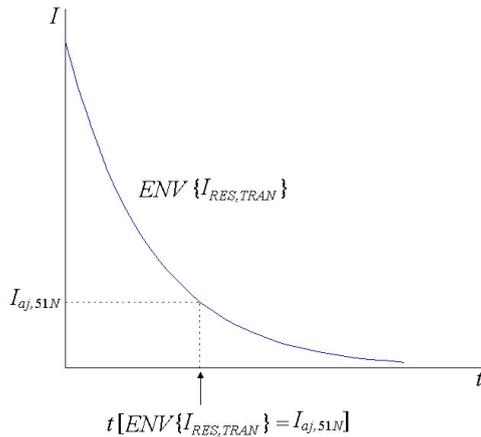


Figura 6.3: Trazado para la envolvente de la intensidad residual secundaria transitoria.

### Intensidades capacitivas, de circuitos vecinos, ante faltas a tierra

En escenario de falta a tierra en un circuito, los circuitos vecinos (conectados en idénticas barras) presentan una capacidad fase – tierra por unidad de longitud suficiente para provocar intensidades homopolares primarias, no despreciables (principalmente, si dichos circuitos son total o parcialmente subterráneos) a efectos de ajuste en la función 51N. Éstas son consecuencia de las tensiones homopolares provocadas por la falta a tierra; y, una vez desenergizada esta, desaparecen.

El desfase angular entre:

- intensidad homopolar del circuito en falta;
- intensidades homopolares de circuitos vecinos

viene determinado, principalmente, por la naturaleza de ( $Z_{pat}$ ).

Dependiendo de la misma, las intensidades homopolares de los circuitos vecinos pueden “añadir” o “restar” intensidad homopolar al circuito en falta, haciendo que el relé objeto de estudio detecte una magnitud ( $3I_0$ ) mayor o menor que la circulante por ( $Z_{pat}$ ), es decir, la circulante por el neutro “fuente”. De hecho:

- Si la impedancia de puesta a tierra es resistiva (o predominantemente resistiva), la función 51N capta una intensidad mayor que la circulante por ( $Z_{pat}$ ):

$$Z_{pat} = R \rightarrow 3I_{0,máx}^{CF} > 3I_{0,máx}^{Z_{pat}} . \quad (6.10)$$

Véase Apéndice A, epígrafe A.7.3, y observación anotada tras (A.21).

- Si la impedancia de puesta a tierra es mediante reactancia pura, la función 51N capta una intensidad menor que la circulante por ( $Z_{pat}$ ):

$$Z_{pat} = jX \rightarrow 3I_{0,máx}^{CF} < 3I_{0,máx}^{Z_{pat}} . \quad (6.11)$$

Véase Apéndice A, epígrafe A.7.2.

En ambos casos, la diferencia entre ( $3I_0^{CF}$ ) y ( $3I_0^{Z_{pat}}$ ) se concreta en una corriente capacitiva circulante por los ( $R - 1$ ) circuitos vecinos, ( $3 \sum_{i=2}^R I_0^{CV_i}$ ), que podría provocar actuaciones intempestivas de funciones 51N en alguno de dichos circuitos.

La función 51N debe garantizar inmunidad ante tal fenómeno, independientemente al circuito en falta y la situación de esta en el circuito. Al objeto de evitar actuaciones intempestivas en circuitos vecinos, para cualquier intensidad de falta, debe verificarse, en todos y cada uno de los circuitos:

$$t_{op,51N}^{CP} [3I_{0,CAP}^{CP}] \geq t_{op,51N}^{CF} [3I_0^{CF}] + \Delta t , \quad \forall (3I_0^{CF}) , \quad \forall (3I_{0,CAP}^{CP}) . \quad (6.12)$$

Ello implica, necesariamente, realizar un estudio sistemático de cortocircuitos fase – tierra en todos y cada uno de los circuitos conectados (o conectables) a idénticas barras, a lo largo de toda su longitud (p.e., al 10 %, 50 % y 90 %) y con diferentes resistencias de falta.

En la práctica, puede resultar aconsejable insensibilizar totalmente la función 51N a intensidades capacitivas de secuencia cero ante faltas fase – tierra en circuitos conectados a idénticas barras; para ello, bastará con verificar:

$$I_{aj,51N}^{CP} \geq 1,25 \cdot \{3I_{0,CAP}^{CP}\} \Big|_{FF,1\phi,BAR} , \quad (6.13)$$

siendo:

- $3I_{0,CAP}^{CP}$ : intensidad capacitiva de secuencia cero en circuito protegido;
- $FF, 1\phi, BAR$ : falta franca monofásica en barras donde conecte circuito.

En Apéndice A se justifica que la falta franca en barras es la que provoca mayor corriente capacitiva por un circuito vecino, sea cual sea la puesta a tierra del neutro; en efecto, las expresiones (A.9), (neutro aislado), (A.15) (neutro conectado a tierra mediante reactancia) y (A.20) (neutro conectado a tierra mediante impedancia predominantemente resistiva) de dicho documento presentan identidad en módulo. Trabajando en magnitudes físicas se deduce:

$$3 \left| I_0^{CV_i} \right| = 3 \left| V_0^{BAR} B_0^{CV_i} \right| \quad (6.14)$$

$$B_0^{CV_i} = 2\pi f C_0^{CV_i} .$$

Obviamente, (6.14) será máxima cuando  $(V_0^{BAR})$  lo sea. De la expresión (A.6), Apéndice A, se obtiene que  $(V_0^{BAR})$  será máxima para  $R_F = 0$ .

### 6.3.2. Elemento de protección no único en circuito

Además del criterio expuesto en el apartado 5.3.1, debe garantizarse selectividad con elementos de protección “aguas abajo” (fusibles, derivaciones con interruptor y protección, *reclosers*, clientes, PRE, etc.). En efecto: considérense los tramos  $(TP_1, TP_2, \dots, TP_n)$  equipados con elementos de protección  $(EP_1, EP_2, \dots, EP_n)$ .

Para el punto  $(P_i)$  eléctricamente más cercano al relé objeto de estudio, y perteneciente a un tramo cualquiera  $(TP_i)$ , debe garantizarse, en escenario de cortocircuito monofásico, coordinación entre función 51N objeto de análisis con elemento  $(EP_i)$ , es decir:

$$t_{cc,1\phi}^{P_i} = t_{op,EP_i}^{P_i} + \Delta t . \quad (6.15)$$

Si, adicionalmente, se desea garantizar la selectividad con elementos “aguas abajo” en escenario de faltas a tierra simultáneas (intensidades de neutro medidas por relés de protección de circuitos en falta superiores a la limitada por el régimen de neutro), será preciso equipar relé de protección objeto de análisis con función 51N,TD.

## 6.4. Comprobación final

En escenario de falta monofásica a tierra única, y para el intervalo

$$I_{aj,51N} \leq 3I_0 \leq 3I_{0,m\acute{a}x}^{CP},$$

verifíquese

$$t_{op,51F}^{CP} \geq t_{op,51N}^{CP} + \Delta t.$$

Normalmente, ello se da de forma natural; no obstante, conviene confirmarlo para evitar confusiones en la identificación del cortocircuito (monofásico o polifásico) durante la explotación.

## Capítulo 7

# Característica combinada 51N + 51N,TD

A semejanza de la combinación 51F + 51TD, la función 51N,TD amplía los dos únicos grados de libertad de la función 51N, permitiendo mayor coordinación con elementos de protección situados “aguas abajo”, y mayor inmunidad ante intensidades residuales transitorias, fruto de la magnetización.

### 7.1. Precaución general

La combinación 51N + 51N,TD presenta una gráfica genérica según fig. 7.1. Obsérvese que responde a una función continua (I/t), con característica de tiempo mínimo definido. En algunos relés de protección, ambas funciones (51N; 51N,TD) pueden estar en servicio y operar de forma independiente. En tal caso, puede presentarse el escenario descrito en fig. 7.1 ante faltas simultáneas a tierra (trazado discontinuo en rojo); en efecto, para intensidades tales que

$$3I_0^{CF} > 3I_{0,m\acute{a}x}^{CF} , \quad (7.1)$$

se cumple que

$$t_{op,51N} < t_{op,51N,TD} . \quad (7.2)$$

**Observación:** en el contexto del presente capítulo,  $(3I_{0,máx}^{CF})$  significa la máxima intensidad ( $3I_0$ ) circulante en el circuito objeto de estudio en escenario de falta monofásica a tierra en dicho circuito, y en ausencia de falta simultánea. Tal y como se analizó en el capítulo anterior, dependiendo de la naturaleza de ( $Z_{pat}$ ) y de las capacidades homopolares de los circuitos vecinos, puede darse

$$3I_{0,máx}^{CF} < 3I_{0,máx}^{Z_{pat}} \quad \text{ó} \quad 3I_{0,máx}^{CF} > 3I_{0,máx}^{Z_{pat}} .$$

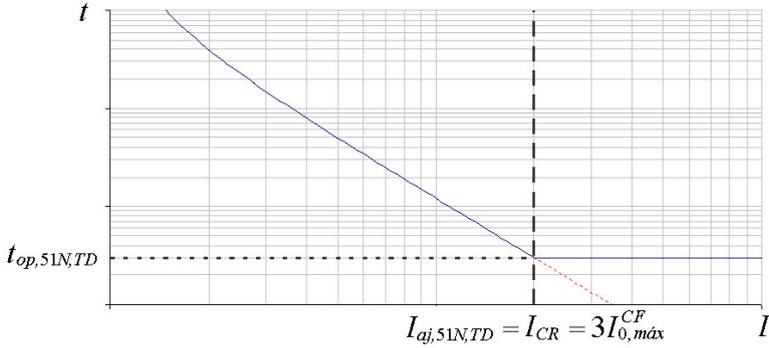


Figura 7.1: Característica combinada 51N + 51N,TD.

Si se desea evitar dicho comportamiento, bastará con inhibir función 51N para intensidades superiores al ajuste de función 51N,TD:

$$I_{INH,51N} = I_{aj,51N,TD} \quad (7.3)$$

## 7.2. Función 51N,TD

### 7.2.1. Intensidad de ajuste

Límite superior

$$I_{aj,51N,TD} = 3I_{0,máx}^{CF} . \quad (7.4)$$

### Límite inferior

Suponiendo ya escogido el tiempo de operación ( $t_{op,51N,TD}$ ) para la función 51N,TD (mediante estudio de coordinación con elementos “aguas abajo”), y asumiendo conocido el tiempo máximo para las intensidades secundarias residuales de error, provocadas por intensidades transitorias de conexión, se plantean dos escenarios:

- $t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\} \leq 0,75 \cdot (t_{op,51N,TD})$ ; límite inferior independiente a intensidades transitorias de conexión;
- $t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\} \geq 0,75 \cdot (t_{op,51N,TD})$ ; el límite inferior debe satisfacer:

$$I_{aj,51N,TD} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{I_{RES,TRAN}\} . \quad (7.5)$$

**Observación:** no cabe aquí establecer un “margen práctico” para el límite inferior de ajuste (tal y como sí se realizó en la función 51TD). La máxima intensidad de falta a tierra, en los escenarios aquí analizados, presenta un valor notablemente moderado. Adicionalmente, la función 51N,TD suele requerir captación por suma de intensidades secundarias, debido a la moderada intensidad nominal primaria asociada al T/I homopolar, al objeto de no recibir magnitudes saturadas de este último. De presentar dificultades la determinación del valor máx  $\{I_{RES,TRAN}\}$ , se recomienda evaluar su máxima duración  $t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\}$  e inmunizar la función 51N,TD por ajuste temporal.

#### 7.2.2. Tiempo de operación

Si el ajuste de intensidad verifica (7.5) bastará con:

$$t_{op,51N,TD} \geq t_{op,EP_i}^{I_{cc,1\phi}^{P_i}} + \Delta t . \quad (7.6)$$

De no ser así, o de ignorarse máx  $\{I_{RES,TRAN}\}$ :

$$t_{op,51N,TD} \geq \text{máx} \left[ t_{op,EP_i}^{I_{cc,1\phi}^{P_i} + \Delta t} ; t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\} + \Delta t_{TRAN} \right] . \quad (7.7)$$

### 7.3. Función 51N: punto de paso en característica combinada

$$t_{op,51N}^{I_{aj,51N,TD}} \geq t_{op,51N,TD} . \quad (7.8)$$

### 7.4. Comprobación final

En escenario de falta monofásica a tierra única, y para el intervalo

$$I_{aj,51N} \leq 3I_0 \leq 3I_{0,máx}^{CP} ,$$

verifíquese:

$$t_{op,51F+51F,TD}^{CP} \geq t_{op,51N+51N,TD}^{CP} + \Delta t . \quad (7.9)$$

**Observación:** se deben comparar ambas características combinadas (fases frente a neutro). Normalmente, ello se da de forma natural; no obstante, conviene confirmarlo para evitar confusiones en la identificación del cortocircuito (monofásico o polifásico) durante la explotación.

## Capítulo 8

# Función 67N, redes a neutro aislado

Supone la mejor detección y eliminación posibles de faltas monofásicas a tierra en dichas redes. Requiere captación de ( $3I_0$ ) mediante T/I homopolar, dada la mayor sensibilidad ofrecida por este ante las débiles intensidades que tienen lugar en dicho escenario.

En fig. 8.1 se asumen intensidades ( $3I_0$ ), tanto por circuito en falta como en circuitos vecinos, “salientes” de barras. Merced al análisis detallado en Apéndice A (epígrafe A.7.1) surge la fig. 8.2.

### 8.1. Tipo de curva

A tiempo definido<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>El relé de retaguardia (sobretensión homopolar de barras MT) debe operar, asimismo, a tiempo definido. Dicho relé, en escenario de actuación, desconecta el (los) transformador(es) conectado(s) a dichas barras.

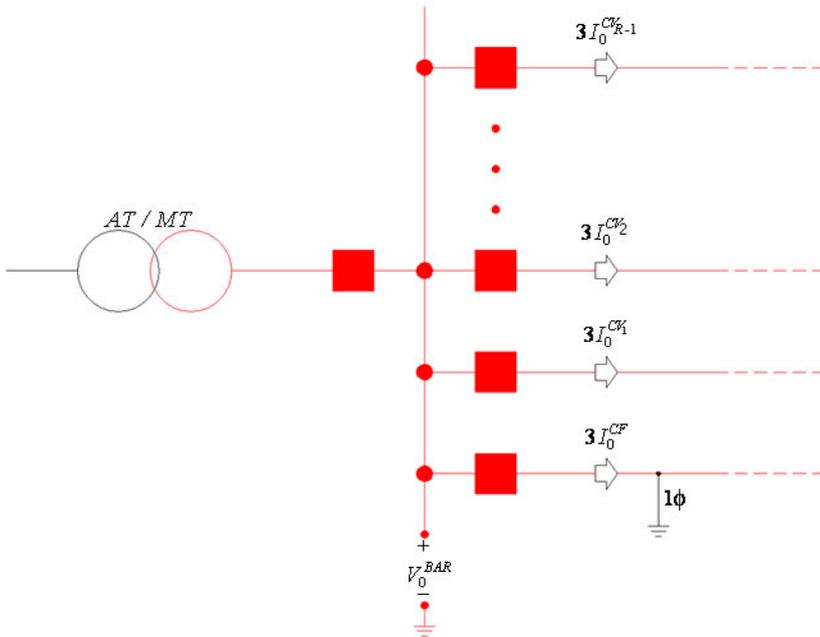


Figura 8.1: Falta monofásica a tierra en circuito MT, régimen de neutro aislado: intensidades de secuencia cero en los circuitos.

## 8.2. Ajustes

### 8.2.1. Intensidad y tensión homopolares

#### Límite superior

Impuesto por los valores mínimos en escenario de falta monofásica:

- Mínima intensidad homopolar: con un único circuito vecino ( $CV_i$ ), precisamente el que menos intensidad homopolar capacitiva aporte, conectado en idénticas barras<sup>2</sup>;
- Mínima tensión homopolar: con todos los circuitos vecinos (escenario

<sup>2</sup>Véase expresión (A.10) del Apéndice A. Es inmediato que la intensidad mínima se conseguirá con solo un circuito vecino. De no existir circuito vecino ( $I_0^{CF}$ ) será nula, y deberá actuar el relé de retaguardia (sobretensión homopolar a tiempo definido).

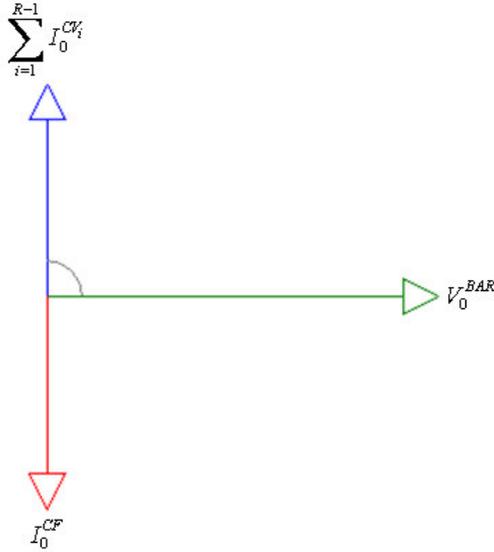


Figura 8.2: Diagrama fasorial, magnitudes homopolares, neutro aislado.

más desfavorable) conectados en idénticas barras<sup>3</sup>;

- Defecto en el punto del circuito eléctricamente más alejado de la cabecera<sup>4</sup>;
- Con cierta resistencia de falta ( $R_F$ ), tal que  $R_F \leq 20 \Omega$ <sup>5</sup>:

$$I_{aj,67N} < \min \left\{ 3I_0^{CV_i} \right\} \Big|_{R_F, CF \leq 20 \Omega} ; \quad (8.1)$$

$$V_{aj,67N} < \min \left\{ 3V_0^{BAR} \right\} \Big|_{R_F, CF \leq 20 \Omega} . \quad (8.2)$$

<sup>3</sup>Véase expresión (A.6) del Apéndice A. Se observa que la mínima tensión homopolar se obtendrá con el número máximo de circuitos vecinos y resistencia de falta no nula.

<sup>4</sup>Para ello, debe utilizarse la expresión (A.4) del Apéndice A, sustituyendo en la misma las impedancias de secuencia por las expresiones (A.1), (A.2) y (A.3) del mismo apéndice.

<sup>5</sup>Véase Nomenclatura.

**Límite inferior**

Impuesto por los valores máximos en ausencia de falta monofásica:

- Con máxima carga en circuito protegido, y máxima intensidad homopolar: todos los circuitos vecinos conectados en idénticas barras;
- Máxima tensión homopolar: con un único circuito vecino ( $CV_i$ ), precisamente el de menos capacidad, conectado en idénticas barras:

$$I_{aj,67N} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{3I_0^{CP}\} \Big|_{R_F, CP \rightarrow \infty} ; \quad (8.3)$$

$$V_{aj,67N} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{3V_0^{BAR}\} \Big|_{R_F, CP \rightarrow \infty} . \quad (8.4)$$

**8.2.2. Angulares**

Dadas las posiciones angulares relativas (fig. 8.2) entre intensidades y tensiones de secuencia homopolar, en escenario de falta monofásica a tierra en neutro aislado:

$$\theta < \varphi [V_0^{BAR}] - \varphi [I_0^{CF}] < (\pi - \theta) ; 0 < \theta < \frac{\pi}{4} . \quad (8.5)$$

Por ejemplo, para  $\theta = \frac{\pi}{4}$ , el lugar geométrico angular resulta según fig. 8.3.

**8.2.3. Temporales****Límite superior**

Tratándose de una función a tiempo definido, que opera incluso ante intensidades de falta muy reducidas<sup>6</sup> respecto al poder de corte en interruptores, puede establecerse<sup>7</sup>:

$$t_{op,67N} < 1 \text{ s} \quad (8.6)$$

---

<sup>6</sup>En redes con pocos circuitos vecinos, aéreos y de corta longitud la corriente de defecto puede llegar a ser de pocos mA.

<sup>7</sup>El valor de  $t_{op,67N}$  presenta un máximo suficiente para garantizar eliminación rápida (evitando defectos simultáneos por sobretensión) y selectividad.

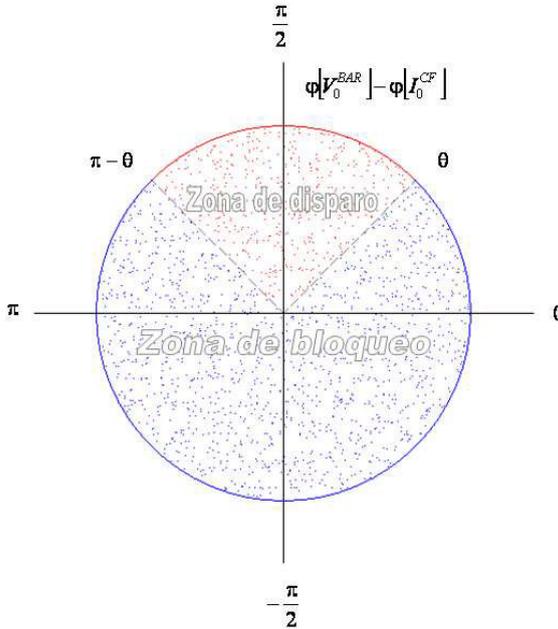


Figura 8.3: Lugares geométricos de disparo y bloqueo, función 67N en neutro aislado.

### Límite inferior

Si el circuito protegido comprende otros elementos de protección (siempre serán “aguas abajo”), deberá garantizar selectividad con todos y cada uno de ellos; en particular, con el de mayor ajuste. Dado el orden de magnitud en intensidades de falta monofásica a tierra, no deberán contemplarse los fusibles. Así, en el caso particular de  $M$  relés de protección:

$$t_{op,67N} = \text{máx} \left\{ t_{op,67N}^{RP_1}, t_{op,67N}^{RP_2}, \dots, t_{op,67N}^{RP_M} \right\} + \Delta t_{NA} . \quad (8.7)$$



# Capítulo 9

## Faltas a tierra muy resistivas

En el presente documento pueden definirse como aquellas que verifican

$$3I_0^{CF} < I_{aj,51N} ,$$

o bien aquellas que, superando ajuste, presentan intensidad ( $3I_0$ ) con valor eficaz estocástico (incluyendo “pasos por cero”, que reinician el temporizado de la función protectora), tal que no llegan a verificar la ecuación de disparo.

### 9.1. Dos escenarios concretos

En un artículo publicado en IEEE [11] se analizan dos escenarios (fig. 9.1, según original) en redes MT que pueden dar lugar a defectos muy resistivos a tierra:

- Conductor caído en tensión, con una longitud de contacto de varios metros<sup>1</sup>;
- Apoyo en defecto, si este es metálico o metálicamente reforzado.

---

<sup>1</sup>Si el conductor caído presenta una longitud inferior de contacto, la intensidad de falta resulta aleatoria; incluso, el valor eficaz puede pasar por “cero” debido a los efectos de la misma, por calentamiento de la superficie del terreno y la consecuente variación dinámica en la resistencia de contacto.

En escenario de conductor caído, se evalúa la tensión de paso; en escenario de apoyo en defecto, se evalúa la tensión de contacto; para ambos casos, en proximidad de personal.

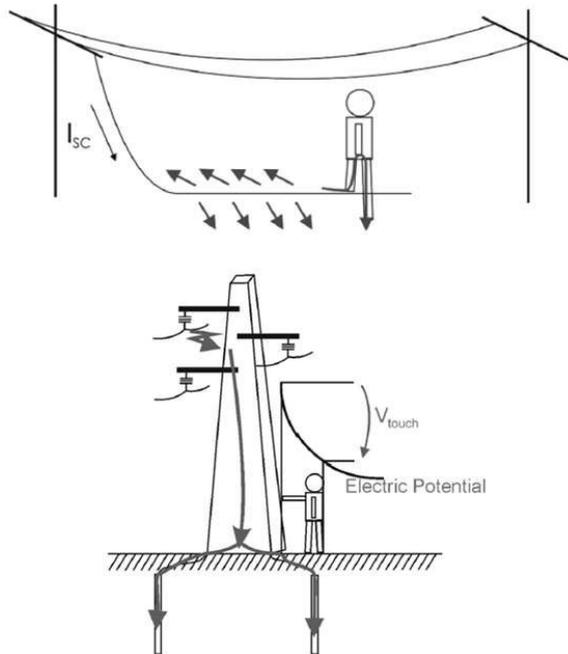


Figura 9.1: Escenarios. Superior: tensión de paso y conductor caído; inferior: tensión de contacto y apoyo en falta [11].

Como postulado de partida, se asume que el contacto directo de una persona con un conductor activo MT, supuesto este libre de falta, conlleva la electrocución en un lapso temporal comprendido entre 5 y 40 ms; y que el sistema protectorio no puede prevenir las consecuencias de dicho fenómeno.

El artículo contempla un modelo biofísico del cuerpo humano, así como un vector de variables aleatorias tales como resistividad del suelo, resistencia del calzado, etc., y las diversas prácticas de puesta a tierra del neutro en instalaciones. El análisis de riesgo realizado arroja la Tabla I, donde se diferencian escenarios, intensidades y porcentajes de riesgo.

Tabla I. Corriente mínima de falta a tierra con riesgo de muerte [11]

Riesgo	0,5%	2,5%	5%	25%
Pisar conductor caído	5 A	9 A	16 A	40 A
Tocar apoyo de hormigón en falta	4 A	7 A	11 A	70 A

**Observación:** los valores de intensidad que aparecen en la tabla refieren a ( $3I_0$ ) captada en cabecera circuito.

Asimismo, el artículo presenta una gráfica (fig. 9.2, según original) que relaciona porcentaje de riesgo frente a intensidad (supuesta esta permanente) y tiempo de fibrilación cardíaca, en escenarios de contacto humano con un apoyo en falta.

**Observación:** el eje de ordenadas en fig. 9.2 refiere al tiempo de contacto humano con el apoyo; no debe confundirse con el tiempo de duración de la falta.

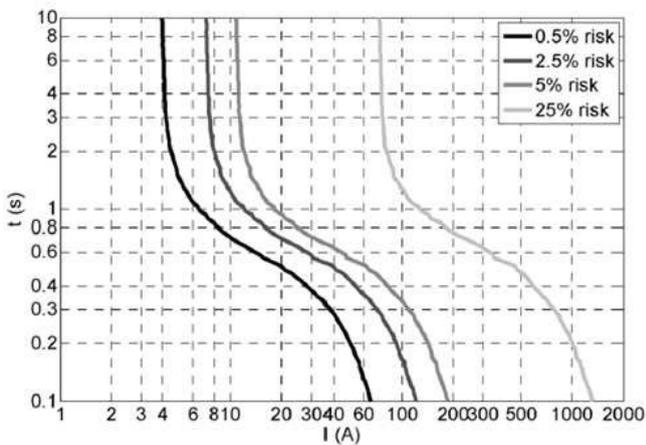


Figura 9.2: Tiempo de fibrilación cardíaca frente a porcentaje de riesgo e intensidad. Escenario de contacto con apoyo en falta [11].

## 9.2. Técnicas

Actualmente, la detección de faltas muy resistivas a tierra presenta dos tendencias cuyo fundamento común es la captación de  $(3I_0)$  por T/I toroidal homopolar:

- Funciones de sobreintensidad clásicas (direccionales y no direccionales);
- Funciones algorítmicas [12] (basadas en patrones típicos de formas de onda para faltas de este tipo, con valor eficaz estocástico, también denominadas *Arcing faults*).

## 9.3. Limitaciones

En opinión del PSRC Working Group D15 [13]: “*Limitations on Detection:*” ... “*No matter what method is used, not all HIFs<sup>2</sup> are detectable*” ... “*Practically, it is impossible to detect 100 % of HIFs AND achieve a high degree of security against false outputs.*”

Constituyen situaciones que no garantizan captación / eliminación del defecto:

- Faltas de intensidad no permanente (*arcing faults*). La intensidad  $(3I_0)$  presenta un valor eficaz con perfil estocástico [12] (incluyendo “pasos por cero”) que no satisface la ecuación de disparo del dispositivo. Incluso, en el caso de un conductor caído, la variación dinámica en la resistencia superficial del terreno puede disminuir la intensidad de falta, pasando a ser esta indetectable.
- Faltas “inversas”. Por ejemplo, conductor caído lado carga. En tal caso (asúmase en fig. 9.1 carga situada a la izquierda del dibujo y “fuente” a la derecha), la intensidad  $(3I_0)$  queda acotada a 1/3 de la intensidad de carga circulante [11], con anterioridad a la falta, en el tramo en falta (que puede ser una derivación). La detección y eliminación del defecto queda supeditada a:
  - Intensidad de carga prefalta, en el tramo en falta, superior a ajuste  $(3I_0)$  del dispositivo;

---

<sup>2</sup>HIFs: Acronimia inglesa asociada a faltas de alta impedancia: High Impedance Faults

- Intensidad ( $3I_0$ ) no estocástica (es decir, no del tipo *arcing fault*), para satisfacer ecuación de disparo en dispositivos basados en funciones clásicas de sobreintensidad.

Constituyen actuaciones en ausencia de falta a tierra resistiva:

- Conexión MT entre dos SS.EE., con neutro MT conectado a tierra en ambas (fig. 9.3). Si el circuito que las une presenta una impedancia no homogénea en las tres fases, se establece circulación de ( $3I_0$ ), la cual desaparece cuando desconecta uno de los dos extremos del circuito, aunque el otro permanezca conectado.

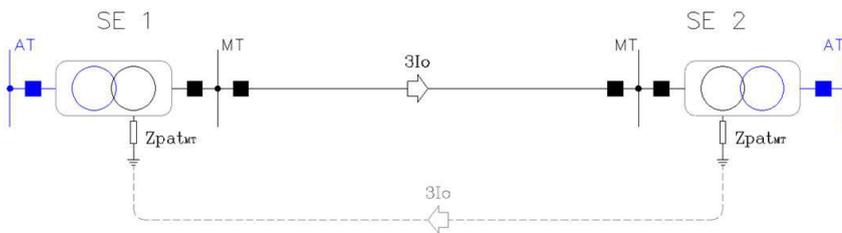


Figura 9.3: Intensidad de secuencia homopolar circulante entre dos subestaciones conectadas por circuito MT. Ambas presentan neutro MT conectado a tierra mediante impedancia. El circuito que las une presenta una impedancia no homogénea en las tres fases.

- Desequilibrios serie (véase, en Apéndice B, cálculo de intensidad homopolar capacitiva circulante en tales escenarios). El caso más típico lo constituye un puente roto en una fase, sin contacto alguno, ya sea en circuito principal o en derivación de este. Obsérvese que, aunque no es una falta paralelo (se trata de una falta serie), resulta interesante detectarla. La detección debe realizarse sin desconectar interruptor de cabecera del circuito, puesto que el servicio se mantiene inalterado en parte de la carga asociada a este; máxime, si el desequilibrio serie tiene lugar en una derivación.
- Faltas a tierra en algún circuito vecino (véase, en Apéndice A, cálculo de intensidad homopolar capacitiva circulante por los circuitos “sanos” frente a impedancia de puesta a tierra en tal escenario). De (6.14) se deduce que, para un circuito protegido (CP), la intensidad

capacitiva viene dada, en módulo, por

$$3 |I_{0,CAP}^{CP}| = 3 |V_0^{BAR} 2\pi f C_0^{CP}| .$$

Cabe esperar, en escenario de múltiples circuitos vecinos, que el circuito en falta dispare antes que aquéllos, siempre y cuando el interruptor asociado no demore la apertura, y el margen entre ajustes sea correcto.

## 9.4. Aplicación

### 9.4.1. Redes a neutro aislado

En [11] no se mencionan dichas redes. En su lugar, se comenta la aplicación en redes con neutro puesto a tierra de forma resonante (bobina Petersen), cuyos circuitos equipan, al igual que en la redes a neutro aislado, funciones direccionales para faltas a tierra (67N). Los reducidos valores de ( $3I_0$ ) ante faltas a tierra (incluso francas) que se dan en régimen de neutro aislado conllevan ajustes de intensidad, para las funciones 67N, típicamente inferiores a 5 A primarios en líneas aéreas. Si la falta no presenta perfil estocástico, cabe esperar una eliminación inferior a 1 s, según criterios expuestos en el capítulo 8.

### 9.4.2. Redes con neutro puesto a tierra mediante impedancia

Teniendo en cuenta las incertidumbres expuestas en (9.3), se plantean las dicotomías siguientes:

- Funciones de sobreintensidad clásicas (direccionales o no direccionales) frente a funciones algorítmicas;
- Elementos con actuación sobre interruptor (disparo) frente a elementos exclusivamente con señalización hacia Centro de Control;
- Reconexión automática, tras actuación del elemento, frente a disparo definitivo con recorrido inmediato del circuito disparado;
- Características de operación intensidad / tiempo ceñidas a fig. 9.2 para cualquier valor de intensidad frente a características ceñidas solamente para un margen de intensidades;

- Aplicación en circuitos cortos frente a aplicación en circuitos largos: en los primeros, la probabilidad de conductor caído y de apoyo en falta resulta inferior a la que pueda darse en los segundos; en los segundos, los desequilibrios y la probabilidad de puente roto es superior a los primeros.

Con independencia a la alternativa decidida en el resto de las dicotomías, si en la primera de ellas se opta por utilizar funciones de sobreintensidad clásicas para detección de faltas a tierra resistivas, resultan aconsejables cuatro prácticas concretas:

- Captar, en el circuito, ( $3I_0$ ) mediante T/I toroidal homopolar;
- Utilizar captación de ( $3I_0$ ) en impedancia de puesta a tierra del neutro del transformador “fuente”, como condición permisiva para operación (señalización y/o disparo). Con ello se evitan actuaciones intempestivas, ante el escenario concreto de paralelo entre circuitos subsidiarios del mismo transformador, y desequilibrios de impedancia en los conductores (fig. 9.4);
- Si la impedancia de puesta a tierra es resistiva (o predominantemente resistiva), utilizar funciones de sobreintensidad direccional (67N). Con ello se identifica el circuito en falta, inmunizándose a los circuitos vecinos ante intensidades capacitivas homopolares (véase Apéndice A).

Una vez decididas las alternativas en el resto de dicotomías, conviene realizar un seguimiento sistemático de las faltas a tierra en circuitos MT:

- Análisis oscilográfico (patrones en formas de onda) y distribución estadística (media, varianza, histogramas) para ( $3I_0$ );
- Actuaciones en escenario de conductor caído;
- Actuaciones en escenario de apoyo en falta;
- Actuaciones en escenarios de paralelo MT entre dos SS.EE.;
- Actuaciones en escenarios de desequilibrios serie;
- Actuaciones ante faltas a tierra en algún circuito vecino;
- Actuaciones ignoradas (en ausencia de avería alguna);

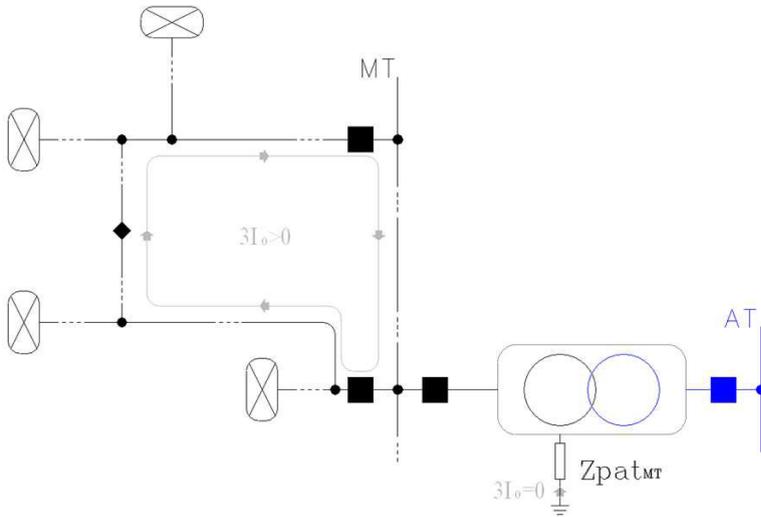


Figura 9.4: Circulación de  $(3I_0)$  en circuitos conectados en paralelo por desequilibrios de impedancia en conductores, con ausencia de  $(3I_0)$  en impedancia puesta a tierra neutro MT transformador “fuente”.

- Omisiones de actuación en escenario de conductor caído;
- Omisiones de actuación en escenario de apoyo en falta;

al objeto de establecer un conocimiento más profundo de tal fenómeno, así como su correlación respecto al resto de variables implicadas:

- Tecnologías / principios en relés de protección;
- Longitud de los circuitos;
- Tipos de circuitos protegidos y tipo de circuitos vecinos (aéreo, subterráneo, mixto);
- Impedancias limitadoras (reactancia, resistencia) puesta a tierra neutro MT;
- Impedancias de secuencia en los circuitos;

- Trazado de los circuitos: derivaciones, longitud, resistencia del terreno;
- Tipologías de los diferentes apoyos;
- Actuación selectiva / no selectiva con elementos de protección ubicados “aguas abajo” (relés de protección, *reclosers*, fusibles).

## 9.5. Otras consideraciones

El nivel de incertidumbre supera cualquier postulado concluyente. Resulta obligatorio abandonar en este punto el estilo científico por el que ha discurrido este escrito y sus anexos hasta el momento, y tomar durante algunas líneas un derrotero literario diferente.

Al igual que en cuestiones de tráfico (educación vial), el conjunto de la sociedad debe ser plenamente consciente de lo que se debe y no se debe hacer en aras a preservar la vida y/o la salud. Salvo personal “del gremio”, y tomando siempre las precauciones adecuadas, nadie debe pisar (ni tocar) un conductor caído ni tocar un apoyo eléctrico; de la misma forma que, salvo personal “del gremio”, y tomando siempre las precauciones adecuadas, nadie debe cruzar un trazado ferroviario. ¿Acaso circulan los ferrocarriles a velocidades tales que puedan detenerse en menos de, por ejemplo, 20 metros? Cabe recordar que, a excepción de la Alta Velocidad, los trazados ferroviarios no presentan cercados laterales.

Si no se pisa (o no se toca) un conductor caído, y si tampoco se toca un apoyo, el riesgo calculado en [11] es siempre nulo. Y las incertidumbres de [12], también.

Finalmente, las actuaciones de adecuación y mantenimiento realizadas en redes MT redundan en minimizar riesgos:

- El refuerzo de los conductores disminuye las impedancias de secuencia, favoreciendo la captación;
- La puesta a tierra eficiente de los apoyos disminuye la resistencia de defecto, favoreciendo la captación;
- La realización de puentes mediante conductores, herramientas y útiles adecuados evita la ruptura de éstos;
- El amarre adecuado de los conductores en los apoyos evita la caída de éstos;

- La tala / poda en las proximidades de los circuitos aéreos evita contacto de los conductores activos con la vegetación; ello, a su vez, evita la aparición de faltas a tierra esporádicas (p.e., en presencia de viento) y/o resistivas (contacto permanente);
- El acertamiento de los circuitos disminuye la impedancia y capacidad fase - tierra de éstos. Y, consecuentemente, las intensidades de desequilibrio en ausencia de falta;
- El mantenimiento y limpieza en CC.DD. (centros de distribución) minimiza las faltas que puedan darse en su interior;
- Etcétera.

# Capítulo 10

## Prontuario

### 10.1. Transductores de intensidad (TT/I)

#### 10.1.1. TT/I de fases

- Funciones sobreintensidad fases:

$$I_{P,nom} \geq 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP} ;$$

$$I_{P,cc,máx}^{NO SAT} \geq I_{cc,3\phi,máx}^{BAR} .$$

- Funciones sobreintensidad homopolar:

$$I_{P,nom} \leq 0,5 \cdot (3I_{0,máx}^{CF}) .$$

#### 10.1.2. T/I toroidal homopolar

$$(3I_{0,máx,carga}^{CP}) \leq I_{P,nom} \leq 0,5 \cdot (3I_{0,máx}^{CF}) ;$$

$$I_{P,cc,máx}^{NO SAT} \geq 3I_{0,máx}^{CF} .$$

### 10.2. Función 51F

#### 10.2.1. Tipo de curva

- Más adecuada para característica térmica conductores: extremadamente inversa (EI);

- Más recomendable: el mismo tipo que la empleada en resto elementos de protección, tanto “aguas abajo” como “aguas arriba”.

### 10.2.2. Intensidad de ajuste

- Límite superior

$$I_{aj,51F} \leq \min \left\{ 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP}; 1,2 \cdot I_{P,nom}; 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right]; I_{cc,2\phi,mín} \right\} .$$

- Observación 1: si se cumple

$$\min \left\{ 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP}; 1,2 \cdot I_{P,nom}; 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right]; I_{cc,2\phi,mín} \right\} = 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP}$$

entonces

$$I_{aj,51F} = 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP} .$$

- Observación 2. Si se cumple

$$\min \left\{ 1,2 \cdot I_{máx,carga}^{CP}; 1,2 \cdot I_{P,nom}; 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right]; I_{cc,2\phi,mín} \right\} = 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right] ,$$

entonces

$$I_{aj,51F} = 1,2 \cdot \min \left[ I_{máx,carga}^{T_1}, I_{máx,carga}^{T_2}, \dots, I_{máx,carga}^{T_N} \right] .$$

- Límite inferior:

$$I_{aj,51F} \geq \max \left\{ (1,3, \dots, 1,4) \cdot \max \left[ I_{FUSIÓN}^{F_1}, \dots, I_{FUSIÓN}^{F_K} \right]; 1,2 \cdot \max \left[ I_{aj,51F}^{RP_1}, \dots, I_{aj,51F}^{RP_M} \right] \right\} .$$

- Observación: caso de no existir relé de protección (RP<sub>i</sub>) alguno “aguas abajo” en el circuito protegido:

$$I_{aj,51F} \geq (1,3, \dots, 1,4) \cdot \max \left[ I_{FUSIÓN}^{F_1}, I_{FUSIÓN}^{F_2}, \dots, I_{FUSIÓN}^{F_K} \right] .$$

### 10.2.3. Punto de paso

- Elemento de protección único en circuito
  - Presencia función 50F:

$$\Delta t \leq t_{op,51F}^{T_i} < t_{lím,I_{cc,3\phi,máx}}^{T_i} ;$$

- Ausencia función 50F:

$$t_{op,51F}^{I_i^{cc,3\phi,máx}} < t_{lím,I_{cc,3\phi,máx}}^{I_i^{T_i}} ;$$

- Elemento de protección no único en circuito

- Límite superior:

$$t_{op,51F}^{I_i^{TP_i,3\phi,máx}} < t_{lím,I_{cc,3\phi,máx}}^{TP_i} ;$$

- Límite inferior:

$$t_{op,51F}^{I_i^{TP_i,3\phi,máx}} \geq t_{op,EP_i}^{TP_i} + \Delta t .$$

## 10.3. Función 50F

### 10.3.1. Intensidad de ajuste

- Elemento de protección único en circuito

- Límite superior:

$$I_{aj,50F} \leq 0,8 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR} ;$$

- Límite inferior:

$$I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot \max \{ I_{TRAN} \} .$$

De ignorarse  $\max \{ I_{TRAN} \}$  puede resultar útil establecer un margen para el límite inferior ( $LI_{50F}$ ):

$$5 \cdot I_{aj,51F} \leq LI_{50F} < 8 \cdot I_{aj,51F}$$

- Elemento de protección no único en circuito

- Límite superior:

$$I_{aj,50F} \leq 0,8 \cdot I_{cc,2\phi}^{BAR} ;$$

- Límite inferior:

$$I_{aj,50F} \geq 1,25 \cdot \max \left\{ \max [ I_{TRAN} ] ; I_{cc,3\phi}^{P_i} \right\} ;$$

## 10.4. Característica combinada 51F + 51TD

### 10.4.1. Inhibición elemento 51

$$I_{INH,51} = I_{aj,51TD} .$$

### 10.4.2. Intensidad de ajuste, 51TD

- Límite superior:

$$I_{aj,51TD} \leq \alpha \cdot I_{cc,2\phi,BAR} \quad ; \quad \alpha < 0,8 ;$$

- Límite inferior:

- Si  $t_{m\acute{a}x} \{I_{TRAN}\} \geq 0,75 (t_{op,51TD})$  , entonces

$$I_{aj,51TD} \geq 1,25 \cdot m\acute{a}x \{I_{TRAN}\} .$$

- De ignorarse  $m\acute{a}x \{I_{TRAN}\}$ , puede resultar útil establecer un margen para el límite inferior ( $LI_{51,TD}$ ):

$$5 \cdot I_{aj,51F} \leq LI_{51,TD} < 8 \cdot I_{aj,51F} .$$

### 10.4.3. Tiempo de operación 51TD

- Límite superior:

$$t_{aj,51TD} \leq t_{op,51F}^{I_{aj,51TD}} ;$$

- Límite inferior:

$$t_{op,51TD}^{I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}} \geq t_{op,EP_i}^{I_{cc,3\phi,m\acute{a}x}} + \Delta t .$$

### 10.4.4. Coherencia en característica combinada 51+51F,TD

$$t_{op,51F}^{I_{aj,51TD}} \geq t_{aj,51TD} .$$

## 10.5. Función 51N

De aplicación exclusiva en redes con neutro conectado a tierra, bien de forma rígida (directa), bien mediante impedancia.

### 10.5.1. Tipo de curva

El mismo tipo que la empleada en resto elementos de protección, tanto “aguas abajo” como “aguas arriba”.

### 10.5.2. Intensidad de ajuste

- Límite superior:

$$I_{aj,51N} < 3I_{0,mín}^{CF} ;$$

- Límite inferior:

$$I_{aj,51N} \geq$$

$$\max\left\{1,25 \cdot [3I_{0,máx,carga}] ; (1,3,\dots,1,4) \cdot \max\left[I_{FUSIÓN}^{F1}, \dots, I_{FUSIÓN}^{FK}\right] ; 1,2 \cdot \max\left[I_{aj,51N}^{RP1}, \dots, I_{aj,51N}^{RPM}\right]\right\} .$$

**Observación:** caso de no existir relé de protección ( $RP_i$ ) alguno “aguas abajo” del circuito protegido:

$$I_{aj,51N} \geq \max\left\{1,25 \cdot [3I_{0,máx,carga}] ; (1,3,\dots,1,4) \cdot \max\left[I_{FUSIÓN}^{F1}, \dots, I_{FUSIÓN}^{FK}\right]\right\} .$$

### 10.5.3. Punto de paso

- Elemento de protección único en circuito

- Medida de ( $3I_0$ ) por suma secundaria TT/I fases:

$$t_{op,51N}^{\forall I} \geq t[ENV\{I_{RES,TRAN}\} = I_{aj,51N}] + \Delta t_{TRAN} ;$$

- Intensidades capacitivas ante falta en circuitos vecinos:

$$t_{op,51N}^{CP} [3I_{0,CAP}^{CP}] \geq t_{op,51N}^{CF} [3I_0^{CF}] + \Delta t ,$$

o bien considérese un límite inferior adicional para ajuste de intensidad:

$$I_{aj,51N}^{CP} \geq 1,25 \cdot \{3I_{0,CAP}^{CP}\}_{FF,1\phi,BAR} ;$$

- Elemento de protección no único en circuito

$$t_{op,51N}^{I_{cc,1\phi}^{Pi}} = t_{op,EP_i}^{I_{cc,1\phi}^{Pi}} + \Delta t .$$

## 10.6. Característica combinada 51N + 51N,TD

### 10.6.1. Inhibición elemento 51N

$$I_{INH,51N} = I_{aj,51N,TD} .$$

### 10.6.2. Intensidad de ajuste

- Límite superior:

$$I_{aj,51N,TD} = 3I_{0,máx}^{CF} ;$$

- Límite inferior: si se verifica  $t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\} \geq 0,75 \cdot t_{op,51N,TD}$ , entonces

$$I_{aj,51N,TD} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{I_{RES,TRAN}\} .$$

### 10.6.3. Tiempo de operación

- Si  $I_{aj,51N,TD} \geq 1,25 \cdot \text{máx} \{I_{RES,TRAN}\}$ , entonces

$$t_{op,51N,TD} \geq t_{op,EP_i}^{I_{cc,1\phi}^{P_i}} + \Delta t .$$

- De no ser así, o ignorarse  $\text{máx} \{I_{RES,TRAN}\}$ :

$$t_{op,51N,TD} \geq \text{máx} \left[ t_{op,EP_i}^{I_{cc,1\phi}^{P_i}} + \Delta t ; t_{máx} \{I_{RES,TRAN}\} + \Delta t_{TRAN} \right] .$$

### 10.6.4. Coherencia en característica combinada 51N+51N,TD

$$t_{op,51N}^{I_{aj,51N,TD}} \geq t_{aj,51N,TD} .$$

## 10.7. Función 67N (redes con neutro aislado)

### 10.7.1. Tipo de curva

- A tiempo definido.

### 10.7.2. Ajustes intensidad y tensión homopolares

- Límites superiores

$$I_{aj,67N} < \min \left\{ 3I_0^{CV_i} \right\} \Big|_{R_F, CF \leq 20 \Omega}$$

$$V_{aj,67N} < \min \left\{ 3V_0^{BAR} \right\} \Big|_{R_F, CF \leq 20 \Omega} ;$$

- Límites inferiores

$$I_{aj,67N} \geq 1,25 \max \left\{ 3I_0^{CP} \right\} \Big|_{R_F, CP \rightarrow \infty}$$

$$V_{aj,67N} \geq 1,25 \max \left\{ 3V_0^{BAR} \right\} \Big|_{R_F, CP \rightarrow \infty} .$$

### 10.7.3. Ajustes angulares

$$\theta < \varphi [V_0^{BAR}] - \varphi [I_0^{CF}] < (\pi - \theta) ; 0 < \theta < \frac{\pi}{4} .$$

### 10.7.4. Ajustes temporales

- Límite superior:

$$t_{op,67N} < 1 \text{ s} ;$$

- Límite inferior

- Elemento de protección no único en el circuito:

$$t_{op,67N} = \max \left\{ t_{op,67N}^{RP_1}, t_{op,67N}^{RP_2}, \dots, t_{op,67N}^{RP_M} \right\} + \Delta t_{NA} .$$



# Bibliografía

- [1] IEEE Std. C37.230: “IEEE Guide for Protective Relay Applications for Distribution Lines”, 2007 (no incluye relés direccionales).
- [2] J.A. Momoh, *Electric Power Distribution, Automation, Protection, and Control*. CRC Press, 2008.
- [3] J.M. Gers, E.J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*. IEE, 1998.
- [4] J. L. Blackburn, *Protective Relaying. Principles and Applications*. Marcel Dekker, 1987.
- [5] W.A. Elmore et al., *Protective Relaying Theory and Applications*. ABB, 1994.
- [6] A.A. Sallam, O.P. Malik, *Electric Distribution Systems*. IEEE Wiley, 2010.
- [7] UNE-EN 60044 - 1: 1999: “Transformadores de medida. Parte 1: transformadores de intensidad”.
- [8] P.M. Anderson, *Power System Protection*. IEEE Press, 1999.
- [9] A. Iriondo, *Protecciones de Sistemas de Potencia*. UPV, 1997.
- [10] R. Capella, “Protecciones eléctricas en media tensión”, Schneider, 2003.

- [11] J. L. Pinto de Sá, M. Louro, “On human life risk - assessment and sensitive ground fault protection in MV distribution networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, n° 4, oct. 2010.
- [12] C. L. Benner, B. Don Russell, “Practical high - impedance fault detection on distribution feeders”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, n° 3, mayo / junio 1997.
- [13] PSRC Working Group D15, “High Impedance Fault Detection Technology”, IEEE, 1996.

# Nomenclatura

Se definen a continuación variables, símbolos y acronimias utilizados a lo largo del documento.

## General

- AT: rango de tensiones que verifica:

$$45 \text{ kV} \leq U_{nom} \leq 220 \text{ kV} ;$$

- MT: rango de tensiones que verifica:

$$10 \text{ kV} \leq U_{nom} < 45 \text{ kV} ;$$

- SE: subestación. Instalación eléctrica con transformación AT/MT;
- SM: subestación MT. Instalación eléctrica con transformación MT/MT;
- CR: centro de reparto. Instalación eléctrica MT expansora, con (n) circuitos alimentadores y (m) circuitos alimentados, tal que  $m > n$ ;
- CD: centro de distribución. Instalación eléctrica con transformación MT/BT;
- PRE: productor de régimen especial;
- $Z_{pat}$ : impedancia de puesta a tierra, sistema MT;
- TT/I: transformadores de intensidad;
- T/I: transformador de intensidad.

## Magnitudes

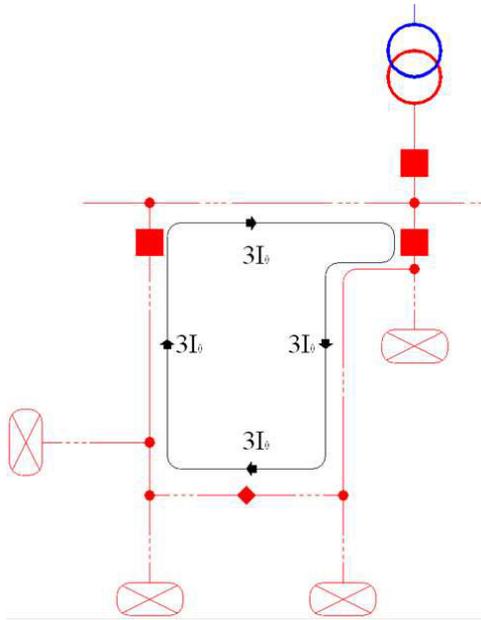
De no indicarse lo contrario, las magnitudes de intensidad y tensión refieren a valores primarios eficaces.

- $I$ : intensidad, en general;
- $I_F$ : intensidad de fase;
- $I_A$ : intensidad de fase (A);
- $I_B$ : intensidad de fase (B);
- $I_C$ : intensidad de fase (C);
- $I_1$ : intensidad de secuencia positiva o directa, por fase;
- $I_2$ : intensidad de secuencia negativa o inversa, por fase;
- $I_0$ : intensidad de secuencia cero u homopolar, por fase;
- $3I_0 = I_A + I_B + I_C$ : intensidad medida por funciones 51N, 67N, etc. incorporadas en relés de protección. También denominada “intensidad de neutro” o “intensidad residual”.
- $I_{P,nom}$ : intensidad nominal primaria asociada a T/I o TT/I;
- $I_{P,cc,máx}^{NO SAT}$ : intensidad primaria máxima de cortocircuito, asociada a T/I o TT/I, sin saturación en circuitos secundarios;
- $I_{máx,carga}^{<ELEM>}$ : intensidad máxima de carga (admisible en permanencia) asociada a  $\langle ELEM \rangle$  (elemento). De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $t_{lim,I}^{<ELEM>}$ : tiempo límite (según característica térmica) que el elemento  $\langle ELEM \rangle$  soporta para una intensidad genérica ( $I$ ), asumiendo  $(I > I_{máx,carga}^{<ELEM>})$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $I_{TRAN}$ : intensidad transitoria que aparece al conectar un circuito MT, producida por intensidades magnetizantes de fase en transformaciones MT/BT conectadas a dicho circuito. Presenta contenido armónico y componente asimétrica;
- $I_{A,TRAN}$ : intensidad transitoria, fase (A);
- $I_{B,TRAN}$ : intensidad transitoria, fase (B);
- $I_{C,TRAN}$ : intensidad transitoria, fase (C);

- $I_{A,TRAN,SEC}$ : intensidad secundaria transitoria, fase (A);
- $I_{B,TRAN,SEC}$ : intensidad secundaria transitoria, fase (B);
- $I_{C,TRAN,SEC}$ : intensidad secundaria transitoria, fase (C);
- $I_{RES,TRAN,SEC}$ : intensidad residual obtenida por suma secundaria de intensidades de fase transitorias;
- $I_{RES,TRAN}$ : equivalente, en valores primarios, de  $I_{RES,TRAN,SEC}$ ;
- $máx\{I_{TRAN}\}$ : valor máximo registrado (entre las tres fases) para el valor eficaz de la intensidad transitoria;
- $máx\{I_{RES,TRAN}\}$ : valor máximo registrado para el valor eficaz de  $I_{RES,TRAN}$ ;
- $ENV\{I_{RES,TRAN}\}$ : función que contiene la variación temporal asociada al valor eficaz de  $I_{RES,TRAN}$ ;
- $t[ENV\{I_{RES,TRAN}\} = I_{aj,51N}]$ : tiempo que transcurre, desde la conexión del circuito, hasta que  $ENV\{I_{RES,TRAN}\}$  iguala, en su trayectoria decreciente, el ajuste del elemento 51N considerado;
- $t_{máx}\{I_{TRAN}\}$ : duración máxima registrada en intensidad transitoria;
- $I_{cc,3\phi,máx}^{<PUNTO>}$ : intensidad máxima de cortocircuito trifásico asociada a un punto <PUNTO> determinado de la red considerada. De no especificarse <PUNTO>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{cc,2\phi,máx}^{<PUNTO>}$ : intensidad máxima de cortocircuito bifásico puro asociada a un punto <PUNTO> determinado de la red considerada. De no especificarse <PUNTO>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{cc,2\phi,min}^{<ELEM>}$ : intensidad mínima de cortocircuito bifásico puro circulante por un elemento <ELEM>. De no especificarse <ELEM>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{cc,1\phi,máx}^{<PUNTO>}$ : intensidad máxima de cortocircuito monofásico (fase – tierra) asociada a un <PUNTO> determinado de la red considerada. De no especificarse <PUNTO>, este vendrá definido por contexto;

- $I_{cc,1\phi,min}^{<ELEM>}$ : intensidad mínima de cortocircuito monofásico (fase – tierra) circulante por un elemento  $\langle ELEM \rangle$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $3I_{0,máx}^{Z_{pat}}$ : valor máximo de  $(3I_0)$  que circula por  $Z_{pat}$  ante un defecto monofásico;
- $3I_{0,máx}^{CF}$ : valor máximo de  $(3I_0)$  que circula por la cabecera del circuito en falta CF ante un defecto monofásico. La diferencia con  $(3I_{0,máx}^{Z_{pat}})$  viene dada por la intensidad  $(3 \sum_{i=1}^{R-1} I_{0,CAP}^{CV_i})$ , de naturaleza capacitiva, circulante en los  $(R - 1)$  circuitos vecinos  $CV_i$ . Se asume que conectan un total de  $(R)$  circuitos en idéntico embarrado;
- $3I_{0,min}^{CF}$ : valor mínimo de  $(3I_0)$  que circula por la cabecera del circuito en falta ante un defecto monofásico, supuesto este en el punto eléctricamente más alejado de cabecera y con una resistencia de falta  $R_F = 20 \Omega$ . Se toma el valor de  $(R_F)$ , como primera referencia, de los requisitos para la red de transporte;
- $3I_{0,máx,carga}^{<ELEM>}$ : valor máximo de  $(3I_0)$  en ausencia de falta a tierra en  $\langle ELEM \rangle$  (circuito protegido CP, circuito en falta CF, o circuito vecino CV). Producido por asimetrías del circuito MT (disposición de conductores, diferencias de impedancias por fase...), contactos defectuosos (seccionadores, puentes en circuitos aéreos...), paralelos momentáneos entre circuitos en carga conectados a idénticas barras MT (véase figura más abajo), así como errores de medida en TT/I, si la intensidad  $(3I_0)$  no se capta por toroidal (intensidad residual secundaria);
- $I_0^{<ELEM>}$ : intensidad homopolar asociada a un elemento  $\langle ELEM \rangle$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $\varphi [I_0^{<ELEM>}]$ : ángulo asociado a intensidad homopolar de un elemento  $\langle ELEM \rangle$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $V_0^{<ELEM>}$ : tensión homopolar asociada a un elemento  $\langle ELEM \rangle$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;
- $\varphi [V_0^{<ELEM>}]$ : ángulo asociado a tensión homopolar de un elemento  $\langle ELEM \rangle$ . De no especificarse  $\langle ELEM \rangle$ , este vendrá definido por contexto;

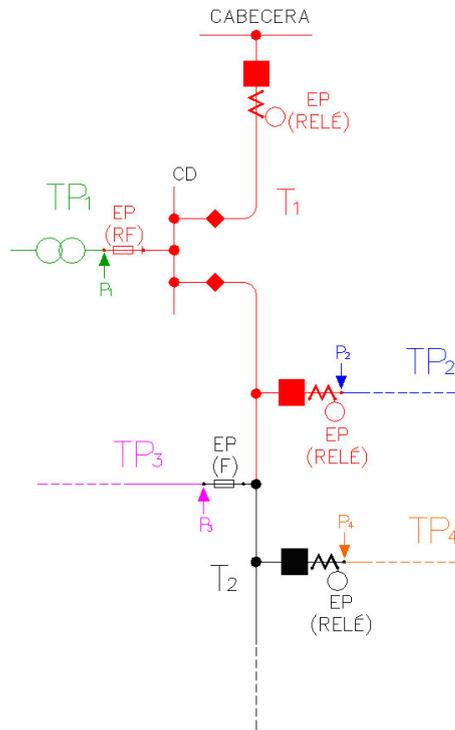
- $R_{F,<ELEM>}$ : resistencia de falta en un elemento  $<ELEM>$ . De no especificarse  $<ELEM>$ , este vendrá definido por contexto;
- $3I_{0,CAP}^{<ELEM>}$ : triple de intensidad homopolar capacitiva asociada a un elemento  $<ELEM>$ . De no especificarse  $<ELEM>$ , este vendrá definido por contexto;
- $C_0^{<ELEM>}$ : capacidad de secuencia homopolar asociada a un elemento  $<ELEM>$ . De no especificarse  $<ELEM>$ , este vendrá definido por contexto.



*Intensidad homopolar circulante en porción mallada red MT, supuestamente en ausencia de defecto, y en escenario de paralelo entre circuitos subsidiarios de idéntica transformación.*

## Elementos

- BAR: barras cabecera de circuito MT considerado;
- CP: circuito protegido;
- CF: circuito en falta;
- T: tramo de conductor, perteneciente a una derivación o al circuito principal, ubicado “aguas abajo” de relé objeto de estudio y protegido por este;
- TP: tramo o derivación del circuito principal, protegido por un elemento diferente al relé objeto de estudio, y ubicado “aguas abajo” de este;
- $P_i$ : punto, del tramo  $TP_i$ , eléctricamente más próximo al elemento de protección de dicho tramo (véase figura más abajo);
- EP: elemento de protección (fusibles, ruptofusibles y relés);
- F: fusible;
- RF: ruptofusible;
- RP: relé de protección;
- CV: circuito vecino: conectado a idénticas barras que el considerado en contexto.



*Tramos (T) y (TP), puntos (P) y elementos de protección (EP). Tramos diferenciados por coloración.*

## Funciones de protección

- 51F (ó 51): sobreintensidad de fases, curva;
- 51F,TD (ó 51TD): sobreintensidad de fases, tiempo definido;
- 51N: sobreintensidad de neutro, curva;
- 51N,TD: sobreintensidad de neutro, tiempo definido;
- 50F (ó 50): sobreintensidad instantánea de fases;
- 67N: sobreintensidad direccional de neutro;

- $I_{aj}$ : intensidad de ajuste (valor de arranque) en una función de protección, referida a valores primarios;
- $I_{op}$ : intensidad medida por relé, referida a valores primarios, susceptible de provocar actuación en este;
- $t_{op, <FUNCIÓN>}^I$ : tiempo teórico de disparo (según característica I/t) asociado a una función de protección <FUNCIÓN> ante una intensidad genérica ( $I$ ). De no especificarse <FUNCIÓN>, esta vendrá definida por contexto;
- $I_{aj, 51F}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 51F, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{aj, 50F}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 50F, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{aj, 51TD}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 51TD, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $t_{op, 51TD}^{<RP>}$ : tiempo de operación, función 51TD, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{aj, 51N}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 51N, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{aj, 51N, TD}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 51N,TD, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $t_{op, 51N, TD}^{<RP>}$ : tiempo de operación, función 51N,TD, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{CR}$ : intensidad de cruce entre función de curva (51, 51N) y tiempo definido (51TD, 51N,TD);
- $I_{INH, <FUNCIÓN>}$ : intensidad de inhibición (por encima de la cual no opera) asociada a una función de protección <FUNCIÓN>. De no especificarse <FUNCIÓN>, esta vendrá definida por contexto;
- $I_{aj, 67N}^{<RP>}$ : intensidad de ajuste, función 67N, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;

- $t_{op,67N}^{<RP>}$ : tiempo de operación, función 67N, actuando en tiempo definido, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $V_{aj,67N}^{<RP>}$ : tensión de ajuste, función 67N, relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{0,mín}^{<RP>}$ : equivalente, en magnitudes primarias, de sensibilidad mínima para ( $I_0$ ), relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $V_{0,mín}^{<RP>}$ : equivalente, en magnitudes primarias, de sensibilidad mínima para ( $V_0$ ), relé de protección <RP>. De no especificarse <RP>, este vendrá definido por contexto;
- $I_{nom,<FUNCIÓN>}^{<RP>}$ : equivalente, en magnitudes primarias, de la intensidad nominal del relé de protección <RP>, función <FUNCIÓN>. De no especificarse <RP> o <FUNCIÓN>, el contexto será portador de definición / definiciones;
- $I_{FUSIÓN}^{<F;RF>}$ : intensidad, por encima de la cual, un fusible <F> o ruptofusible <RF> presenta característica (I/t) de fusión. De no especificarse <F>; <RF>, este vendrá definido por contexto;
- $\Delta t$ : margen de coordinación (diferencia de tiempos de operación) entre dos elementos de protección (EP), tal que garantiza la selectividad. En redes MT se recomienda<sup>1</sup>[1, 2, 3, 4, 5, 6]:

$$0,2 \text{ s} \leq \Delta t \leq 0,35 \text{ s} ;$$

- $\Delta t_{TRAN}$ : tiempo adicional para garantizar inmunidad ante intensidades transitorias:

$$0,1 \text{ s} \leq \Delta t_{TRAN} \leq 0,2 \text{ s} ;$$

- $\Delta t_{NA}$ : margen de coordinación entre dos elementos de protección (EP), redes a neutro aislado, ante faltas a tierra, tal que garantiza la selectividad:

$$\Delta t_{NA} \leq 0,3 \text{ s} ;$$

---

<sup>1</sup>En [1] se aconseja  $\Delta t = 0,35 \text{ s}$ ; en [2] y [3],  $\Delta t = 0,3 \text{ s}$ ; y en [4] y [5],  $0,2 \text{ s} \leq \Delta t \leq 0,5 \text{ s}$ . En [5] se indica que  $0,3 \text{ s}$  es lo más común. En [6] se indica que típicamente varía entre  $0,25$  y  $0,4$  para relés electromagnéticos y/o estáticos, y  $0,2 \text{ s}$  para relés digitales.

## Varios

- *FF, 1 $\phi$ , BAR*: falta monofásica, franca a tierra, en barras;

# Apéndice A

## Faltas monofásicas a tierra, red MT

### Relaciones angulares entre algunas magnitudes de secuencia (0)

#### A.1. Escenario

Véase fig. A.1:

- Transformación (TR) AT/MT, dos devanados;
- Puesta a tierra neutro MT:
  - Neutro aislado:  $Z_{pat} \rightarrow \infty$ , conmutador en posición indiferente;
  - Mediante resistencia conectada a neutro físico transformador (devanado MT conectado en estrella): conmutador en posición (1);
  - Mediante neutro artificial (devanado MT conectado en triángulo): conmutador en posición (2). Requiere compensador de neutro (bobina en zigzag);
    - Impedancia puramente inductiva:  $Z_{pat} = jX_{pat}$  ;
    - Impedancia mixta:  $Z_{pat} = R_{pat} + jX_{pat}$  .
- ( $R$ ) circuitos MT conectados en barras;

- Un circuito MT ( $C_F$ ) con falta monofásica a tierra, resistencia genérica de falta ( $R_F$ ) ;
- ( $R - 1$ ) circuitos MT vecinos, sin falta  $\{CV_1, CV_2 \cdots CV_{R-1}\}$  ;

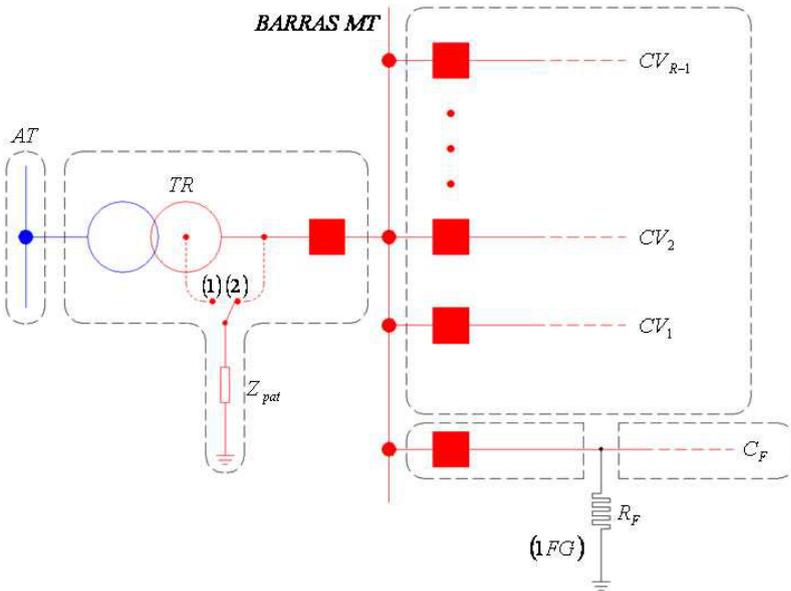


Figura A.1: Esquema unifilar, escenario.

## A.2. Dipolos y cuadripolos equivalentes

**Consideración inicial:** se asume una potencia base, ( $S_b$ ), idéntica para todos los cálculos de magnitudes unitarias.

### A.2.1. Red AT

Véase fig. A.2: consiste en dipolos, equivalentes Thévenin, red AT, hasta conexión de esta en barras AT. Izquierda, secuencia (1); centro, secuencia (2); derecha, secuencia (0).

- $u_{1,AT}$ : tensión unitaria en barras AT, secuencia (1), previa al cortocircuito:

$$u_{1,AT} = \frac{U_{1,AT}}{|U_{AT}|}.$$

Se supondrá  $U_{1,AT} = U_{AT}$ .

- $z_{1,AT}$ : impedancia Thévenin unitaria en barras AT, secuencia (1), en ausencia de conexión adicional alguna en barras AT (transformaciones hacia MT, cargas, etc.);
- $z_{2,AT}$ : impedancia Thévenin unitaria en barras AT, secuencia (2), en ausencia de conexión adicional alguna en barras AT (transformaciones hacia MT, cargas, etc.). De no existir máquinas rotativas cercanas, puede aproximarse:

$$z_{2,AT} \cong z_{1,AT} ;$$

- $z_{0,AT}$ : impedancia Thévenin unitaria en barras AT, secuencia (0), en ausencia de conexión adicional alguna en barras AT (transformaciones hacia MT, cargas, etc.).

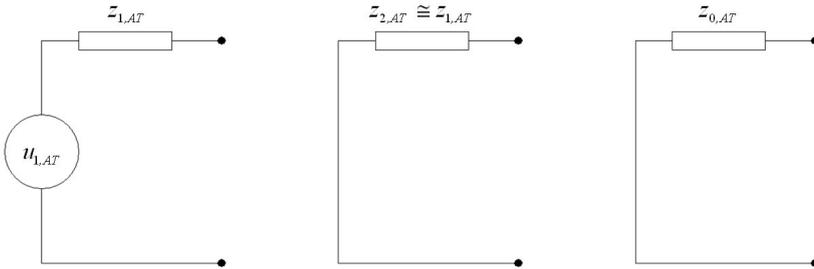


Figura A.2: Dipolos equivalentes, magnitudes unitarias, red AT, hasta conexión a barras AT. De izquierda a derecha, secuencias (1), (2) y (0).

### A.2.1.1. Determinación / cálculo impedancias de secuencia

#### A.2.1.1.1. Mediante simulación computacional

- Salvo red AT, desconectar totalidad de elementos (transformaciones hacia MT, cargas, etc.) en barras AT;

- Calcular intensidad de cortocircuito trifásica y monofásica a tierra, ambas con impedancia(s) de falta nula(s);
- Si el simulador ofrece impedancias Thévenin equivalentes en el cortocircuito, anótense valores de  $(z_{1,AT})$  y  $(z_{0,AT})$ .  
**Observación:** siendo valores unitarios, deberá utilizarse la potencia base ( $S_b$ ) en la que opere el simulador para el resto de los cálculos no computacionales.

A.2.1.1.2. A partir de intensidades de cortocircuito (franco) monofásico y trifásico en barras AT

Normalmente, vendrán dadas en magnitudes físicas, y solo en módulo:

$$|I_{cc,1\phi}^{BAR AT}| ; |I_{cc,3\phi}^{BAR AT}| .$$

Se asumirá que ambas impedancias son de naturaleza predominantemente inductiva, es decir

$$z_{1,AT} \cong jx_{1,AT} ; z_{0,AT} \cong jx_{0,AT} .$$

La aproximación que relaciona  $(z_{1,AT})$  con  $|I_{cc,3\phi}^{BAR AT}|$  viene dada por:

$$z_{1,AT} \cong \frac{j}{i_{cc,3\phi}^{BAR AT}} = j \frac{S_b}{\sqrt{3}U_{AT}I_{cc,3\phi}^{BAR AT}} .$$

Una vez determinada  $(z_{1,AT})$ , la impedancia de secuencia (0) en barras AT viene aproximada por

$$z_{0,AT} \cong j \frac{S_b}{\sqrt{3}U_{AT}} \left[ \frac{3}{|I_{cc,1\phi}^{BAR AT}|} - \frac{2}{|I_{cc,3\phi}^{BAR AT}|} \right] .$$

## A.2.2. Transformador

### A.2.2.1. Secuencia (1)

Véase fig. A.3: cuadripolo equivalente unitario y simplificado del transformador. Se omiten efectos magnetizantes y se asume posición en conmutador de tomas bajo carga tal que

$$\left| \frac{u_{1,MT}}{u_{1,AT}} \right| = 1 ;$$

- Desfase angular entre devanados: subcuadripolo con operador ( $e^{j\varphi}$ ), tal que
  - $i_{1,MT} = i_{1,AT}e^{j\varphi}$  ;
  - En ausencia de carga ( $i_{1,MT} = i_{1,AT} = 0$ ),  $u_{1,MT} = u_{1,AT}e^{j\varphi}$  .
- La impedancia unitaria ( $z_T$ ) asociada al transformador resulta del ensayo en cortocircuito de este:

$$z_T = r_T + jx_T = (u_{R_{cc}} + ju_{X_{cc}}) \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom,TR}} \right) ,$$

siendo:

- $u_{R_{cc}}$ : parte real (componente resistiva) tensión de cortocircuito, expresada en tanto por uno (t.p.u.) respecto a tensión nominal del transformador ( $U_{AT}$ );
- $u_{X_{cc}}$ : parte imaginaria (componente inductiva) tensión de cortocircuito, expresada en tanto por uno respecto a tensión nominal del transformador.

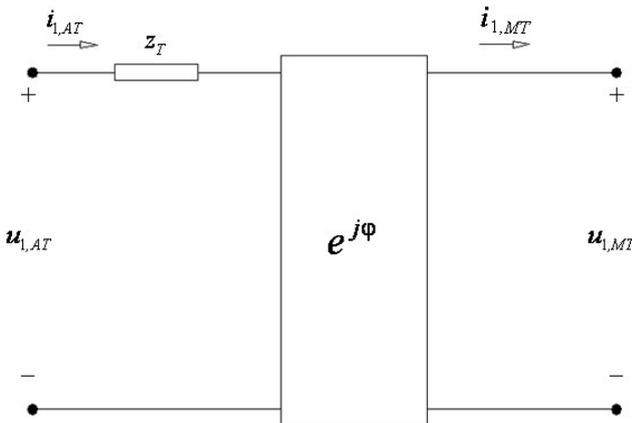


Figura A.3: Cuadripolo equivalente, magnitudes unitarias, transformador, secuencia 1.

**A.2.2.2. Secuencia (2)**

Véase fig. A.4. Salvo por signo de función exponencial compleja, idéntico a cuádrupolo en secuencia (1).

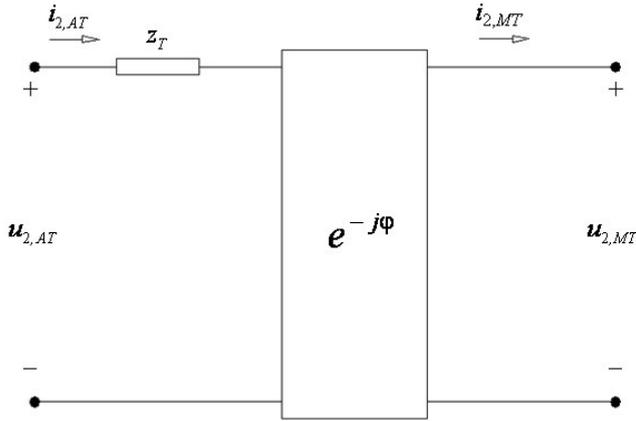


Figura A.4: Cuádrupolo equivalente, magnitudes unitarias, transformador, secuencia (2).

**A.2.2.3. Simplificaciones adicionales, secuencias (1) y (2)**

Teniendo en cuenta que, normalmente

$$|u_{R_{cc}}| \ll |u_{X_{cc}}| ,$$

puede realizarse la aproximación

$$z_T \cong jx_T = j |u_{cc}| \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom,TR}} \right) .$$

Por lo que a los cuádrupolos desfasadores respecta, puede obviarse su utilización, si en los cálculos a realizar los ángulos relativos entre magnitudes AT y MT no resultan relevantes. Así surge un cuádrupolo todavía más simplificado (fig. A.5).

**A.2.2.4. Secuencia (0), incluyendo impedancia de puesta a tierra en MT**

Dependiendo del grupo de conexión en MT:

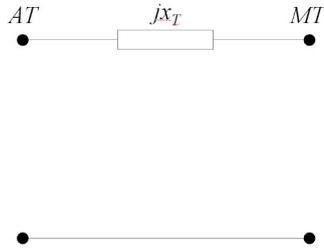


Figura A.5: Cuadripolo equivalente más simplificado, magnitudes unitarias, transformador, secuencias (1) y (2).

- Estrella (fig. A.6);
- Triángulo (fig. A.7),

admite dos cuadripolos equivalentes diferenciados. Asimismo, el régimen de neutro en AT (conectado rígidamente a tierra o aislado) requiere reflejo en sendos cuadripolos (conmutador con dos posiciones).

Analizando fig. A.6 e identificando elementos:

- Conmutador: en posición (1), neutro AT conectado rígidamente a tierra; en posición (2), neutro AT aislado de tierra<sup>1</sup>;
- $z_{0,T}$ : impedancia unitaria, secuencia cero, transformador. Atendiendo a su tipo de núcleo:
  - Banco de tres transformadores monofásicos, transformador trifásico con núcleo de cuatro o cinco columnas, transformador con núcleo acorazado:

- Con el conmutador en posición (1):

$$z_{0,T} = z_T ;$$

- Con el conmutador en posición (2) la admitancia de secuencia homopolar del transformador tiende a cero:

$$y_{0,T} \rightarrow 0 ;$$

---

<sup>1</sup>O conectado a tierra mediante pararrayos, en el bien entendido que este se encuentra descebado.

- Transformador trifásico, núcleo de tres columnas:  
 $z_{0,T} = \alpha \cdot z_T$ ,  $0, 8 \leq \alpha \leq 1$  (neutro AT conectado a tierra)  
 $z_{0,T} = \beta \cdot z_T$ ,  $8 \leq \beta \leq 10$  (neutro AT aislado de tierra).

- $z_{0,pat}$ : impedancia unitaria representativa de la impedancia de puesta a tierra:

$$z_{0,pat} = Z_{0,pat} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2} = 3Z_{pat} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2}.$$

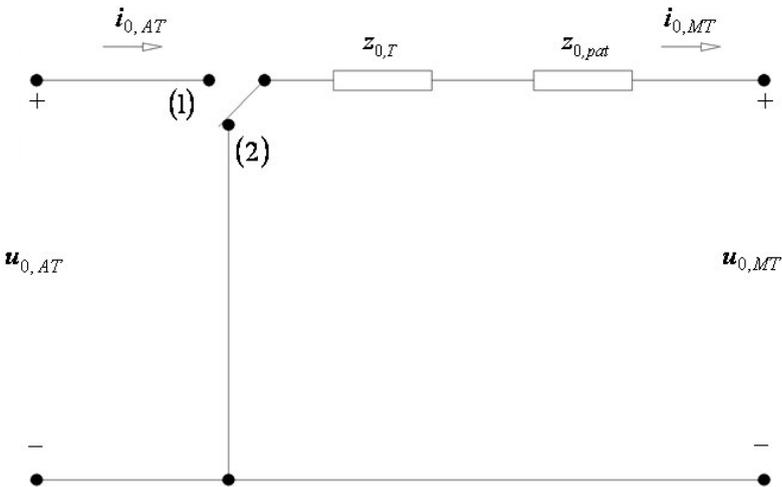


Figura A.6: Cuadripolo equivalente, magnitudes unitarias, transformador, secuencia (0). Devanado MT en estrella, neutro MT conectado a tierra mediante impedancia  $z_{0,pat}$ .

Analizando fig. A.7 e identificando elementos:

- Conmutador: en posición (1), neutro AT conectado rígidamente a tierra; en posición (2), neutro AT aislado de tierra.

**Observación:** para el cálculo de intensidades y tensiones en MT, su influencia es nula.

- $z_{0,T}$ : impedancia unitaria, secuencia cero, transformador. Si bien no influye para el cálculo de intensidades y tensiones MT, las pautas de cálculo son idénticas al caso descrito en fig. A.6.

- $z_{0,pat}$ : impedancia unitaria representativa del neutro artificial:

$$z_{0,pat} = Z_{0,pat} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2} = 3Z_{pat} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2} .$$

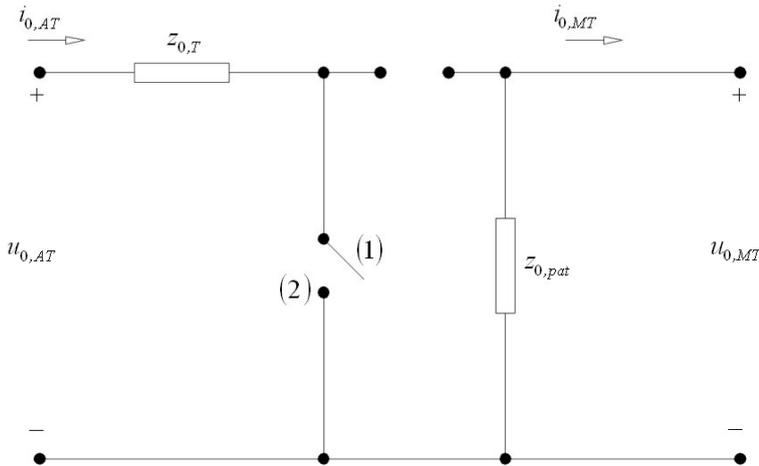


Figura A.7: Cuadripolo equivalente, magnitudes unitarias, transformador, secuencia (0). Devanado MT en triángulo. El neutro MT artificial queda representado por la impedancia  $z_{0,pat}$ .

### A.2.2.5. Simplificaciones adicionales, secuencia (0)

Para obtener un modelo único, independientemente a las particularidades del transformador, convienen ciertas consideraciones:

- En régimen de neutro MT aislado ( $z_{0,pat} \rightarrow \infty$ ), el cuadripolo / dipolo de secuencia (0) en el transformador es un circuito abierto (admitancia nula) a efectos de MT;
- En régimen de neutro MT conectado a tierra mediante impedancia, devanado MT en estrella:
  - Con el conmutador en posición (1), la impedancia de entrada, lado MT, en el cuadripolo resulta

$$z_0 = z_{0,pat} + z_{0,T} .$$

Si se diera la relación (conviene verificarla):

$$z_{0,pat} \gg z_{0,T} ,$$

la impedancia de entrada, lado MT, en el cuadripolo podría aproximarse por:

$$z_0 \cong z_{0,pat} ;$$

- Con el conmutador en posición (2) se evalúa un dipolo, cuya impedancia de entrada, lado MT, viene dada por:

$$z_0 = z_{0,pat} + z_{0,T} .$$

Análogamente al escenario de conmutador en posición (1), de verificarse:

$$z_{0,pat} \gg z_{0,T} ,$$

la impedancia de entrada, lado MT, en el cuadripolo, podría aproximarse por:

$$z_0 \cong z_{0,pat} ;$$

- En régimen de neutro MT conectado a tierra mediante impedancia, devanado MT en triángulo (neutro artificial), e independientemente a la posición del conmutador, la impedancia de entrada, lado MT, en el dipolo, viene dada por:

$$z_0 = z_{0,pat} .$$

Teniendo en cuenta lo expuesto, surge un dipolo / cuadripolo único (fig. A.8) basado en la impedancia de puesta a tierra, neutro MT (con independencia de su naturaleza) y un conmutador. Según la posición de este (1 ó 2), el circuito equivalente es un dipolo o un cuadripolo.

La posición (2) del conmutador implica:

- Devanado MT en estrella;
- Neutro AT conectado rígidamente a tierra.

Para el resto de los casos, conmutador en posición (1).

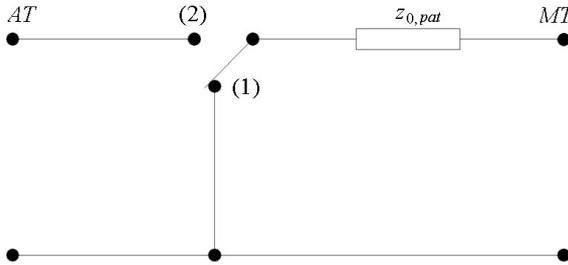


Figura A.8: Dipolo / cuadripolo equivalente más simplificado, magnitudes unitarias, transformador, secuencia (0). Conmutador en posición (2): neutro AT conectado a tierra y devanado MT en estrella con neutro conectado a tierra mediante impedancia. Conmutador en posición (1): resto de casos.

### A.2.3. Circuitos MT vecinos

Véase fig. A.9. Cuadripolo equivalente unitario y simplificado, basado en parámetros concentrados, válido para cualquier secuencia, asociado a circuitos sin defecto:

- Se omiten, por el momento, las cargas. El efecto de estas se analizará en (A2.5);
- Se totalizan todas las derivaciones posibles en un modelo ( $\pi$ ) único.

Analizando fig. A.9:

- Superíndice ( $CV_i$ ): identificativo del circuito vecino  $i$ -ésimo;  $i = 1, 2 \dots (R - 1)$ ;
- Subíndices secuencia  $\{0, 1, 2\}$ . Todos los parámetros del circuito ( $r, x, g, b$ ) son de valor idéntico en secuencia (1) y (2);
- $r$ : resistencia unitaria del circuito en la secuencia considerada:

$$r_{\{0,1,2\}}^{CV_i} = R_{\{0,1,2\}}^{CV_i} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2} ;$$

- $x$ : reactancia unitaria del circuito en la secuencia considerada:

$$x_{\{0,1,2\}}^{CV_i} = X_{\{0,1,2\}}^{CV_i} \frac{S_b}{|U_{MT}|^2} ;$$

- $g$ : conductancia unitaria del circuito en la secuencia considerada:

$$g_{\{0,1,2\}}^{CV_i} = G_{\{0,1,2\}}^{CV_i} \frac{|U_{MT}|^2}{S_b} ;$$

- $b$ : susceptancia unitaria del circuito en la secuencia considerada:

$$b_{\{0,1,2\}}^{CV_i} = B_{\{0,1,2\}}^{CV_i} \frac{|U_{MT}|^2}{S_b} .$$

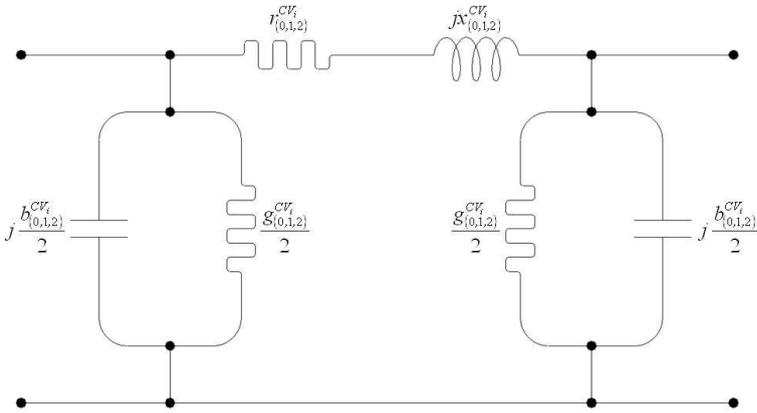


Figura A.9: Cuadripolo equivalente, magnitudes unitarias, circuitos MT sin falta. La secuencia analizada determina el valor de los subíndices.

### A.2.3.1. Simplificaciones adicionales, secuencias (1) y (2)

Merced a los valores reducidos de la conductancia (en todas las secuencias) y la susceptancia (en secuencias 1 y 2), surge el cuadripolo de fig. A.10. Nótese que, para ambas secuencias, se mantiene el subíndice (1): en circuitos, los valores ( $r, x, g, b$ ) son de valor idéntico en secuencia (1) y (2).

### A.2.3.2. Simplificaciones adicionales, secuencia (0)

Se elimina la conductancia (de valor reducido), pero no así la susceptancia (fig. A.11). De hecho, en escenarios de falta a tierra, las intensidades de secuencia (0) en los circuitos vecinos constituyen la clave para la detección en regímenes de neutro MT aislado; y en regímenes de neutro MT

conectado a tierra por impedancia pueden incrementar o decrementar la intensidad homopolar en el cortocircuito. Tal fenómeno resulta más notable en circuitos subterráneos.

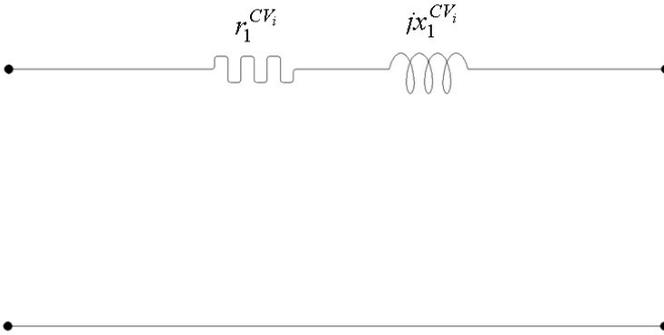


Figura A.10: Cuadripolo equivalente más simplificado, magnitudes unitarias, circuitos MT sin falta, secuencias (1) y (2).

#### A.2.4. Circuito MT en falta

Superíndice ( $CF$ ). Nótese que admite el modelo siguiente:

- Un primer cuadripolo, conectado entre barras MT y el punto de la falta;
- Un segundo cuadripolo, conectado entre el punto de la falta y el final del circuito.

Según lo analizado en (A2.3), la representación en secuencias (1, 2) y secuencia (0) aparecen, respectivamente, en fig. A.12 y fig. A.13.

Los factores multiplicativos ( $\lambda$ ) y ( $1 - \lambda$ ) identifican la posición del defecto:

- $\lambda$ : distancia unitaria desde barras al cortocircuito. Obviamente,  $0 \leq \lambda \leq 1$  ;
- ( $1 - \lambda$ ): distancia unitaria desde el cortocircuito hasta el final del circuito.

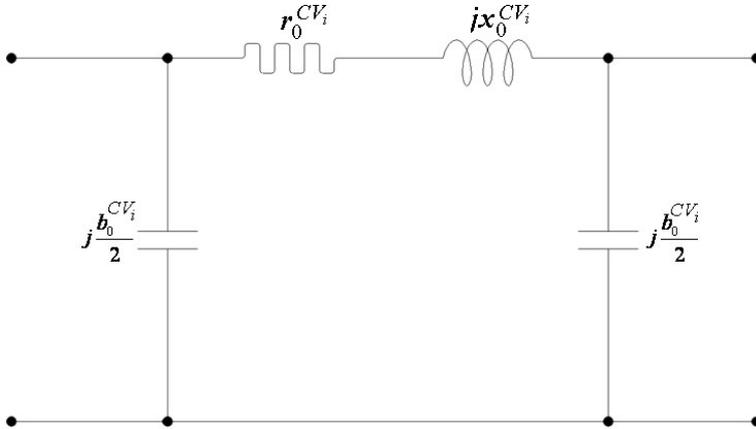


Figura A.11: Cuadripolo equivalente más simplificado, magnitudes unitarias, circuitos MT sin falta, secuencia (0).

### A.2.5. Cargas en circuitos

Véase fig. A.14. Esquema unifilar y dipolo equivalente unitario y simplificado, carga de circuito. Nomenclaturas y asunciones de partida:

- Superíndice ( $C_i$ ): identificativo del circuito  $i$ -ésimo,  $i = 1, 2 \dots R$ ;
- Subíndice ( $L$ ): identificativo de carga (*Load*);
- Cargas aisladas de tierra en todos los circuitos (admitancia nula en secuencia 0);
- Aproximación por identidad en secuencias (1) y (2);
- Aproximación lineal mediante impedancia / admitancia, asociada a la potencia aparente consumida con anterioridad al cortocircuito:

$$S_L = P_L + jQ_L \ ; \ s_L^{C_i} = p_L^{C_i} + jq_L^{C_i} = \frac{S_L^{C_i}}{S_b}$$

$$z_{L\{1,2\}}^{C_i} \cong \frac{|u_L^{C_i}|^2}{p_L^{C_i} - jq_L^{C_i}} \ ; \ y_{L\{1,2\}}^{C_i} \cong \frac{p_L^{C_i} - jq_L^{C_i}}{|u_L^{C_i}|^2} .$$

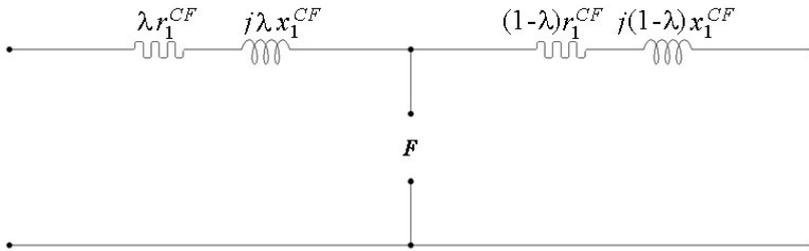


Figura A.12: Cuadripolos equivalentes, magnitudes unitarias, secuencias (1) y (2), circuito MT en falta.

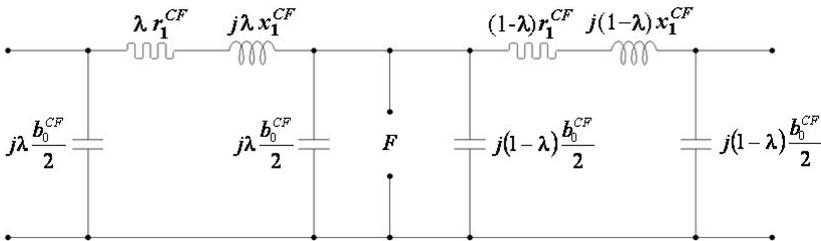


Figura A.13: Cuadripolos equivalentes, magnitudes unitarias, secuencia (0), circuito MT en falta.

### A.2.5.1. Simplificación adicional

Recuérdese que  $(u_L^{C_i})$  es valor de tensión unitaria en la carga totalizada del circuito, con anterioridad al defecto. La carga totalizada unitaria del circuito,  $(s_L^{C_i})$ , salvo excepciones en circuitos de alimentación dedicada, no se encuentra concentrada, sino distribuida en derivaciones. La tensión a la que se encuentran sometidas todas y cada una de las diferentes cargas del circuito no es idéntica: en efecto, será superior en cargas eléctricamente próximas a barras MT e inferior en cargas eléctricamente alejadas. Teniendo en cuenta los límites reglamentarios ( $\pm 7\%$ ),  $(u_L^{C_i})$  verifica:

$$0,93 \leq |u_L^{C_i}| \leq 1,07 ,$$

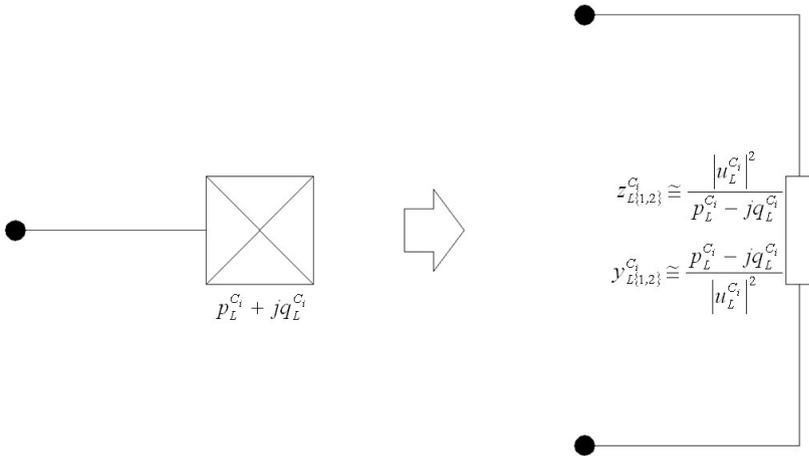


Figura A.14: Esquema unifilar y dipolo equivalente, magnitudes unitarias, carga de circuito  $i$ -ésimo.

por tanto

$$0,8649 \leq \left| u_L^{C_i} \right|^2 \leq 1,1449 .$$

Aproximando por el valor medio:

$$\left| u_L^{C_i} \right| \cong 1 ,$$

las impedancias y admitancias unitarias en secuencia (1) y (2) asociadas a las cargas de los circuitos resultan:

$$z_{L\{1,2\}}^{C_i} \cong \frac{1}{p_L^{C_i} - jq_L^{C_i}}; y_{L\{1,2\}}^{C_i} \cong p_L^{C_i} - jq_L^{C_i} .$$

### A.3. Cortocircuito y red involucrada

Véase fig. A.15, esquema general para las tres secuencias: cuadripolos y dipolos a considerar, independientemente a la secuencia analizada, respecto al punto en falta. Basta con modelizar los cuadripolos y dipolos en secuencias (0, 1 y 2) para determinar la red de secuencia respectiva.

Nomenclatura utilizada:

- $D_{AT}$ : dipolo representativo de sistema AT;
- $Q_T$ : cuadripolo representativo de transformador (incluyendo impedancia de puesta a tierra neutro MT);
- $Q^{CV_i}$ : cuadripolo representativo de circuito vecino *i*ésimo;
- $D_L^{CV_i}$ : dipolo representativo, carga de circuito vecino *i*ésimo;
- $Q_{B \rightarrow F}^{CF}$ : cuadripolo representativo, circuito en falta, desde barras MT hasta falta;
- $Q_{F \rightarrow FC}^{CF}$ : cuadripolo representativo, circuito en falta, desde falta hasta final circuito;
- $F$ : falta;
- $D_L^{CF}$ : dipolo representativo, carga de circuito en falta.

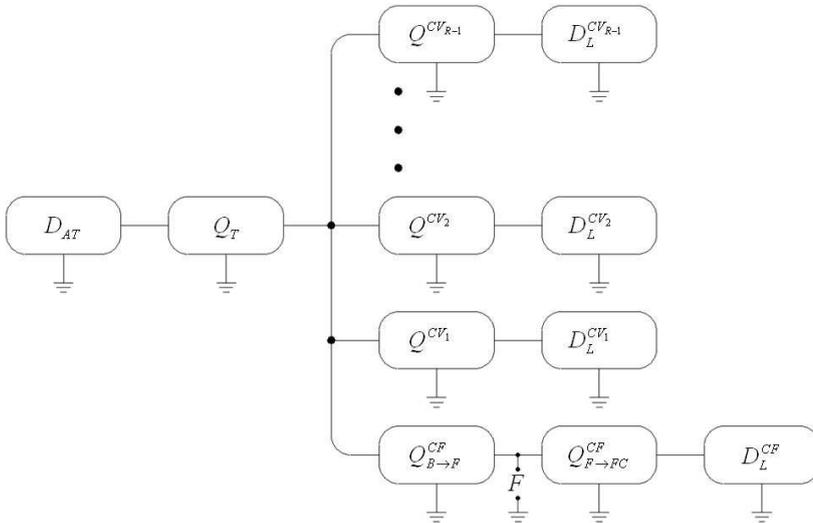


Figura A.15: Construcción de red involucrada y punto de la falta.

A la vista de la fig. A.15, surgen diversas asociaciones paralelo, serie y mixtas para compactar el esquema (fig. A.16).

Nomenclatura:

- $D_{AT} [S] Q_T$ : equivalente formado por asociación serie dipolo red AT con cuadripolo transformador;
- $[P] \left\{ Q^{CV_i} [S] D_L^{CV_i} \right\}_{i=1}^{R-1}$ : equivalente formado por el paralelo de  $(R - 1)$  asociaciones serie; cada una de ellas comprende cuadripolo de circuito vecino  $i$ -ésimo y dipolo (carga) de circuito vecino  $i$ -ésimo;
- $Q_{B \rightarrow F}^{CF}$ : cuadripolo representativo, circuito en falta, desde barras MT hasta falta;
- $Q_{F \rightarrow FC}^{CF} [S] D_L^{CF}$ : equivalente formado por asociación serie, cuadripolo circuito en falta (desde la falta hasta el final del circuito) con dipolo (carga) del circuito en falta.

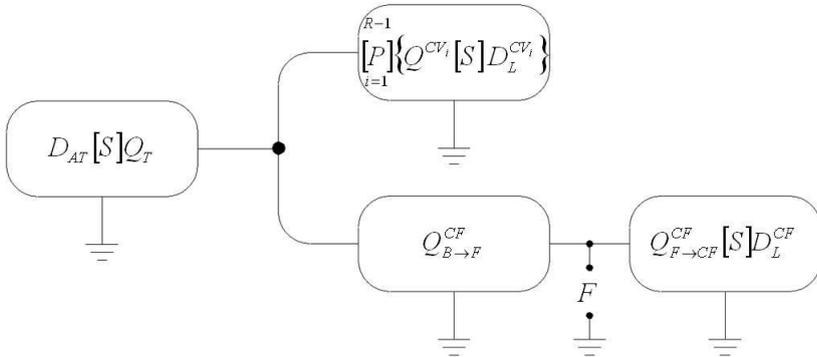


Figura A.16: Compactación de red involucrada frente a punto de la falta.

Tal y como puede observarse, la compactación resulta notable; y constituye una simplificación adicional previa a los cálculos.

## A.4. Redes de secuencia

Mediante detallado elementos que componen fig. A.16.

### A.4.1. Secuencia (1)

Véase fig. A.17.

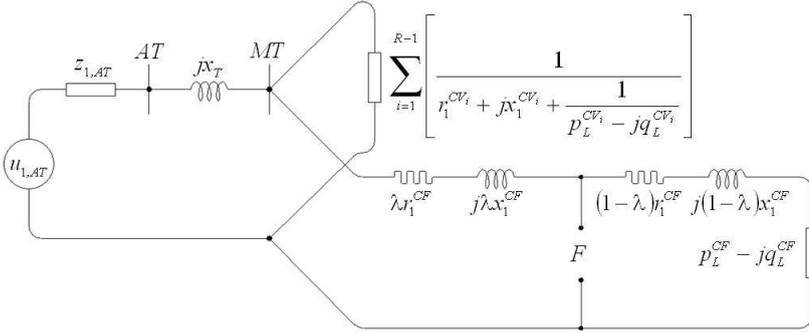


Figura A.17: Red de secuencia (1), magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta.

Observando la admitancia total equivalente ( $y_{eq}^{CV}$ ) asociada a los circuitos vecinos:

$$y_{eq}^{CV} = \sum_{i=1}^{R-1} \left[ \frac{1}{r_1^{CV_i} + jx_1^{CV_i} + \frac{1}{p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}}} \right],$$

y teniendo en cuenta que:

$$\left| r_1^{CV_i} + jx_1^{CV_i} \right| \ll \left| \frac{1}{p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}} \right|, \forall (i),$$

puede establecerse:

$$y_{eq}^{CV} \cong \sum_{i=1}^{R-1} \left[ p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i} \right].$$

Asimismo, para el circuito en falta, la impedancia representativa desde el punto en falta hasta el final del circuito admite una simplificación:

$$(1 - \lambda) r_1^{CF} + j(1 - \lambda) x_1^{CF} + \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}} \cong \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}},$$

y la red de secuencia (1) admite una compactación (fig. A.18). Obsérvese que se ha dividido en 2 sectores: el circuito en falta, desde su inicio, y el resto del sistema.

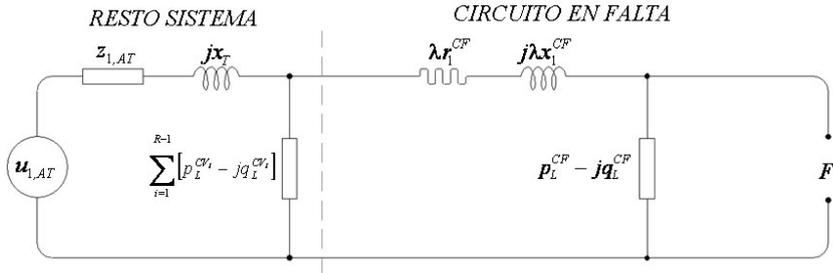


Figura A.18: Red de secuencia (1) compactada, magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta.

Si, adicionalmente, se verifica:

$$jx_T \gg z_{1,AT} ,$$

cabe una compactación mayor tal como se observa en la fig. A.19.

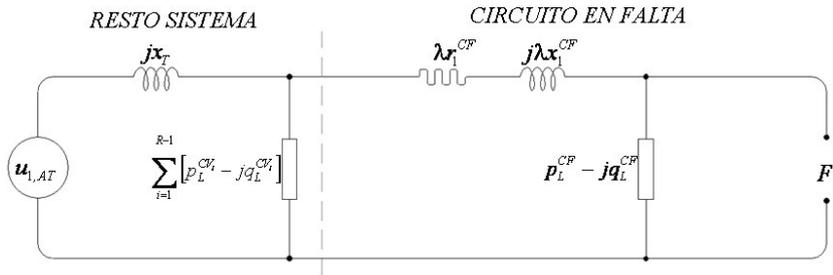


Figura A.19: Red de secuencia (1) compactada, magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta. Se omite impedancia de secuencia (1) AT del sistema.

### A.4.2. Secuencia (2)

Presenta, salvo por la ausencia de la fuente de tensión, idéntico aspecto que la red de secuencia (1) (fig. A.20):

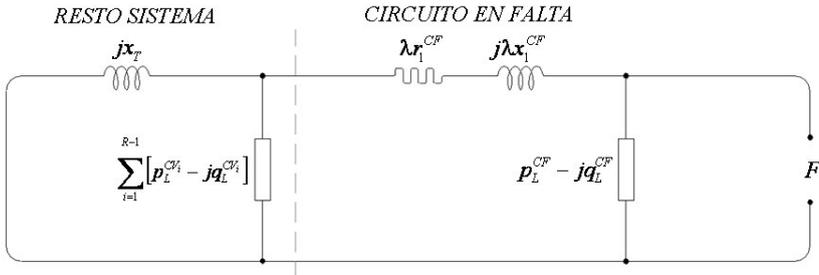


Figura A.20: Red de secuencia (2) compactada, magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta. Se omite impedancia de secuencia (1) AT del sistema.

### A.4.3. Secuencia (0)

Detallando esquema mostrado en fig. A.16, surge fig. A.21:

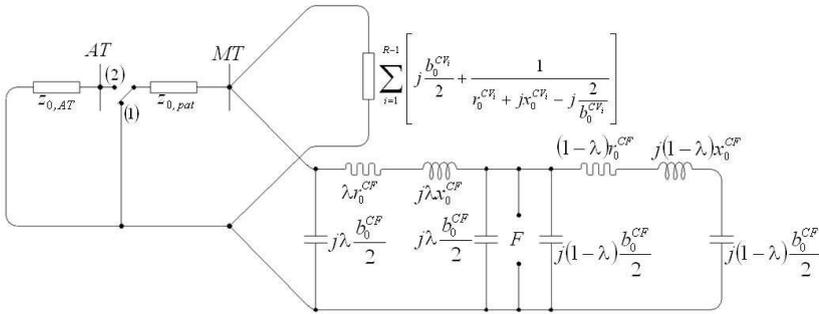


Figura A.21: Red de secuencia (0), magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta.

Observando la admitancia total equivalente ( $y_{eq,0}^{CV}$ ) asociada a los circuitos vecinos:

$$y_{eq,0}^{CV} = \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j \frac{b_0^{CV_i}}{2} + \frac{1}{r_0^{CV_i} + jx_0^{CV_i} - j \frac{2}{b_0^{CV_i}}} \right],$$

y teniendo en cuenta que:

$$\left| r_0^{CV_i} + jx_0^{CV_i} \right| \ll \left| \frac{2}{b_0^{CV_i}} \right|, \forall (i) ,$$

puede establecerse:

$$y_{eq,0}^{CV} \cong j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} .$$

Asimismo, para el circuito en falta, la impedancia representativa desde el punto en falta hasta el final del circuito admite una simplificación:

$$j(1-\lambda) \frac{b_0^{CF}}{2} + \frac{1}{(1-\lambda)r_0^{CF} + j(1-\lambda)x_0^{CF} - j\frac{2}{(1-\lambda)b_0^{CF}}} \cong j(1-\lambda)b_0^{CF} ,$$

y la red de secuencia (0) admite una primera compactación (fig. A.22). Obsérvese que se ha dividido en 2 sectores: el circuito en falta, desde su inicio, y el resto del sistema.

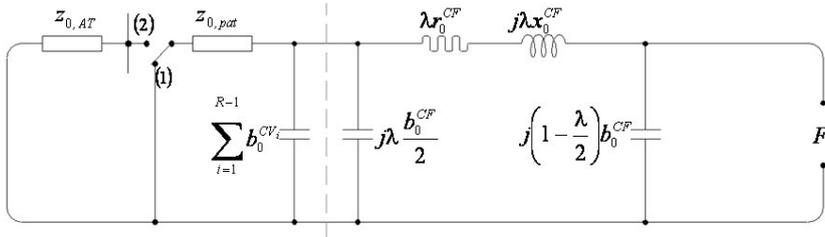


Figura A.22: Red de secuencia (0) compactada, magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta.

Finalmente, de verificarse:

$$z_{0,pat} \gg z_{0,AT} ,$$

equivale a mantener siempre en posición (1) el conmutador, obteniéndose una compactación mayor (fig. A.23), si cabe, en secuencia (0).

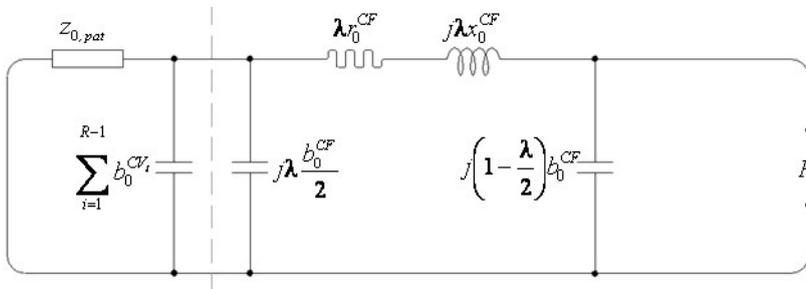


Figura A.23: Red de secuencia (0) compactada, magnitudes unitarias, asociada a escenario de falta. Se omite impedancia AT en secuencia (0) del sistema.

## A.5. Equivalentes Thévenin en redes de secuencia

Resultan convenientes para determinar las magnitudes en el punto del cortocircuito. No obstante, una vez calculadas éstas, será preciso contemplar los elementos que las componen internamente para determinar magnitudes eléctricas en otros puntos del sistema analizado.

### A.5.1. Secuencia (1)

#### A.5.1.1 Tensión Thévenin

Observando fig. A.19, la admitancia representativa para la carga del circuito ( $p_L^{CF} - jq_L^{CF}$ ) está situada en paralelo con la falta ( $F$ ).

Si en el apartado A.2.5.1 se asumió, para todas las cargas:

$$\left| u_L^{C_i} \right| \cong 1$$

y en A.2.2.1 se asumió:

$$\left| \frac{u_{1,MT}}{u_{1,AT}} \right| = 1 ,$$

entonces, la tensión Thévenin previa al defecto, en el punto del defecto, puede aproximarse por

$$e_{1,Th} \cong 1 .$$

### A.5.1.2 Impedancia Thévenin

De nuevo en fig. A.19, la impedancia de entrada (sustituyendo fuente de tensión por cortocircuito) desde el punto del defecto resulta

$$z_{1,Th} = \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF} + \frac{1}{\lambda(r_1^{CF} + jx_1^{CF}) + \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} [p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}] + \frac{1}{jx_T}}}} .$$

Asumiendo

$$\sum_{i=1}^{R-1} [p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}] \ll \frac{1}{jx_T}$$

resulta

$$z_{1,Th} = \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF} + \frac{1}{\lambda(r_1^{CF} + jx_1^{CF}) + jx_T}} .$$

Suponiendo, además, que

$$\frac{1}{|p_L^{CF} - jq_L^{CF}|} \gg |\lambda(r_1^{CF} + jx_1^{CF}) + jx_T| ,$$

la impedancia Thévenin en secuencia (1) puede aproximarse según

$$z_{1,Th} \cong jx_T + \lambda(r_1^{CF} + jx_1^{CF}) . \quad (A.1)$$

## A.5.2. Secuencia (2)

### A.5.2.1 Impedancia Thévenin

A la vista de fig. A.20:

$$z_{2,Th} = z_{1,Th} \cong jx_T + \lambda(r_1^{CF} + jx_1^{CF}) . \quad (A.2)$$

## A.5.3. Secuencia (0)

### A.5.3.1 Admitancia Thévenin

A la vista de fig. A.23:

$$y_{0,Th} = \frac{1}{z_{0,Th}} = j \left( 1 - \frac{\lambda}{2} \right) b_0^{CF} + \frac{1}{\lambda(r_0^{CF} + jx_0^{CF}) + \frac{1}{j\frac{\lambda}{2}b_0^{CF} + j\sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} + y_{0,pat}}} . \quad (A.3)$$

## A.6. Cálculo de magnitudes en el cortocircuito

Tratándose de un cortocircuito monofásico a tierra con resistencia de falta (fig. A.24), las intensidades de secuencia en el punto del defecto resultan

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u_{1,AT}}{z_{1,Th} + z_{2,Th} + z_{0,Th} + 3r_F}. \quad (\text{A.4})$$

**Observación:**  $(i_1), (i_2), (i_0)$  no son las intensidades de secuencia captadas por el relé de protección asociado al circuito, a excepción que el defecto se sitúe al inicio de este.

Sustituyendo en (A.4) las expresiones obtenidas en (A.1), (A.2) y (A.3) para  $(z_{1,Th}), (z_{2,Th}), (z_{0,Th})$  y particularizando  $(\lambda = 0)$ , queda determinado el valor máximo alcanzable para las intensidades de secuencia en el defecto, suponiendo este en barras:

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u_{1,AT}}{2jx_T + \frac{1}{jb_0^{CF} + j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} + y_{0,pat}} + 3r_F} = \frac{u_{1,AT}}{2jx_T + \frac{1}{j \sum_{i=1}^R b_0^{C_i} + y_{0,pat}} + 3r_F}. \quad (\text{A.5})$$

Operando,  $(v_0^{BAR})$  resulta

$$v_0^{BAR} = - \frac{u_{1,AT}}{\left( j \sum_{i=1}^R b_0^{C_i} + y_{0,pat} \right) (2jx_T + 3r_F) + 1}. \quad (\text{A.6})$$

La susceptancia en secuencia cero de los  $(R)$  circuitos conectados a barras MT en el instante del defecto admite una expresión frente a las capacidades en secuencia  $(0)$  de éstos:

$$\sum_{i=1}^R b_0^{C_i} = 2\pi f \sum_{i=1}^R c_{0,i}. \quad (\text{A.7})$$

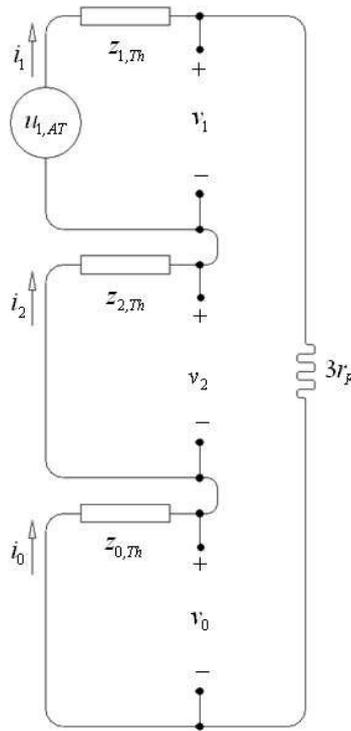


Figura A.24: Esquema unitario, basado en redes de secuencias, cálculo de cortocircuito monofásico a tierra con resistencia de defecto.

## A.7. Magnitudes y ángulos relativos, secuencia (0)

### A.7.1. Régimen de neutro MT aislado

En tal caso:

$$y_{0,pat} = 0 .$$

Sustituyendo en (A.5), quedan determinadas las intensidades de secuencia en el defecto, suponiendo este en barras:

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u_{1,AT}}{2j \left( x_T - \frac{1}{\sum_{i=1}^R b_0^{CV_i}} \right) + 3r_F} . \quad (A.8)$$

Retomando el circuito de secuencia (0), fig. A.23, eliminando la impedancia de puesta a tierra e incorporándolo en el circuito de fig. A.24, surge fig. A.25, esquema válido para defecto en cualquier ubicación circuito MT.

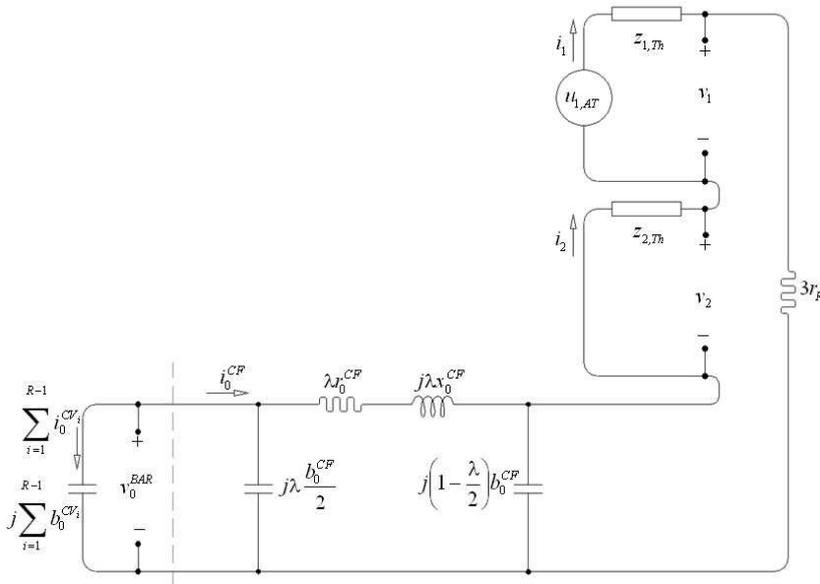


Figura A.25: Redes de secuencia unitarias con detallado red homopolar, escenario de neutro MT aislado.

Determinando  $\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i}$ :

$$\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} = v_0^{BAR} j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} . \quad (A.9)$$

Es decir,  $\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i}$  adelanta ( $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$ ) respecto a ( $v_0^{BAR}$ ). Dado que:

$$(i_0^{CF}) = - \sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} , \quad (\text{A.10})$$

la intensidad homopolar del circuito en falta, ( $i_0^{CF}$ ) , retrasa ( $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$ ) respecto a ( $v_0^{BAR}$ ).

Relaciones angulares:

$$\varphi [i_0^{CF}] = \varphi [v_0^{BAR}] - \frac{\pi}{2} ; \varphi \left[ \sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} \right] = \varphi [v_0^{BAR}] + \frac{\pi}{2} . \quad (\text{A.11})$$

### A.7.2. Régimen de neutro MT conectado a tierra mediante reactancia

En tal caso:

$$y_{0,pat} = - \frac{j}{x_{0,pat}} .$$

Sustituyendo en (A.5), quedan determinadas las intensidades de secuencia en el defecto, suponiendo este en barras:

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u_{1,AT}}{2j \left[ x_T - \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^R b_0^{C_i} - \frac{1}{x_{0,pat}} \right)} \right] + 3r_F} . \quad (\text{A.12})$$

Retomando el circuito de secuencia (0), fig. A.23, modificando la impedancia de puesta a tierra e incorporándolo en el circuito de fig. A.24, surge fig. A.26, esquema válido para defecto en cualquier ubicación circuito MT.

Dado que, normalmente

$$\frac{1}{x_{0,pat}} > \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} ,$$

se verifica que

$$x_{0,pat} < \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i}} .$$

Teniendo en cuenta la desigualdad, y determinando la relación entre intensidad unitaria, circuito en falta, y tensión homopolar unitaria, barras MT, resulta:

$$i_0^{CF} = -jv_0^{BAR} \left[ \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - \frac{1}{x_{0,pat}} \right] = jv_0^{BAR} \left[ \frac{1}{x_{0,pat}} - \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} \right], \quad (A.13)$$

es decir,  $(i_0^{CF})$  presenta un adelanto de  $(\frac{\pi}{2} = 90^\circ)$  respecto a  $(v_0^{BAR})$ .

Por lo que a la intensidad de secuencia (0) en la reactancia de puesta a tierra respecta:

$$i_0^{xpat} = \frac{jv_0^{BAR}}{x_{0,pat}}, \quad (A.14)$$

es decir,  $(i_0^{xpat})$  presenta un adelanto de  $(\frac{\pi}{2} = 90^\circ)$  respecto a  $(v_0^{BAR})$ .

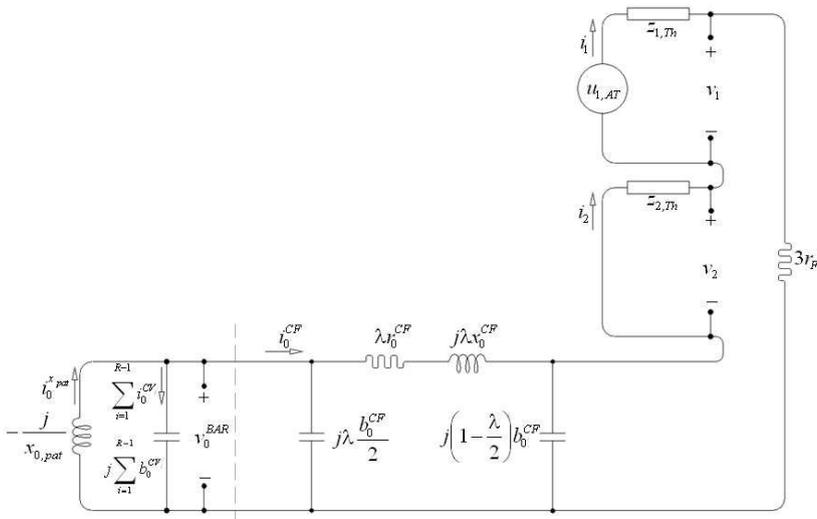


Figura A.26: Redes de secuencia unitarias con detallado red homopolar, escenario de neutro MT puesto a tierra mediante reactancia.

Finalmente, la intensidad de secuencia (0) en los circuitos vecinos constituye la diferencia entre la intensidades de secuencia (0) en la impedancia de puesta a tierra y el circuito en falta:

$$\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} = v_0^{BAR} j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i}, \quad (\text{A.15})$$

es decir,  $\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i}$  presenta un adelanto de  $(\frac{\pi}{2} = 90^\circ)$  respecto a  $(v_0^{BAR})$ .  
Recopilando las relaciones angulares:

$$\begin{aligned} \varphi [i_0^{CF}] &= \varphi [v_0^{BAR}] + \frac{\pi}{2} ; \quad \varphi \left[ \sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} \right] = \varphi [v_0^{BAR}] + \frac{\pi}{2} ; \\ \varphi [i_0^{x_{pat}}] &= \varphi [v_0^{BAR}] + \frac{\pi}{2} . \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

#### Observaciones:

- Teóricamente, puede darse una resonancia paralelo; en efecto, si

$$\frac{1}{x_{0,pat}} = \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i}$$

la intensidad  $(i_0^{CF})$  es nula. No obstante, si bien pueden darse fenómenos cercanos a la resonancia, resulta muy difícil que esta tenga lugar de forma absoluta; cabe recordar que, para los análisis efectuados, se ha supuesto siempre, por simplicidad, que

$$g_0 = 0$$

y, tratándose de una reactancia de puesta a tierra, se supone también que

$$z_{0,pat} = jx_{0,pat} .$$

En la práctica no se da ninguna de ambas igualdades de forma estricta, por lo que difícilmente tiene lugar  $(i_0^{CF}) = 0$ , aunque sí puede presentar valores muy reducidos.

- La intensidad de secuencia (0) circulante por la impedancia de puesta a tierra es superior a la circulante por el circuito en falta; comparando (A.13) y (A.14) surge la inecuación

$$jv_0^{BAR} \left[ \frac{1}{x_{0,pat}} - \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} \right] < \frac{jv_0^{BAR}}{x_{0,pat}} \quad (\text{A.17})$$

Tanto si se dan escenarios próximos a la resonancia paralelo, como si la intensidad de secuencia (0) circulante por la impedancia de puesta a tierra resulta netamente superior a la circulante por el circuito en falta, la selectividad entre protecciones homopolares circuito – transformador “fuente” puede verse severamente comprometida.

### A.7.3. Régimen de neutro MT conectado a tierra mediante impedancia predominantemente resistiva

En tal caso

$$y_{0,pat} = \frac{1}{r_{0,pat} + jx_{0,pat}} .$$

Sustituyendo en (A.5), quedan determinadas las intensidades de secuencia en el defecto, suponiendo este en barras:

$$i_1 = i_2 = i_0 = \frac{u_{1,AT}}{2jx_T + \frac{1}{j \sum_{i=1}^R b_0^{C_i} + \frac{1}{r_{0,pat} + jx_{0,pat}}} + 3r_F} . \quad (A.18)$$

Retomando el circuito de secuencia (0), fig. A.23, modificando la impedancia de puesta a tierra e incorporándolo en el circuito de fig. A.24, surge fig. A.27, esquema válido para defecto en cualquier ubicación circuito MT.

Determinando ( $i_0^{z_{pat}}$ ):

$$i_0^{z_{pat}} = -v_0^{BAR} \left[ \frac{1}{r_{0,pat} + jx_{0,pat}} \right] = -v_0^{BAR} \left[ \frac{r_{0,pat} - jx_{0,pat}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \right] . \quad (A.19)$$

La relación  $\left( \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right)$  determina la proximidad al contrafase ( $\pi = 180^\circ$ ) entre ambas magnitudes. En efecto:

$$\left( \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right) = 0 \rightarrow \varphi [i_0^{z_{pat}}] = \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi$$

En general:

$$\varphi [i_0^{z_{pat}}] = \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi + tg^{-1} \left[ \frac{-x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right] ,$$

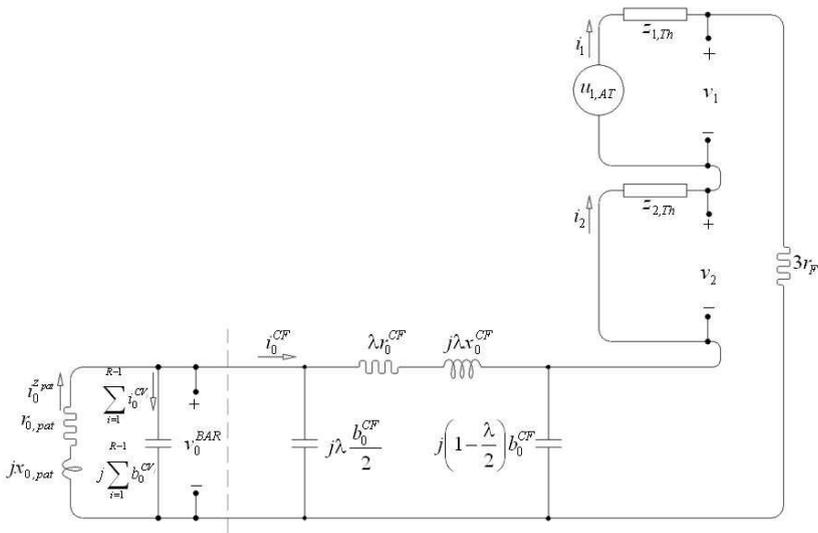


Figura A.27: Redes de secuencia unitarias con detallado red homopolar, escenario de neutro MT puesto a tierra mediante resistencia (o impedancia predominantemente resistiva).

si bien, para impedancia de puesta a tierra predominantemente resistiva, puede establecerse:

$$\varphi [i_0^{zpat}] = \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi - \alpha ; \alpha < \frac{\pi}{4} .$$

Determinando  $\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CVi}$ :

$$\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CVi} = v_0^{BAR} j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CVi} . \quad (A.20)$$

Es decir:  $\sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CVi}$  presenta un adelanto de  $(\frac{\pi}{2} = 90^\circ)$  respecto a  $v_0^{BAR}$ .

Determinando ( $i_0^{CF}$ ):

$$\begin{aligned}
i_0^{CF} &= i_0^{zpat} - \sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} = -v_0^{BAR} \left[ j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} + \frac{1}{r_{0,pat} + jx_{0,pat}} \right] = \\
&= -v_0^{BAR} \left[ j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} + \frac{r_{0,pat} - jx_{0,pat}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \right] = \\
&= \frac{-v_0^{BAR}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \left[ (r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) j \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} + r_{0,pat} - jx_{0,pat} \right].
\end{aligned}$$

Es decir:

$$i_0^{CF} = \frac{-v_0^{BAR}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \left\{ r_{0,pat} + j \left[ (r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - x_{0,pat} \right] \right\}. \quad (A.21)$$

**Observación:** si  $x_{0,pat} = 0$  (puesta a tierra resistiva pura), entonces:

$$i_0^{zpat} = -v_0^{BAR} \left[ \frac{1}{r_{0,pat}} \right]; \quad i_0^{CF} = \frac{-v_0^{BAR}}{r_{0,pat}} \left\{ 1 + j \left[ r_{0,pat} \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} \right] \right\}.$$

La intensidad de secuencia (0) circulante por la impedancia de puesta a tierra resulta inferior a la circulante por el circuito en falta, lo cual implica mejora en la selectividad de protecciones homopolares circuito – transformador “fuente”. En el caso general (impedancia de puesta a tierra mixta), la intensidad de secuencia (0) circulante por la impedancia de puesta a tierra puede ser mayor o menor a la circulante por el circuito en falta. Si es mayor, comparando (A.19) y (A.21) surge la inecuación

$$\left| v_0^{BAR} \left[ \frac{r_{0,pat} - jx_{0,pat}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \right] \right| > \left| \frac{v_0^{BAR}}{r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2} \left\{ r_{0,pat} + j \left[ (r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - x_{0,pat} \right] \right\} \right| \quad (A.22)$$

Para que dicha inecuación sea válida se deberá cumplir

$$(r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} < 2x_{0,pat}.$$

Por el contrario, si se verifica que

$$(r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} > 2x_{0,pat} ,$$

entonces la intensidad de secuencia (0) por la impedancia de puesta a tierra es menor que por el circuito en falta.

Obviamente, la intensidad de secuencia (0) en los circuitos vecinos (A.20) constituye la diferencia entre las intensidades de secuencia (0) en la impedancia de puesta a tierra y el circuito en falta.

En concreto, para el circuito en falta, la relación angular resulta:

$$\begin{aligned} \varphi [i_0^{CF}] &= \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi + tg^{-1} \left[ \frac{(r_{0,pat}^2 + x_{0,pat}^2) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right] = \\ &= \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi + tg^{-1} \left[ r_{0,pat} \left( 1 + \frac{x_{0,pat}^2}{r_{0,pat}^2} \right) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right] . \end{aligned}$$

Véase en fig. A.28 diferencia angular para algunos valores de  $\left( \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right)$  y  $\left( r_{0,pat} \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} \right)$ .

**Observación:** el gráfico presenta discontinuidades aparentes en los puntos:

$$r_{0,pat} \left( 1 + \frac{x_{0,pat}^2}{r_{0,pat}^2} \right) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} = \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} .$$

Ello se debe a la normalización del mismo entre  $(\pm\pi)$ .

Recopilando todas las relaciones angulares:

$$\varphi [i_0^{zpat}] = \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi + tg^{-1} \left[ \frac{-x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right]; \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned} \varphi [i_0^{CF}] &= \varphi [v_0^{BAR}] \pm \pi + \\ &tg^{-1} \left[ r_{0,pat} \left( 1 + \frac{x_{0,pat}^2}{r_{0,pat}^2} \right) \sum_{i=1}^{R-1} b_0^{CV_i} - \frac{x_{0,pat}}{r_{0,pat}} \right]; \quad (\text{A.24}) \end{aligned}$$

$$\varphi \left[ \sum_{i=1}^{R-1} i_0^{CV_i} \right] = \varphi [v_0^{BAR}] + \frac{\pi}{2} . \quad (\text{A.25})$$

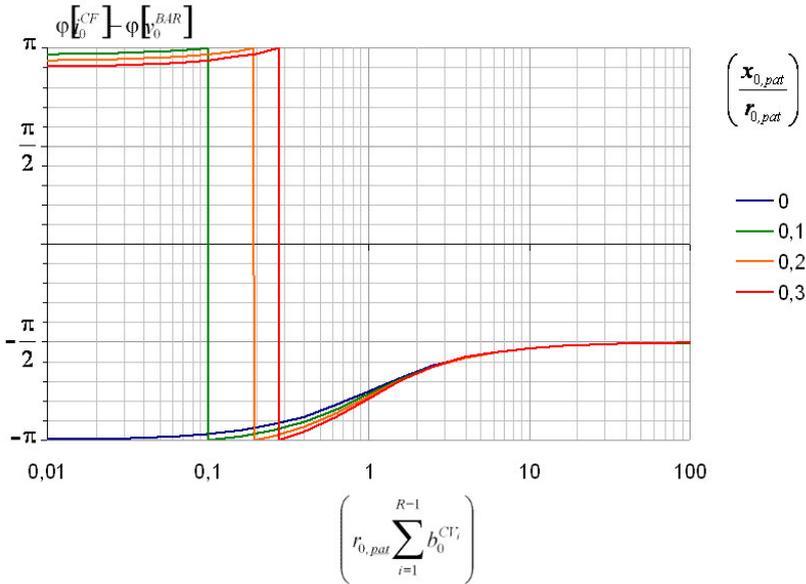


Figura A.28: Argumento angular, secuencia (0), intensidad de circuito en falta y tensión en barras MT frente a relación entre impedancias y admitancia influyentes. Eje de abscisas logarítmico.

Podemos concluir esta sección indicando que, a la vista de la diferencia angular  $(\varphi [i_0] - \varphi [v_0^{BAR}])$ , siendo  $(i_0)$  la intensidad homopolar en el origen de un circuito cualquiera MT, el principio direccional no funciona con impedancia de puesta a tierra inductiva (la diferencia angular es la misma para un circuito en falta y para uno vecino), y sí funciona para neutro aislado e impedancia de puesta a tierra puramente resistiva o predominantemente resistiva.



## Apéndice B

# Desequilibrio serie, red MT

Intensidades de secuencia y relaciones notables en algunos escenarios

### B.1. Escenario

Véase fig. B.1 esquema trifilar básico:

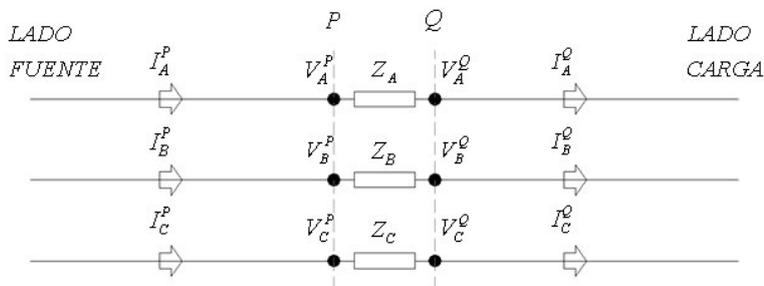


Figura B.1: Esquema trifilar básico, magnitudes físicas, desequilibrio serie.

## B.2. Ecuaciones en magnitudes unitarias

Definiendo

$$\Delta v_A = v_A^P - v_A^Q ; \Delta v_B = v_B^P - v_B^Q ; \Delta v_C = v_C^P - v_C^Q ,$$

dado que

$$i_A^P = i_A^Q ; i_B^P = i_B^Q ; i_C^P = i_C^Q ,$$

entonces

$$\Delta v_A = i_A z_A ; \Delta v_B = i_B z_B ; \Delta v_C = i_C z_C . \quad (\text{B.1})$$

Obviamente, la igualdad en intensidades de fase a ambos lados del desequilibrio implica, asimismo, igualdad en intensidades de secuencia; es decir:

$$i_A^P = i_A^Q ; i_B^P = i_B^Q ; i_C^P = i_C^Q \rightarrow i_1^P = i_1^Q ; i_2^P = i_2^Q ; i_0^P = i_0^Q .$$

Asumiendo las redes unitarias de secuencia (véase sección B.4) desde fuente hasta el punto (P):

$$v_1^P = u_{1,Th} - i_1 z_1^P ; v_2^P = -i_2 z_2^P ; v_0^P = -i_0 z_0^P ,$$

siendo  $(u_{1,Th})$  tensión en secuencia (1) en el punto (P), con anterioridad al desequilibrio. Asimismo, la existencia de redes de secuencia desde punto (Q) hasta carga permite anotar (tratándose de un circuito de distribución radial, se asume que no hay generación lado carga):

$$v_1^Q = i_1 z_1^Q ; v_2^Q = i_2 z_2^Q ; v_0^Q = i_0 z_0^Q .$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} \Delta v_0 &= v_0^P - v_0^Q = -i_0 (z_0^P + z_0^Q) \\ \Delta v_1 &= v_1^P - v_1^Q = u_{1,Th} - i_1 (z_1^P + z_1^Q) \\ \Delta v_2 &= v_2^P - v_2^Q = -i_2 (z_2^P + z_2^Q) . \end{aligned}$$

Sustituyendo las magnitudes de fase en (B.1) por magnitudes de secuencia resulta

$$\begin{aligned} &-i_0(z_0^P + z_0^Q) + u_{1,Th} - i_1(z_1^P + z_1^Q) - i_2(z_2^P + z_2^Q) = (i_0 + i_1 + i_2) z_A \\ &-i_0(z_0^P + z_0^Q) + u_{1,Th} e^{-j\frac{2\pi}{3}} - i_1(z_1^P + z_1^Q) e^{-j\frac{2\pi}{3}} - i_2(z_2^P + z_2^Q) e^{j\frac{2\pi}{3}} = (i_0 + i_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}}) z_B \end{aligned}$$

$$-i_0(z_0^P + z_0^Q) + u_{1,Th} e^{j\frac{2\pi}{3}} - i_1(z_1^P + z_1^Q) e^{j\frac{2\pi}{3}} - i_2(z_2^P + z_2^Q) e^{-j\frac{2\pi}{3}} = (i_0 + i_1 e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}}) z_C ,$$

que, una vez explicitadas, dan lugar a un sistema de 3 ecuaciones y 3 incógnitas:

$$u_{1,Th} = i_0(z_0^P + z_0^Q + z_A) + i_1(z_1^P + z_1^Q + z_A) + i_2(z_2^P + z_2^Q + z_A) \quad (\text{B.2})$$

$$u_{1,Th} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0^P + z_0^Q + z_B) + i_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_1^P + z_1^Q + z_B) + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_2^P + z_2^Q + z_B) \quad (\text{B.3})$$

$$u_{1,Th} e^{j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0^P + z_0^Q + z_C) + i_1 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_1^P + z_1^Q + z_C) + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_2^P + z_2^Q + z_C) , \quad (\text{B.4})$$

cuya solución arroja las intensidades unitarias de secuencia debidas al desequilibrio. Realizando la asociación

$$(z_0^P + z_0^Q) = z_0 ; (z_1^P + z_1^Q) = z_1 ; (z_2^P + z_2^Q) = z_2 ,$$

el sistema resulta más compacto:

$$u_{1,Th} = i_0(z_0 + z_A) + i_1(z_1 + z_A) + i_2(z_2 + z_A)$$

$$u_{1,Th} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0 + z_B) + i_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_B) + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_2 + z_B)$$

$$u_{1,Th} e^{j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0 + z_C) + i_1 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_C) + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_2 + z_C) .$$

## B.3. Análisis de casos particulares

### B.3.1. Ausencia de impedancias serie

Si

$$z_A = z_B = z_C = 0$$

no hay desequilibrio alguno en el sistema; por tanto

$$i_0 = i_2 = 0$$

y

$$i_1 = \frac{u_{1,Th}}{z_1}$$

### B.3.2. Impedancias serie idénticas

Si

$$z_A = z_B = z_C = z$$

no hay desequilibrio alguno en el sistema; por tanto

$$i_0 = i_2 = 0$$

y

$$i_1 = \frac{u_{1,Th}}{z_1 + z}$$

### B.3.3. Impedancia serie en una única fase

Si

$$z_A \neq 0 ; z_B = z_C = 0$$

el sistema a resolver es

$$u_{1,Th} = i_0 (z_0 + z_A) + i_1 (z_1 + z_A) + i_2 (z_2 + z_A) \quad (\text{B.5})$$

$$u_{1,Th} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = i_0 z_0 + i_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}} z_1 + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}} z_2 \quad (\text{B.6})$$

$$u_{1,Th} e^{j\frac{2\pi}{3}} = i_0 z_0 + i_1 e^{j\frac{2\pi}{3}} z_1 + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}} z_2 \quad (\text{B.7})$$

Realizando la diferencia (B.7) -(B.6):

$$2j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} u_{1,Th} = 2j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} i_1 z_1 - 2j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} i_2 z_2$$

es decir,

$$u_{1,Th} = i_1 z_1 - i_2 z_2 ,$$

con lo cual se establece la dependencia entre ( $i_2$ ) e ( $i_1$ ):

$$i_2 = y_2 (i_1 z_1 - u_{1,Th})$$

Multiplicando (B.7) por  $(e^{-j\frac{2\pi}{3}})$  y (B.6) por  $(e^{j\frac{2\pi}{3}})$ :

$$u_{1,Th} = i_0 z_0 e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_1 z_1 + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}} z_2 \quad (\text{B.8})$$

$$u_{1,Th} = i_0 z_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_1 z_1 + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}} z_2 \quad (\text{B.9})$$

Realizando la diferencia (B.9) - (B.8):

$$0 = -2j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} i_0 z_0 + 2j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} i_2 z_2 ,$$

con lo cual se establece la dependencia entre  $(i_0)$  e  $(i_2)$ :

$$i_0 = y_2 (i_1 z_1 - u_{1,Th}) y_0 z_2 = (i_1 z_1 - u_{1,Th}) y_0 ,$$

que, dada la relación entre  $(i_2)$  e  $(i_1)$ , permite establecer dependencia entre  $(i_0)$  e  $(i_2)$ :

$$i_0 = i_2 y_0 z_2 ; i_2 = i_0 z_0 y_2 .$$

Sustituyendo en (B.5) las dependencias halladas:

$$u_{1,Th} = (i_1 z_1 - u_{1,Th}) y_0 (z_0 + z_A) + i_1 (z_1 + z_A) + y_2 (i_1 z_1 - u_{1,Th}) (z_2 + z_A) .$$

Operando:

$$\begin{aligned} u_{1,Th} [1 + y_0 (z_0 + z_A) + y_2 (z_2 + z_A)] = \\ i_1 z_1 y_0 (z_0 + z_A) + i_1 (z_1 + z_A) + i_1 z_1 y_2 (z_2 + z_A) ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{1,Th} [1 + (1 + y_0 z_A) + (1 + y_2 z_A)] = \\ i_1 z_1 (1 + y_0 z_A) + i_1 z_1 (1 + y_1 z_A) + i_1 z_1 (1 + y_2 z_A) ; \end{aligned}$$

$$u_{1,Th} (3 + y_0 z_A + y_2 z_A) = i_1 z_1 (3 + y_0 z_A + y_1 z_A + y_2 z_A) ;$$

$$u_{1,Th} [3 + z_A (y_0 + y_2)] = i_1 z_1 [3 + z_A (y_0 + y_1 + y_2)] ;$$

$$i_1 = \frac{u_{1,Th} [3 + z_A (y_0 + y_2)]}{z_1 [3 + z_A (y_0 + y_1 + y_2)]} = \frac{u_{1,Th} (3y_A + y_0 + y_2)}{z_1 (3y_A + y_0 + y_1 + y_2)} \quad (\text{B.10})$$

$$\begin{aligned} i_0 = y_2 (i_1 z_1 - u_{1,Th}) y_0 z_2 = u_{1,Th} y_0 \left[ \frac{(3y_A + y_0 + y_2)}{(3y_A + y_0 + y_1 + y_2)} - 1 \right] = \\ \frac{-u_{1,Th} y_0 y_1}{3y_A + y_0 + y_1 + y_2} \quad (\text{B.11}) \end{aligned}$$

$$i_2 = i_0 z_0 y_2 = \frac{-u_{1,Th} y_2 y_1}{3y_A + y_0 + y_1 + y_2} \quad (\text{B.12})$$

### B.3.4. Fase abierta

Basta con particularizar, en (B.10), (B.11) y (B.12)  $y_A = 0$ ; así:

$$i_0 = \frac{-u_{1,Th} y_0 y_1}{y_0 + y_1 + y_2} ; i_1 = \frac{u_{1,Th} y_1 (y_0 + y_2)}{(y_0 + y_1 + y_2)} ; i_2 = \frac{-u_{1,Th} y_2 y_1}{y_0 + y_1 + y_2}$$

## B.4. Redes unitarias de secuencia

En fig. B.2, redes unitarias de secuencia, para cálculo de impedancias Thévenin a ambos lados del desequilibrio (puntos P y Q). Por simplicidad, se asumen impedancias de secuencia (1) y (2) idénticas.

### B.4.1. Impedancias / admitancias de secuencia

#### B.4.1.1 Secuencias (1) y (2)

##### B.4.1.1.1. Lado carga

$$z_1^Q = z_2^Q = (1 - \lambda) r_1^{CF} + j(1 - \lambda) x_1^{CF} + \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}}$$

Asumiendo

$$|(1 - \lambda) r_1^{CF} + j(1 - \lambda) x_1^{CF}| \ll \left| \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}} \right|,$$

entonces

$$z_1^Q = z_2^Q \cong \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}}.$$

**Observación:**  $(z_1^Q)$  constituye la impedancia de carga del circuito analizado.

##### B.4.1.1.2. Lado fuente

$$z_1^P = z_2^P = \lambda r_1^{CF} + j\lambda x_1^{CF} + \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} \left[ \frac{1}{r_1^{CV_i} + jx_1^{CV_i} + \frac{1}{p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}}} \right] + \frac{1}{z_{1,AT} + jx_T}}$$

Asumiendo

$$\left| r_1^{CV_i} + jx_1^{CV_i} \right| \ll \frac{1}{\left| p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i} \right|}, \forall (i),$$

entonces

$$z_1^P = z_2^P \cong \lambda r_1^{CF} + j\lambda x_1^{CF} + \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} \left[ p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i} \right] + \frac{1}{z_{1,AT} + jx_T}}.$$

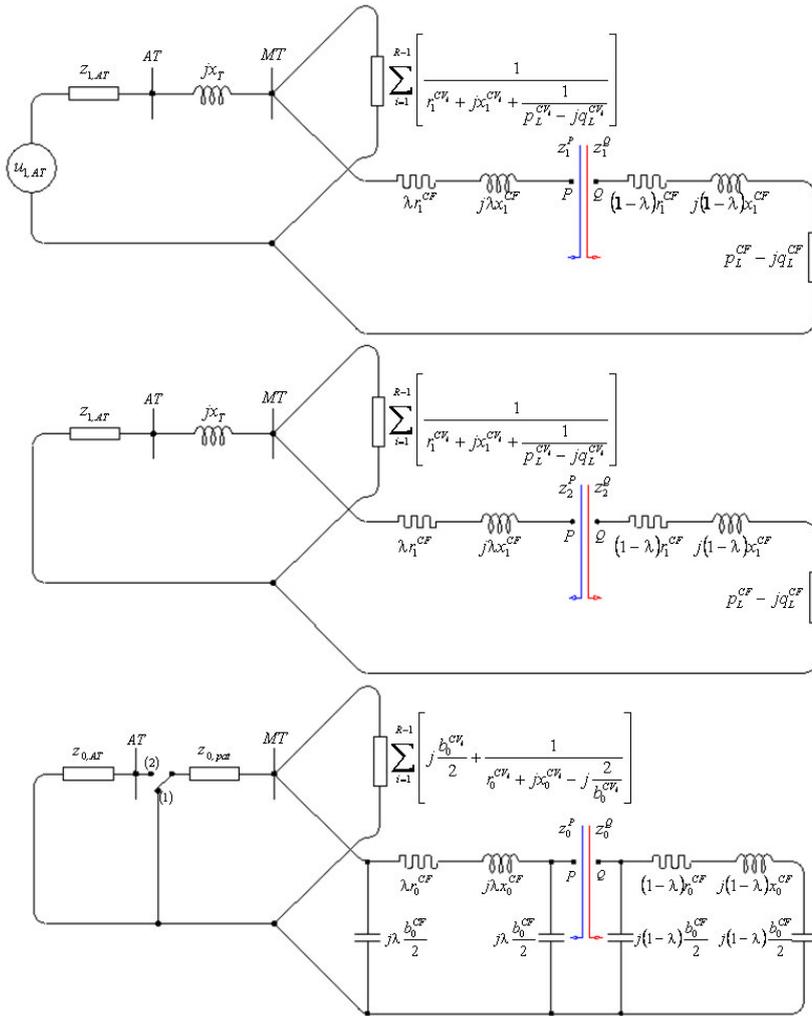


Figura B.2: Esquema unitario, redes de secuencia, desequilibrio serie. Impedancias Thévenin a ambos lados del defecto. De arriba abajo, secuencias (1), (2) y (0).

## B.4.1.1.3. Total

$$z_1 = z_2 = z_1^P + z_1^Q \cong \lambda r_1^{CF} + j\lambda x_1^{CF} + \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} [p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}] + \frac{1}{z_{1,AT} + jx_T}} + \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}} .$$

De satisfacerse

$$|z_{1,AT}| \ll |x_T| ,$$

finalmente

$$z_1 = z_2 = z_1^P + z_1^Q \cong \lambda r_1^{CF} + j\lambda x_1^{CF} + \frac{1}{\sum_{i=1}^{R-1} [p_L^{CV_i} - jq_L^{CV_i}] - \frac{j}{x_T}} + \frac{1}{p_L^{CF} - jq_L^{CF}} .$$

## B.4.1.2. Secuencia (0)

## B.4.1.2.1. Lado carga

$$y_0^Q = j(1-\lambda) \frac{b_0^{CF}}{2} + \frac{1}{(1-\lambda)r_0^{CF} + j(1-\lambda)x_0^{CF} - j\frac{2}{(1-\lambda)b_0^{CF}}}$$

Asumiendo

$$|(1-\lambda)r_0^{CF} + j(1-\lambda)x_0^{CF}| \ll \frac{2}{(1-\lambda)b_0^{CF}} ,$$

entonces

$$y_0^Q \cong j(1-\lambda)b_0^{CF} .$$

## B.4.1.2.2. Lado fuente

Asumiendo, para conmutador fig. B.2 en posición (2):

$$z_{0,pat} \gg z_{0,AT} ,$$

puede escribirse una expresión única independiente a la posición del mismo:

$$y_0^P = j\lambda \frac{b_0^{CF}}{2} + \frac{1}{\lambda r_0^{CF} + j\lambda x_0^{CF} + \frac{1}{j\lambda \frac{b_0^{CF}}{2} + \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j\frac{b_0^{CV_i}}{2} + \frac{1}{r_0^{CV_i} + jx_0^{CV_i} - j\frac{2}{b_0^{CV_i}}} \right]} + \frac{1}{z_{0,pat}}} .$$

Asumiendo

$$\left| r_0^{CV_i} + jx_0^{CV_i} \right| \ll \frac{2}{b_0^{CV_i}}, \forall (i) ,$$

entonces

$$y_0^P = j\lambda \frac{b_0^{CF}}{2} + \frac{1}{\lambda r_0^{CF} + j\lambda x_0^{CF} + \frac{1}{j\lambda \frac{b_0^{CF}}{2} + \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j b_0^{CV_i} \right] + \frac{1}{z_{0,pat}}}} .$$

Asumiendo

$$\left| \lambda r_0^{CF} + j\lambda x_0^{CF} \right| \ll \frac{1}{\left| j\lambda \frac{b_0^{CF}}{2} + \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j b_0^{CV_i} \right] + \frac{1}{z_{0,pat}} \right|} ,$$

entonces

$$y_0^P = j\lambda b_0^{CF} + \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j b_0^{CV_i} \right] + \frac{1}{z_{0,pat}} .$$

B.4.1.2.3. Total

$$z_0 = z_0^P + z_0^Q \cong \frac{1}{j\lambda b_0^{CF} + \sum_{i=1}^{R-1} \left[ j b_0^{CV_i} \right] + \frac{1}{z_{0,pat}}} - \frac{j}{(1-\lambda) b_0^{CF}} .$$

**Observación:** para desequilibrios muy alejados de cabecera ( $\lambda \rightarrow 1$ ):

$$\lim_{\lambda \rightarrow 1} [z_0] = \infty \rightarrow \lim_{\lambda \rightarrow 1} [y_0] = 0 .$$

## B.5. Recopilatorio: intensidades de secuencia frente a escenario

**Observación:** se asume, para todos los casos  $y_1 = y_2 \rightarrow z_1 = z_2$ . De no verificarse deben retomarse expresiones obtenidas en sección B.2 y apartados B.3.3 y B.3.4.

Tabla II. Determinación intensidades unitarias de secuencia para algunos desequilibrios serie. En el caso general, debe resolverse un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas.

Caso general: resolución sistema	
$u_{1,Th} = i_0(z_0 + z_A) + i_1(z_1 + z_A) + i_2(z_1 + z_A)$ $u_{1,Th} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0 + z_B) + i_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_B) + i_2 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_B)$ $u_{1,Th} e^{j\frac{2\pi}{3}} = i_0(z_0 + z_C) + i_1 e^{j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_C) + i_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}}(z_1 + z_C)$	
Impedancia serie en una fase	Fase abierta
$i_1 = \frac{u_{1,Th}(3y_A + y_0 + y_1)}{z_1(3y_A + y_0 + 2y_1)}$	$i_1 = \frac{u_{1,Th}(y_0 + y_1)}{z_1 y_0 + 2}$
$i_2 = \frac{-u_{1,Th} y_1^2}{3y_A + y_0 + 2y_1}$	$i_2 = \frac{-u_{1,Th} y_1}{z_1 y_0 + 2}$
$i_0 = \frac{-u_{1,Th} y_0 y_1}{3y_A + y_0 + 2y_1}$	$i_0 = \frac{-u_{1,Th} y_0}{z_1 y_0 + 2}$

## B.6. Conclusiones

En general, los desequilibrios serie en redes MT dan lugar a intensidades de secuencia directa, inversa y homopolar; éstas últimas son producidas por las capacidades de secuencia (0) asociadas a los circuitos, y pueden darse tanto en régimen de neutro aislado como en régimen de neutro conectado a tierra (rígidamente o mediante impedancia).

Para todo circuito, la intensidad de secuencia homopolar es mayor cuanto más próximo se encuentra el desequilibrio serie a la cabecera (fuente). Por el contrario, para desequilibrios alejados de la cabecera, la intensidad de secuencia (0) puede resultar despreciable, o prácticamente nula.

Teniendo en cuenta dicha dispersión, la metodología para detección de desequilibrios serie debe fundamentarse, principalmente, en la medida de intensidades secuencia (2), y la comparación de éstas con la intensidad de secuencia (1) anterior y posterior al desequilibrio.

SE ACABÓ  
DE IMPRIMIR  
ESTE LIBRO EL DÍA  
2 DE DICIEMBRE  
DEL AÑO  
2013



**E**ste libro tiene como objetivo principal servir de guía a los ingenieros de protecciones en las compañías eléctricas de distribución en la difícil y comprometida tarea de ajustar los relés de protección en redes radiales de media tensión.

Escrito por dos expertos en la materia (tanto del mundo de las distribuidoras como del universitario), incluye un detallado análisis matemático de los criterios de ajuste de las funciones de protección empleadas en dichas redes (51F, 50F, 51F+51TD, 51N, 51N+51N,TD y 67N), tanto con neutro impedante como aislado (no se incluye el neutro resonante).

Además se discute en un capítulo específico el problema de las faltas muy impedantes y su detección. Los apéndices aclaratorios permiten que el lector pueda reproducir la mayoría de las fórmulas obtenidas en caso de defectos asimétricos, tema algo árido para los nuevos ingenieros.



CÁTEDRA ENDESA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

