



POTÊNCIA TOTALMENTE INTEGRADA

Série Técnica 20

Dimensionamento de Condutores de Proteção em Subestações

SIEMENS

Dimensionamento do condutor de proteção em Subestações

Planejadores e instaladores estão regularmente enfrentando a questão de como o arranjo de aterramento do sistema de alimentação elétrica fornecido deve ser idealmente configurado e quais aspectos devem ser considerados para o dimensionamento das conexões do condutor de proteção.



Esta publicação técnica descreve diferentes opções de projeto para arranjos de aterramento na área de uma subestação de transformadores múltiplos e aponta os cenários de curto-circuito para o correto dimensionamento dos condutores de proteção e condutores de ligação de proteção nos níveis de média e baixa tensão.

Os fundamentos e os termos selecionados são baseados nas especificações da norma IEC 60364-5-54.

Conteúdo

1

Normas de base e definições técnicas

Terminal de aterramento principal
Ligação equipotencial de proteção
Ligação equipotencial de proteção em direção ao barramento de aterramento principal
Terminal de ligação equipotencial suplementar
Ligação equipotencial de proteção na sala de serviço elétrico
Condutor de proteção

2

Arranjo de aterramento – opções de design, análise de curto-circuito

Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador
sistema TN-C, opção frequente na prática
sistema TN-CS, opção recomendada

3

Dimensionamento do condutor de proteção – lado secundário do transformador

Exemplo de aplicação Sistema TN-C-S, opção recomendada
Conexão 1 (material rodante do transformador – TET)
Conexão 2 (invólucro do transformador – TET)
Conexão 3 (TET – EB)
Conexão 4 (barramento PE no LVMD – TES)
Conexão 5 (barramento MET – PE no LVMD)

4

Descobertas – dimensionamento do condutor de proteção, lado secundário do transformador

5

Arranjo de aterramento - lado primário do transformador

Requisitos normativos

Sistema isolado/compensado

Sistema solidamente aterrado/impedância aterrado
Configuração de aterramento –

lado primário do transformador
Dimensionamento do condutor de proteção em um sistema isolado/compensado

Análises de pior caso – SEM divisão de corrente

Análises de pior caso – COM divisão de corrente

Dimensionamento do condutor de proteção em um sistema solidamente aterrado/aterrado de impedância

Análises de pior caso – SEM divisão de corrente

Análises de pior caso – COM divisão de corrente

Opção de projeto – Desconexão do arranjo de aterramento no lado primário e secundário

6

Descobertas - arranjo de aterramento, lado primário do transformador

7

Energia totalmente integrada – suporte individual ao projeto

1 Normas básicas e definições técnicas

De acordo com a norma, um "arranjo de aterramento" refere-se a todas as conexões e dispositivos elétricos necessários para aterrar um sistema, instalação ou equipamento. Seguindo a IEC 60364-5-54 Cláusula 542, o arranjo de aterramento correspondente deve ser configurado quando uma nova rede elétrica for instalada.

Um arranjo de aterramento é usado principalmente para fins de proteção, como a proteção contra choque elétrico de acordo com a IEC 60364-4-41, bem como para a instalação de uma ligação equipotencial de proteção em caso de falha. De acordo com IEC 60364-5-54 Cláusula 542.1.4, um arranjo de aterramento incl. as conexões associadas deve ser projetado de forma que possa transportar as correntes de falha máximas até a desconexão completa pelo(s) dispositivo(s) de proteção existente(s) de forma segura e confiável. Nenhum perigo pode surgir de tensões térmicas, termomecânicas ou eletromecânicas.

Além disso, um arranjo de aterramento também pode ser usado para fins funcionais, mas isso não é especificado mais detalhadamente neste documento.

1.1 Terminal de aterramento principal

De acordo com a IEC 60364-5-54 Cláusula 542.4.1, todo sistema no qual uma ligação equipotencial de proteção é implementada deve ser equipado com um terminal de aterramento principal (MET). Os condutores de ligação de proteção, condutores de aterramento, condutores de proteção e condutores funcionais devem ser conectados ao terminal de aterramento principal.

Se houver vários terminais de aterramento instalados no edifício, eles também devem ser interconectados.



1.2 Ligação equipotencial protetora

O objetivo de uma ligação equipotencial protetora é evitar que peças condutoras estruturais ou metálicas adotem uma diferença de potencial perigosa que possa ser tocada por pessoas ou gado (IEC 60364-4-41 Cláusula 411.3.1.2). Por esse motivo, as partes condutoras estruturais devem ser incluídas na ligação equipotencial de proteção, mesmo que não façam parte da instalação elétrica.

Deve-se observar na fase de concepção e projeto que, por razões de compatibilidade eletromagnética (EMC), nenhuma corrente flui através do arranjo de aterramento em operação regular de rede.

A Fig. 1/1 mostra o projeto geral de uma ligação equipotencial protetora como exemplo.

1.2.1 Ligação equipotencial protetora em direção ao barramento de aterramento principal

As conexões pertencentes à ligação equipotencial protetora são marcadas com os números 1, 2 e 3 na Fig. 1/1. De acordo com os objetivos da norma, a ligação equipotencial de proteção consiste em conexões (cabo) que servem para criar uma ligação equipotencial de proteção e são conectadas ao terminal de aterramento principal (MET) para esse fim.

De acordo com a IEC 60364-5-54 Cláusula 544.1, as conexões (cabo) fornecidas para este objetivo de proteção requerem uma seção transversal mínima de 6 mm² de cobre, ou 16 mm² de alumínio, ou 50 mm² de aço.

O dimensionamento de seções transversais superiores a 25 mm² de cobre (ou outros materiais condutores com condutividade comparável) não é necessário, desde que não sejam esperadas altas correntes de falha que possam fluir através de um condutor de ligação de proteção das fontes de alimentação (transformadores) - dependendo do conceito de aterramento selecionado. Se isso não puder ser excluído, os condutores de ligação de proteção devem ser considerados condutores de proteção e dimensionados de acordo (nota normativa na IEC 60364-5-54 Cláusula 544.1).

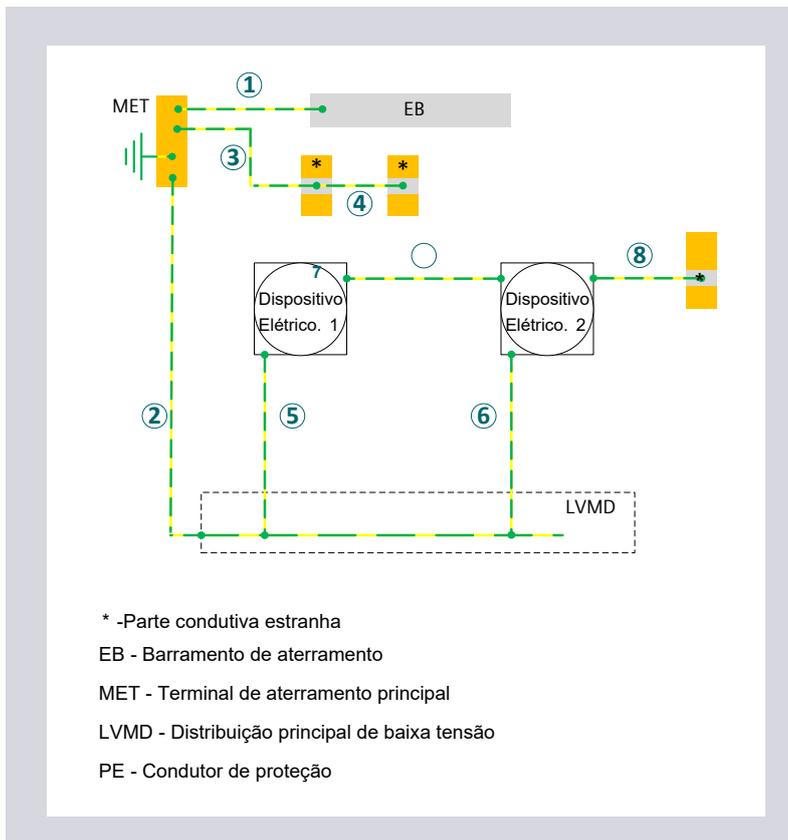


Fig. 1/1: Exemplo de um arranjo de aterramento com conexões de condutor de proteção e conexões de ligação equipotencial de proteção

1.2.2 Terminal de ligação equipotencial suplementar

Se a desconexão automática da fonte de alimentação não puder ser alcançada dentro do tempo de desconexão exigido pela norma (IEC 60364-4-41 Cláusulas 411.3.2.2 a 411.3.2.4), um terminal de ligação equipotencial suplementar (SEBT) deve ser fornecido de acordo com as Cláusulas 411.3.2.5 e 411.3.2.6.

Todas as partes condutoras expostas de acesso simultâneo de equipamentos de montagem fixa (por exemplo, área da mão) e partes condutoras externas devem ser incluídas neste terminal de ligação equipotencial flexível (se possível, incluindo a armadura principal de ferroconcreto).

A resistência R do terminal de ligação equipotencial suplementar entre partes condutoras expostas e partes condutoras estranhas acessíveis simultaneamente pode, no máximo, ser tão grande que atenda à seguinte condição:

$$\frac{R \leq 50 V_{CA}}{I_a} \quad I_a \text{ corrente de desconexão do RCD (banda de tolerância superior)}$$

A seção transversal do condutor do terminal de ligação equipotencial suplementar deve ser dimensionada da seguinte forma, de acordo com a IEC 60364-5-54, Cláusula 544.2:

Estudo de caso 1 (Cláusula 544.2.1) – A ligação equipotencial suplementar interliga duas partes condutoras expostas de equipamento elétrico

Na Fig. 1/1, a ligação equipotencial suplementar é estabelecida entre duas partes condutoras expostas de equipamento elétrico através da conexão 7 (seção transversal do condutor SSEBT). Os condutores de proteção conectados (conexões 5 e 6) possuem as seções transversais de condutor S_{PE1} e S_{PE2} .

A condutividade da ligação equipotencial suplementar deve, no mínimo, corresponder à do condutor de proteção com a menor condutividade. Se as conexões forem do mesmo material condutor (p. ex., cobre), aplica-se o seguinte:

$$\text{If } S_{PE1} < S_{PE2}, \text{ then } S_{SEBT} \geq S_{PE1}$$

Estudo de caso 2 (Cláusula 544.2.2) – O SEBT interconecta uma parte condutora exposta de um equipamento elétrico com uma parte condutora externa

Na Fig. 1/1, a conexão 8 representa o SEBT (seção transversal do condutor S_{SEBT}) entre uma parte condutora exposta de um equipamento elétrico e uma parte condutora externa. O condutor de proteção conectado (conexão 6) apresenta a seção transversal S_{PE2} .

A condutividade da ligação equipotencial suplementar deve, no mínimo, corresponder à metade da condutividade do condutor de proteção. Se as conexões forem do mesmo material condutor (p. ex., cobre), resulta o seguinte:

$$S_{SEBT} \geq 0.5 S_{PE2}$$

Estudo de caso 3 (Cláusula 544.2.3) – A ligação equipotencial suplementar interliga duas partes condutivas estranhas

Na Fig. 1/1, a conexão 4 representa a ligação equipotencial suplementar entre duas partes condutivas estranhas. De acordo com a Cláusula 543.1.3, a ligação equipotencial suplementar deve apresentar as seguintes seções transversais mínimas, a menos que seja parte de um cabo ou não esteja localizada no mesmo invólucro que os condutores de linha:

- * Para proteção mecânica contra danos:
2,5 mm² de cobre ou 16 mm² de alumínio
- * Sem proteção mecânica contra danos:
4 mm² de cobre ou 16 mm² de alumínio

A proteção mecânica é fornecida, por exemplo, quando instalado em um eletroduto, em uma canaleta de fiação ou de forma semelhante.

1.2.3 Ligação equipotencial de proteção na sala de serviço elétrico

A lista a seguir mostra uma seleção exemplar de peças condutoras expostas que são comumente encontradas em uma sala de serviço elétrico:

Peças condutoras estranhas, como grades para porões de cabos ou pisos duplos; paredes treliçadas para separação espacial (aparelhagem de média tensão para a transferência do operador do sistema de distribuição (DSO) para o cliente, células transformadoras, etc.); portas e caixilhos de portas; vigas de aço; sistemas de suporte de cabos; roteamento de cabos / estruturas de suporte (para conexões de transformadores do lado primário e secundário); equipamentos de ventilação de salas; trilhos-guia de transformadores; etc.

Peças condutoras expostas de dispositivos elétricos / equipamentos operacionais, como condutores concêntricos / blindagens / armaduras de cabos e fios; material rodante de transformador, invólucro de transformador; etc.

A integração das peças acima mencionadas em uma ligação equipotencial de proteção ou em um arranjo de aterramento é descrita nas seguintes normas:

- VDE-AR-N 4110 Cláusula 6.2.4 (Regras Técnicas de Conexão para Média Tensão)
- DIN EN 50522 Cláusula 7.3 e Anexo G (Aterramento de instalações de energia superior a 1 kV ca)
- IEC 60364-4-41 Cláusula 411.3.1.2

A redação da norma VDE-AR-N 4110 Cláusula 6.2.4 é a seguinte (tradução):

"As partes metálicas tocáveis de equipamentos elétricos (peças) não pertencentes ao circuito operacional, que são parte integrante da rede elétrica, devem ser aterradas. As peças metálicas não pertencentes a equipamentos elétricos devem ser aterradas se puderem surgir tensões perigosas em caso de falha, por ex.ample, devido a uma falha de arco.

Estes incluem: escadas metálicas, caixilhos de portas, grades de ventilação, flanges metálicos de buchas, armações metálicas de comutadores e grades de proteção.

Para fazer isso na prática, um barramento de aterramento circunferencial (EB) é instalado em cada sala de serviço, implementado como tira de aço ou barra de cobre, por exemplo. As peças acima mencionadas podem ser conectadas a ele de forma flexível por meio de conexões destacáveis.

Se, por exemplo, um transformador for instalado localmente em seu próprio invólucro (por exemplo, subestação do centro de carga), todas as partes condutoras expostas próximas ao transformador são integradas na ligação equipotencial de proteção por meio de um terminal de aterramento do transformador (TET) localizado em sua vizinhança imediata (por exemplo, na parede ou no invólucro do transformador).



Fig. 1/2: Peças condutoras expostas em uma sala de serviço elétrico

DIN EN 50216-4 A cláusula 5 define as formas e dimensões das pinças de aterramento para transformadores de enchimento de líquido ou transformadores do tipo seco (série padrão DIN EN 60076 para transformadores de potência ou DIN EN 50464 para transformadores de distribuição trifásicos). De acordo com o mesmo, os grampos de aterramento tipo B1 devem apresentar uma resistência ao curto-circuito de aprox. 38 kA por 1 s (Fig. 1/3).

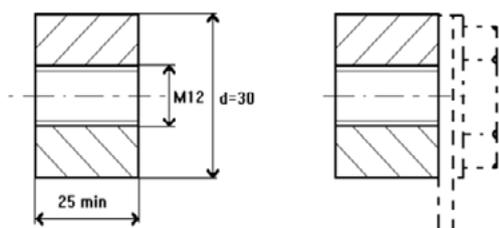


Fig. 1/3: Ligação à terra tipo B1 de acordo com DIN EN 50216-4

Comentário

Como regra, os transformadores de distribuição têm dois terminais de aterramento opostos em seu material rodante. Se forem esperadas correntes de falta muito altas no caso de uma falha (condutor de linha contra material rodante), vários terminais de aterramento devem ser levados em consideração no material rodante ou no tender (Fig. 1/2, Tópico nº 4).

1.3 Condutor de proteção

O condutor de proteção (condutor PE) serve ao propósito de segurança pessoal para proteção contra choque elétrico (IEC 60364-4-41). No caso de uma falha no corpo de um equipamento elétrico (condutor de linha contra o invólucro condutor), um loop de falha de baixa impedância deve ser estabelecido, o que resulta em uma corrente de falha suficientemente maior e, portanto, faz com que o equipamento de proteção desarme.

Em sistemas TN, o alimentador de entrada do transformador deve ser desconectado dentro de 5 s de acordo com IEC 60364-4-41 Cláusula 411.3.2.3.

Se dispositivos de proteção contra sobrecorrente forem usados para proteção contra choque elétrico, a Cláusula 543.8 da IEC 60364-5-54 solicita que o condutor de proteção seja colocado junto com os condutores ativos (condutores de fase e neutro) no mesmo cabo ou em sua vizinhança imediata. Em relação à seção transversal mínima do condutor, o condutor de proteção deve ser dimensionado o suficiente para poder transmitir as correntes de falha decorrentes com segurança e suportar o estresse térmico.

suportar com segurança as correntes de falta que surgem e resistir ao estresse térmico.

O dimensionamento da seção transversal do condutor, bem como a sua verificação, devem ser feitos de acordo com a IEC 60364-5-54, Cláusula 543.1.2 ou Tabela 54.2.

De acordo com a Cláusula 543.1.2, a seguinte equação matemática se aplica ao dimensionamento da resistência a curto-circuito dos condutores de proteção para tempos de desconexão de até 5 s, inclusive:

$$S^2 k^2 \geq I^2 t ; S = \sqrt{\frac{I^2 t}{k^2}}$$

Em princípio, esta equação também é aplicável a tempos de desconexão > 5 s, mas a dissipação de calor para o ambiente também deve ser levada em conta ao determinar a capacidade de condução de corrente térmica (IEC 60949).

A capacidade de condução de corrente térmica de um cabo corresponde ao produto $\sqrt{S^2 k^2}$, que é composto pela seção transversal do condutor S (em mm²) e pelo coeficiente do material k (em A \sqrt{s} /mm²). Os valores para k são fornecidos na tabela no Anexo A da IEC 60364-5-54 para o respectivo método de instalação do condutor de proteção:

- * A54.2 - Valores de k para condutores de proteção isolados não incorporados em cabos e não agrupados com outros cabos.
- * A54.3 - Valores de k para condutores de proteção nus em contato com a cobertura do cabo, mas não agrupados com outros cabos.
- * A54.4 - Valores de k para condutores de proteção como uma alma incorporada em um cabo ou agrupados com outros cabos ou condutores isolados.
- * A54.5 - Valores de k para condutores de proteção como uma camada metálica de um cabo, p. ex., armadura, bainha metálica, condutor concêntrico, etc.
- * A54.6 - Valores de k para condutores nus onde não há risco de dano a qualquer material vizinho pela temperatura indicada.

O produto I^2t é uma designação para a quantidade (máxima) de energia que um dispositivo de proteção "deixou passar" até a desconexão completa de uma corrente de falha.

Para o valor I , deve-se usar a corrente de curto-circuito ou de falha (em A). Para o valor t , deve ser utilizado o valor temporal (em s) para o intervalo de tempo entre a ocorrência do curto-circuito ou da avaria e a desconexão completa (extinção completa do arco elétrico no dispositivo de proteção).

Por se tratar de uma análise de pior caso (quantidade máxima de energia), a relação corrente-tempo desfavorável é decisiva para uma verificação correta da resistência suportável ao curto-circuito de uma seção transversal do condutor.

Como regra, este valor resulta ao considerar a corrente máxima de falha I_{kmax} no local de montagem em combinação com o tempo de desconexão associado do dispositivo de proteção.

Ao usar equipamentos de proteção limitadores de corrente (por exemplo, fusíveis, disjuntores em caixa moldada ou disjuntores de circuito em miniatura), não é mais o valor de curto-circuito prospectivo I_{kmax} que deve ser usado para esta verificação em caso de desconexão em um intervalo de tempo < 100 ms, mas o valor de energia específico do produto. Geralmente, esses valores são fornecidos pelos fabricantes de dispositivos de comutação com base nas curvas de energia de passagem dependentes da tensão.

Caso a seção transversal do condutor calculada não resulte em uma seção transversal do condutor padrão, a próxima seção transversal do condutor padrão maior deve ser selecionada.

A seção transversal mínima do condutor de proteção (consulte a guia 1/1) é dimensionada com base na seção transversal do condutor de linha. É feita uma distinção aqui se a linha e os condutores de proteção são feitos de materiais idênticos ou diferentes.

Se o condutor de proteção não fizer parte do cabo ou não estiver contido em um invólucro comum com os condutores de linha, sua seção transversal do condutor deve ser dimensionada da mesma forma que no [Cap. 1.2.2, Estudo de caso 3](#).

Seção transversal do condutor de linha S em mm^2	Seção transversal mínima do condutor de proteção associado em mm^2	
	Condutor de proteção e condutor de linha com material idêntico	Material condutor de proteção \leftrightarrow material condutor de linha
$S \leq 16$	S	$(k^1 / k^2) \times S$
$16 < S \leq 35$	$16^{1)}$	$(kkm / 2 ms) \times 16$
$S > 35$	$S / 2^{1)}$	$(k^1 / k^2) \times (S / 2)$

k^1 Valor para o condutor de linha, determinado por equação de acordo com IEC 60364-5-54 Anexo A ou da Tabela A-54.4, considerando o material correspondente para condutor e isolamento

k^2 Valor para o condutor de proteção, de acordo com as tabelas A.54.2 a A.54.6, dependendo da usabilidade

1) Redução do condutor PEN permitido em conformidade com as regras de dimensionamento para condutores neutros de acordo com DIN VDE 0100-520

1/1: Seções transversais mínimas para condutores de proteção de acordo com IEC 60364-5-54

2 Arranjo de aterramento – opções de design, análise de curto-circuito

Este capítulo aponta diferentes opções de projeto para o arranjo de aterramento de uma subestação de transformadores múltiplos na área da distribuição principal de baixa tensão (LVMD). As análises de pior caso são usadas para descobrir quais condições de curto-circuito resultam na respectiva opção de dimensionamento.

Os conceitos de aterramento e a determinação da seção transversal das conexões do condutor de proteção no lado primário da subestação de transformadores múltiplos são descritos no [Cap. 3](#).

Quanto às análises de pior caso mostradas, presume-se que os transformadores conectados em paralelo tenham classificações idênticas e que alimentem correntes de falta e curto-circuito de quase o mesmo tamanho nos locais de falta correspondentes.

$$I_{F,Tr1} \approx I_{F,Tr2} \approx I_{F,Tr3}$$

Portanto, é suficiente explicar as condições de curto-circuito decorrentes de forma exemplar por meio de um transformador e derivar o dimensionamento da seção transversal das conexões do condutor de proteção a partir dessa base.

Nas figuras mostradas, triângulos coloridos identificam a corrente de falta total resultante do transformador correspondente. As correntes de falta parciais associadas são exibidas como triângulos brancos com o mesmo contorno de cor. Isso ajuda a reconhecer os caminhos de corrente da corrente de falta correspondente.

2.1 Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador

Esta opção de dimensionamento refere-se a um sistema TN-S a partir dos terminais secundários do transformador. O ponto neutro de cada transformador é extraído e conectado ao terminal de aterramento do transformador (TET). A conexão do condutor ao LVMD é implementada como uma conexão de 5 polos (L^1 , L , $L^{2,3}$, condutor N e condutor PE).

Nesta configuração de rede, vários pontos centrais de aterramento (CEP) são conectados em paralelo. Dependendo dos comprimentos dos cabos de conexão entre o transformador e o LVMD, correntes de condutor neutro já podem surgir em operação normal, que fluem parcialmente de volta para os transformadores através do condutor de proteção e do condutor de ligação de proteção. A consequência é um impacto negativo na compatibilidade eletromagnética (EMC) da rede.

Com base nessa configuração de rede, são descritos vários casos de falha e correntes de curto-circuito (parciais) resultantes, que são cruciais para a dimensão da seção transversal das conexões do condutor de proteção. Os locais de falha analisados são marcados nas figuras com um símbolo de relâmpago vermelho.

As distribuições de corrente são determinadas aproximadamente com base nas resistências das conexões do condutor.

2.1.1 Caso de falha 1: fase contra o material rodante do transformador

No caso de uma falta na carcaça do transformador (Fig. 2/1, local da falta F1), resultam os seguintes fluxos de corrente de falta:

O transformador 1 alimenta a corrente de falta $I_{F,Tr1}$ diretamente no local da falta F1. Os transformadores 2 e 3 alimentam as correntes de falta $I_{F,Tr2}$ e $I_{F,Tr3}$ no local da falta F1 através dos caminhos de corrente do LVMD. Nesse ponto, elas se somam, formando a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$.

$$I_{F,Tr1,2,3} = \sum_{x=1}^{n=3} I_{F,Trx}$$

A partir do local da falta F1, a $I_{F,Tr1,2,3}$ flui primeiro para o terminal de aterramento do transformador (TET) através da conexão 1. Nesse ponto, a $I_{F,Tr1,2,3}$ se divide novamente em correntes de falta parciais para fluir de volta para as respectivas fontes de alimentação por diferentes caminhos de corrente.

Conexão 1 (carcaça do transformador – TET)

A conexão 1 é a conexão mais solicitada, pois deve transportar a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$ do local da falta para o TET.

$$I_{F,Cn.1} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Conexão 2 (invólucro do transformador – TET)

Neste caso de falta, nenhuma corrente de falta flui através da conexão 2.

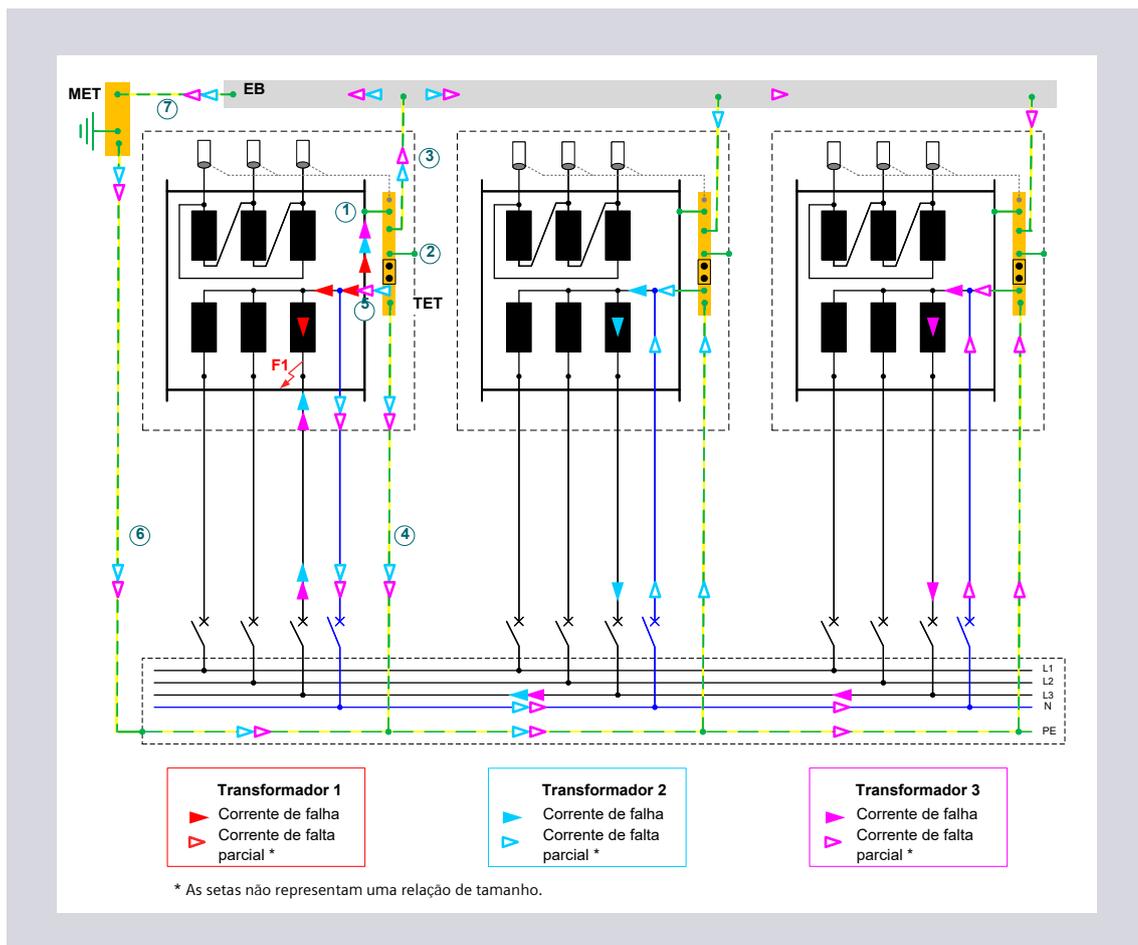


Figura 2/1: Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador: Esquema para o caso de falta 1

Conexão 3 (TET – EB)

As alimentações do transformador são integradas em uma ligação equipotencial de proteção comum através do barramento de aterramento (EB) e das conexões 3. As conexões 3 devem ser dimensionadas de forma análoga ao Cap. 1.2.2, Estudo de caso 1, uma vez que o barramento de aterramento serve como um terminal/barragem de conexão.

Em caso de falta, a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$ surge no TET. A corrente de falta $I_{F,Tr1}$ flui diretamente de volta para a sua fonte de alimentação através da conexão 5.

No pior caso, ou seja, quando a impedância da conexão 3 é desprezivelmente pequena em comparação com a impedância dos condutores N e PE, a corrente de falta restante dos transformadores 2 e 3 flui através desta conexão. No exemplo de rede mostrado (Fig. 2/1), ela deve ser dimensionada para o dobro da corrente de falta de um transformador.

$$I_{F,Cn.3} = I_{F,Tr2,3} = 2 I_{F,Tr}$$

Conexão 4 (transformador de conexão do condutor PE – LVMD)

Como as reatâncias das conexões 3, 6 e 7 no sistema de sequência positiva e zero são desconhecidas ou difíceis de determinar devido à configuração da rede, as correntes máximas de falta que fluem através do condutor PE (conexão 4) são estimadas.

Assume-se que as parcelas da corrente de falta através das conexões 3, 6 e 7 são desprezivelmente pequenas. Consequentemente, a corrente de falta total dos três transformadores $I_{F,Tr1,2,3}$ se divide a partir do TET. A corrente de falta $I_{F,Tr1}$ do transformador 1 flui diretamente de volta para sua fonte de alimentação através da conexão 5. A divisão da corrente de falta $I_{F,Tr2,3}$ dos transformadores 2 e 3 depende da relação de impedância entre o condutor PE e o condutor N (Fig. 2/1).

Se as seções transversais do condutor N e do condutor PE forem idênticas $S_{PE} = S_N$, metade da corrente de falta $I_{F,Tr2,3}$ flui através de cada condutor. Para o exemplo de rede selecionado (Fig. 2/1), isso significa que a corrente de falta de um transformador flui através de cada um desses condutores.

$$I_{F,Cn.4} = I_{F,PE} = I_{F,N} = \frac{I_{F,Tr2,3}}{2} = \frac{2 \times I_{F,Tr}}{2} = I_{F,Tr}$$

Se o condutor PE for executado com uma seção transversal reduzida $S_{PE} \approx \frac{1}{2} S_N$, a menor resistência do condutor N resultará em uma parcela maior da corrente de falta fluindo através da conexão 5 e do condutor $R_{PE} \approx 2 \cdot R_N = 2 \cdot R$. Com e se as reatâncias forem ignoradas, o resultado é um esquema simplificado para o pior caso:

$$I_{F,PE} = \frac{R}{R + 2R} \times I_{F,Tr2,3} = \frac{1}{3} I_{F,Tr2,3} = \frac{1}{3} \cdot 2 I_{F,Tr} = \frac{2}{3} I_{F,Tr}$$

$$I_{F,N} = \frac{2R}{R + 2R} \times I_{F,Tr2,3} = \frac{2}{3} \times 2 I_{F,Tr} = 1 \frac{1}{3} I_{F,Tr}$$

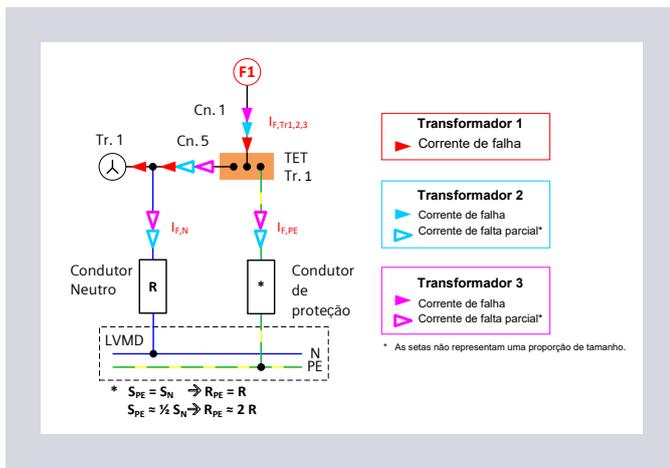


Fig. 2/2: Caso de falta 1 – distribuição da corrente de falta para o condutor N e o condutor PE na área do TET

Observação

A maior corrente de falta através do condutor PE flui no caso de falta 2 (Cap. 2.1.2).

Conexão 5 (TET – ponto neutro do transformador 1)

Como já determinado para a conexão 4, no pior caso ($S_{PE} \approx \frac{1}{2} S_N$), não flui apenas $I_{F,Tr1}$ através da conexão 5, mas adicionalmente $\frac{2}{3} I_{F,Tr2,3}$.

$$I_{F,Cn.5} = I_{F,Tr1} + \frac{2}{3} I_{F,Tr2,3} = \left(1 + \frac{1}{3}\right) I_{F,Tr} = 1 \frac{1}{3} I_{F,Tr}$$

Como uma corrente total superior ao dobro da corrente de falta de um transformador flui através da conexão, recomenda-se dimensionar a conexão 5 para a corrente de falta total dos três transformadores, de forma análoga às conexões 1 e 2.

Conexões 6, 7 (barramento PE (LVMD) – MET – TET)

Devido à configuração da rede, as reatâncias das conexões 3, 6 e 7 no sistema de sequência positiva e zero são desconhecidas ou difíceis de determinar. Por essa razão, um cálculo exato da corrente de falta através das conexões 6 e 7 é complicado.

Como existem mais conexões através das quais as correntes de falta parciais podem fluir de volta para suas fontes de alimentação, e como as condições de seção transversal para as conexões 3 e 4 se baseiam simultaneamente nas análises anteriores, na prática, é suficiente dimensionar as seções transversais dos condutores das conexões 6 e 7 para metade da corrente de falta de um transformador.

$$I_{F,Cn.6} = I_{F,Cn.7} = \frac{1}{2} I_{F,Tr}$$

Observação

Se as conexões 6 e 7 forem consideradas como condutores de proteção, um dimensionamento com as seções transversais mínimas poderá não ser suficiente em certas circunstâncias (consulte o Cap. 1.2.1).

2.1.2 Caso de falta 2: fase contra condutor PE

No caso de uma falta contra o condutor PE no trecho do cabo (Fig. 2/3, local da falta F2), resultam os fluxos de corrente de falta representados.

O transformador 1 alimenta a corrente de falta $I_{F,Tr1}$ diretamente no local da falta F2. Os transformadores 2 e 3 alimentam as correntes de falta $I_{F,Tr2}$ e $I_{F,Tr3}$ no local da falta através dos caminhos de corrente do LVMD. Nesse ponto, elas se somam para formar a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$.

$$I_{F,Tr1,2,3} = \sum_{x=1}^{n=3} I_{F,Tr x}$$

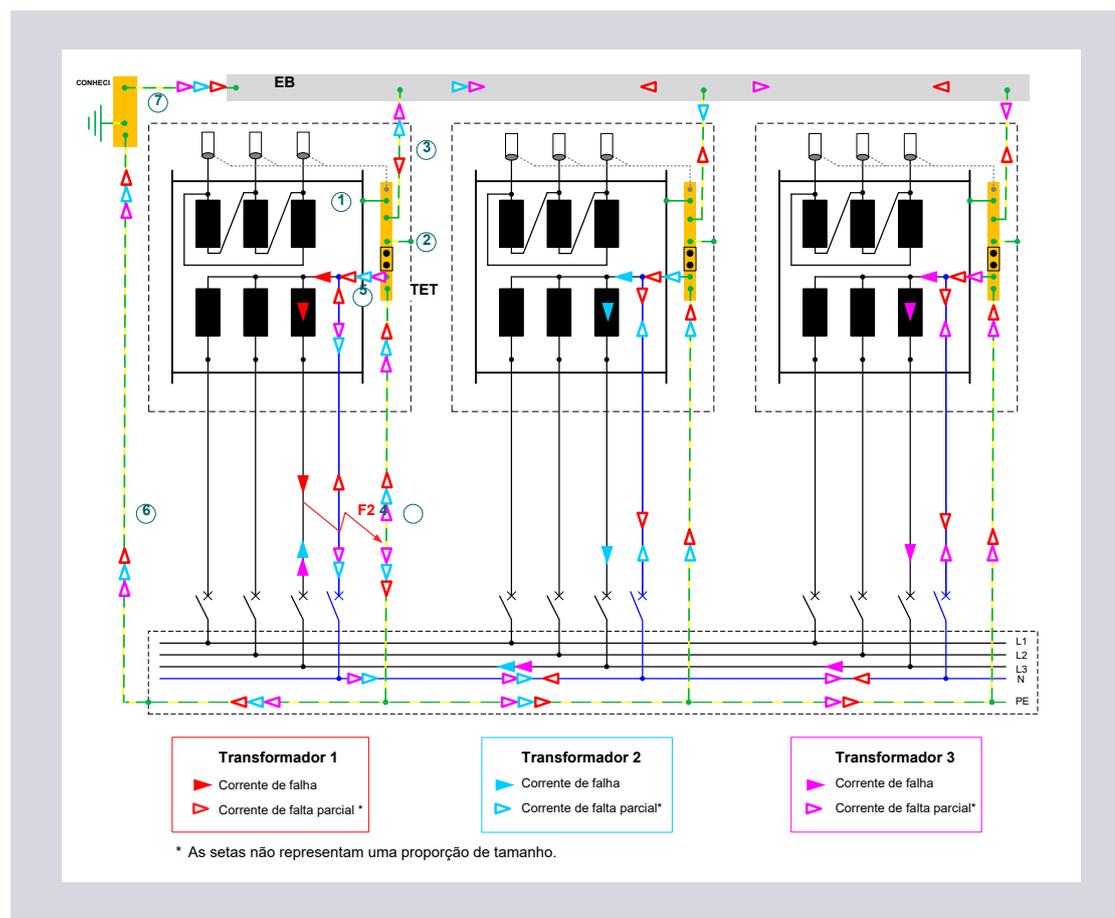


Fig. 2/3: Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador: Esquema para o caso de falta 2

Conexões 1 e 2 (material rodante do transformador – TET – invólucro do transformador)

Neste caso de falta, nenhuma corrente de falta flui através das conexões 1 e 2.

Conexão 3 (TET – EB)

Nesta análise do pior caso, resultam as mesmas condições que no caso de falta 1 (Cap. 2.1.1). Isso significa que a corrente de falta completa do transformador 1 flui através da conexão 5, enquanto as correntes de falta dos transformadores 2 e 3 fluem diretamente de volta para suas respectivas fontes de alimentação através da conexão 3 e do EB.

$$I_{F,Cn.3} = I_{F,Tr2,3} = 2 I_{F,Tr}$$

Conexão 4 (transformador de conexão do condutor PE – LVMD)

A corrente de falta máxima através da conexão 4 ocorre quando a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$ flui do local da falta F2 em uma única direção.

(Possibilidade 1: a partir do transformador 1 na direção do TET, se a falta ocorrer nas proximidades do TET.

Possibilidade 2: a partir do transformador 1 na direção do LVMD, se a falta ocorrer nas proximidades do LVMD).

Isso significa que a conexão 4 (condutor PE) deve ser capaz de suportar três vezes a corrente de falta de um transformador.

$$I_{F,Cn.4} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Conexão 5 (TET – fonte de alimentação)

Se a falta ocorrer nas proximidades do TET, a situação resultante através da conexão 5 é a mesma que no caso de falta 1 (Cap. 2.1.1). Possíveis correntes de curto-circuito parciais através do EB também são ignoradas neste caso.

$$I_{F,Cn.5} = I_{F,Tr1} + \frac{2}{3} I_{F,Tr2,3} = (1 + \frac{1}{3}) I_{F,Tr} = 2 \frac{1}{3} I_{F,Tr}$$

Aqui também, recomenda-se dimensionar esta conexão para a corrente de falta total dos três transformadores.

Conexões 6 e 7 (conexões barramento PE (LVMD) – TET – EB)

De forma análoga à análise do caso de falta 1 (Cap. 2.1.1) e com base nas condições de seção transversal para as conexões 3 e 4, aqui também é suficiente, na prática, dimensionar as seções transversais dos condutores das conexões 6 e 7 para metade da corrente de falta de um transformador.

$$I_{F,Cn.6} = I_{F,Cn.7} = \frac{1}{2} I_{F,Tr}$$

Observação

Se as conexões 6 e 7 forem consideradas como condutores de proteção, um dimensionamento com as seções transversais mínimas poderá não ser suficiente em certas circunstâncias (consulte o Cap. 1.2.1).

2.1.3 Caso de falha 3: fase contra o invólucro do transformador

No caso de uma falta contra a carcaça do transformador, resultam as mesmas correntes de falta descritas no Cap. 2.1.1 através das conexões 3 a 7. Em vez da conexão 1, a conexão 2 é submetida a estresse neste caso de falta. Consequentemente, a seção transversal da conexão 2 deve ser dimensionada de forma idêntica à da conexão 1.

$$I_{F,Cn.2} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

2.1.4 Visão geral das correntes de falha

A Tab. 2/1 mostra um resumo das correntes de falta resultantes para o arranjo de aterramento, com base nos casos analisados de falha 1 a 3.

Conexões							
Localização da falha	1	2	3	4	5	6	7
	Material rodante – TET	Invólucro – TET	TET – EB	Condutor PE	TET – fonte	PE (LVMD) – MET	MET – EB
F1	$3 I_{F,Tr}$	–	$2 I_{F,Tr}$	$I_{F,Tr}$	Recomendado: $2 \frac{1}{3} I_{F,Tr}$ $3 I_{F,Tr}$	$\frac{1}{2} I_{F,Tr}$	$\frac{1}{2} I_{F,Tr}$
F2	–	–		$3 I_{F,Tr}$			
F3	–	$3 I_{F,Tr}$		$I_{F,Tr}$			
Resultado	3 SE, Tr	3 SE, Tr	2 SE, Tr	3 SE, Tr	3 SE, Tr	1/2 SE, Tr	1/2 SE, Tr

2/1: Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador: Visão geral dos casos analisados de faltas e correntes de falta

2.2 Sistema TN-C, opção frequente na prática

Essa configuração de rede descreve uma subestação de transformadores múltiplos com um ponto de aterramento central (CEP) dentro do LVMD. Esta configuração de rede tem um efeito positivo na compatibilidade eletromagnética (EMC).

Neste exemplo de um arranjo de aterramento, os pontos neutros dos transformadores são isolados. A conexão ao LVMD e ao CEP é realizada por meio de um condutor PEN isolado. As subcargas e invólucros do transformador são aterrados através de uma conexão com o terminal de aterramento principal (MET). É por isso que os cabos de alimentação de baixa tensão podem ser implementados com 4 pólos (L_1 , L_2 , L_3 e PE_{ISO}).

Em operação normal, as correntes do condutor neutro fluem de volta para os transformadores exclusivamente através do condutor PEN isolado.

Com esta configuração de rede, é suficiente analisar um possível curto-circuito contra o material rodante do transformador (Fig. 2/4, localização da falha F1).

2.2.1 Caso de falta 1: fase contra a base do transformador

O transformador 1 alimenta a corrente de falta $I_{F,Tr1}$ diretamente no local da falha F1. Os transformadores 2 e 3 alimentam as correntes de falta $I_{F,Tr2}$ e $I_{F,Tr3}$ através dos caminhos de corrente que levam ao LVMD. Nesse ponto, elas se somam para formar a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$.

$$I_{F,Tr1,2,3} = \sum_{x=1}^{n=3} I_{F,Tr,x}$$

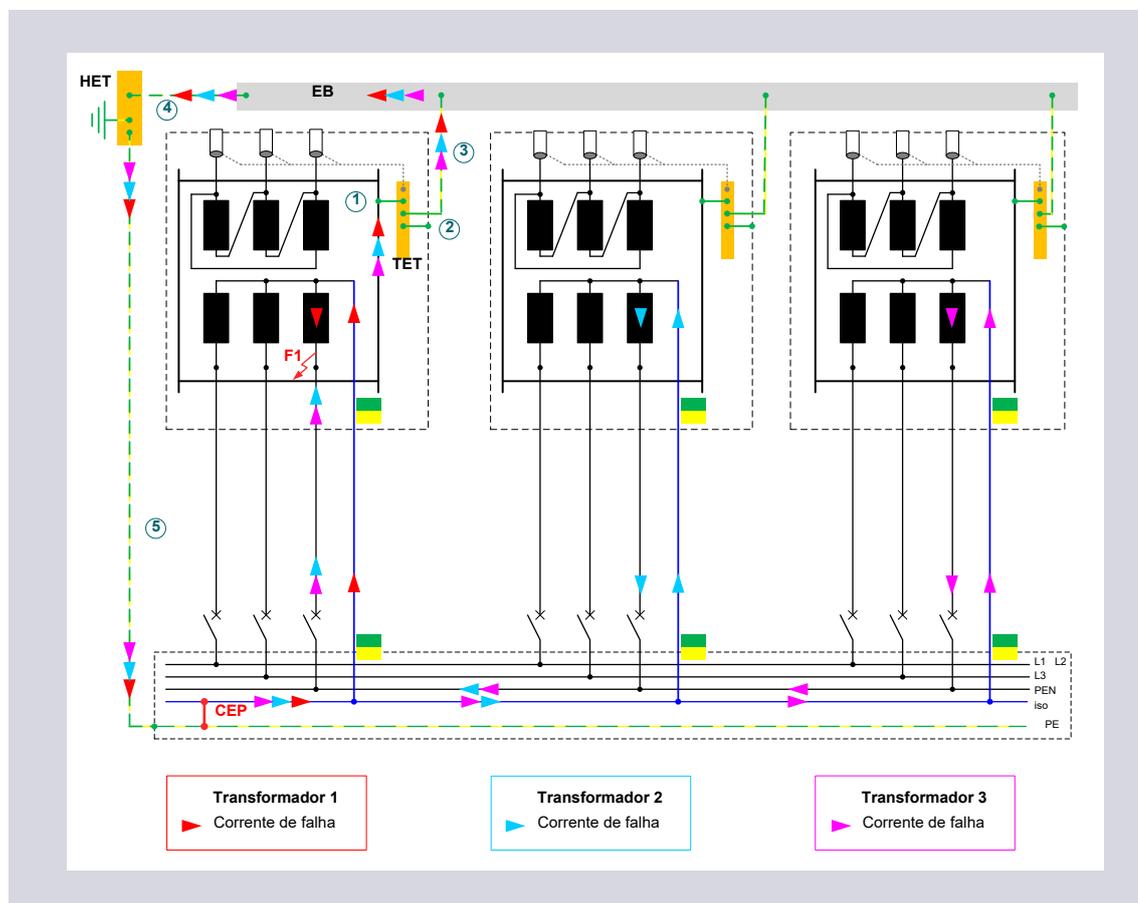


Fig. 2/4: Sistema TN-C, opção frequente na prática: Esquema para o caso de falha 1

No local de falta F1, a corrente total de falta deve seguir o caminho da corrente através do arranjo de aterramento, a fim de retornar à respectiva fonte de alimentação através do LVMD. Ou seja, ela flui do material rodante do transformador através da conexão 1 → TET → conexão 3 → conexão EB → conexão 4 → MET → conexão 5 → barramento PE (LVMD) → CEP para o condutor PEN isolado (LVMD). Aqui, a corrente de falta total se divide novamente nas três correntes de falha do transformador, a fim de fluir de volta para a respectiva fonte de alimentação através do condutor PEN isolado do cabo de alimentação de baixa tensão. Isso significa que o dimensionamento da seção transversal do condutor para as conexões 1, 3, 4 e 5 deve levar em consideração que, no pior dos casos, três vezes a corrente de falta de um transformador fluirá por essas conexões.

Neste caso de falta, nenhuma corrente de falta flui através da conexão 2.

Observação 1

Se as conexões 6 e 7 forem consideradas como condutores de proteção, um dimensionamento com as seções transversais mínimas poderá não ser suficiente em certas circunstâncias (consulte o Cap. 1.2.1).

Observação 2

Como as reatâncias do sistema de sequência positiva e zero dessas conexões são desconhecidas ou muito difíceis de determinar, um cálculo da corrente máxima de falta não pode ser realizado com precisão suficiente neste caso.

2.2.2 Caso de falta 2: fase contra a carcaça do transformador

O fluxo de corrente de falta resultante neste caso de falta é semelhante ao do caso de falta 1 (Cap. 2.2.1). No caso de falta 1, a conexão 2 transporta a corrente de falta total em vez da conexão 1. O dimensionamento da seção transversal do condutor é idêntico nos dois casos de falta analisados, 1 e 2.

$$I_{F,Cn.2} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

2.2.3 Visão geral das correntes de falta

A Tab. 2/2 mostra um resumo das correntes de falta resultantes para o arranjo de aterramento, com base nos casos de falta 1 e 2 analisados.

Conexões					
Localização da falha	1	2	3	4	5
	Material rodante – TET	Invólucro – TET	TET – EB	Condutor PE	TET – fonte
F1	$3 I_{F,Tr}$	–		$3 I_{F,Tr}$	
F2	–	$3 I_{F,Tr}$			
Resultado	$3 I_{F,Tr}$	$3 I_{F,Tr}$		$3 I_{F,Tr}$	

2/2: Sistema TN-C, opção frequente na prática: Visão geral dos casos analisados de faltas e correntes de falta

2.3 Sistema TN-CS, opção recomendada

As figuras 2/5 e 2/6 mostram o arranjo de aterramento de uma subestação de múltiplos transformadores com um CEP no LVMD, de acordo com a recomendação da Totally Integrated Power (TIP).

O barramento de aterramento (EB) integra os transformadores (base e carcaça) através dos terminais de aterramento do transformador (TET), e as conexões 1 a 3, bem como outras partes condutoras expostas na sala do transformador ou nas proximidades, em uma ligação equipotencial de proteção "local" comum. Os terminais de aterramento do transformador são conectados com o barramento PE no LVMD através das conexões 4 (condutor PE). O terminal de aterramento principal (MET) é conectado com o barramento PE no LVMD através da conexão 5. As outras partes condutoras expostas estruturais são conectadas com o MET.

De forma análoga à opção 2 (Cap. 2.2), em operação normal, as correntes do condutor neutro fluem, assim, de volta para os transformadores exclusivamente através do condutor PEN isolado.

2.3.1 Caso de falha 1: fase contra o material rodante do transformador

No caso de uma falha (F1) contra a base do transformador (Fig. 2/5), resultam os seguintes fluxos de corrente de falta: O transformador 1 alimenta a corrente de falta $I_{F,Tr1}$ diretamente no local da falha. Os transformadores 2 e 3 alimentam as correntes de falta $I_{F,Tr2}$ e $I_{F,Tr3}$ no local da falha através dos caminhos de corrente do LVMD. Nesse ponto, elas se somam para formar a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$.

$$I_{F,Tr1,2,3} = \sum_{x=1}^{n=3} I_{F,Trx}$$

Do local da falha F1, $I_{F,Tr1,2,3}$ flui primeiro para o terminal de aterramento do transformador (TET) através da conexão 1. Aqui, $I_{F,Tr1,2,3}$ se divide novamente em correntes de falta parciais, a fim de fluir de volta para a respectiva fonte de alimentação por diferentes caminhos de corrente.

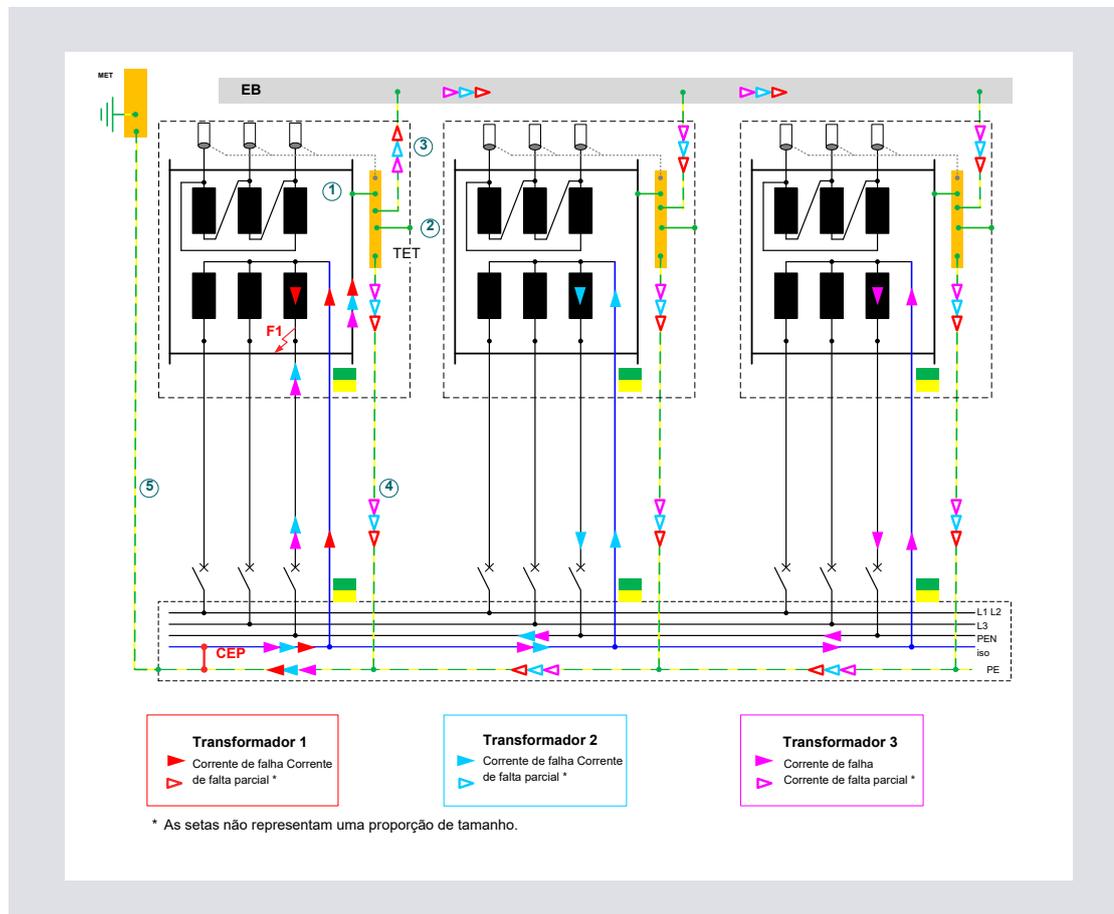


Fig. 2/5: Sistema TN-C-S, opção recomendada: Esquema para o caso de falha 1

Conexão 1 (material rodante do transformador – TET)

Do local da falta F1, a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$ flui para o TET através da conexão 1. Isso significa que a conexão 1 deve ser capaz de suportar com segurança três vezes a corrente de falta de um transformador até a desconexão.

$$I_{F,Cn.1} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Conexão 2 (carcaça do transformador – TET)

Neste caso de falta, a conexão 2 não é submetida a estresse.

Conexões 3 e 4 (TET – EB – conexão do condutor PE transformador–LVMD)

A partir do TET, a corrente de falta total pode fluir para o LVMD através de diferentes caminhos de corrente.

A primeira análise do pior caso resulta quando as correntes de falta parciais através da conexão 3 são tão pequenas que podem ser ignoradas. Neste caso, a corrente de falta total flui através da conexão 4 para o CEP e, a partir daí, de volta para as fontes de alimentação através dos condutores PEN isolados.

$$I_{F,Cn.4} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Outra análise de pior caso assume que a corrente de falta que flui através do condutor de proteção do transformador defeituoso (conexão 4) se torna desprezivelmente pequena. Nesse caso, a corrente de falta total flui através da conexão 3 para o EB e, a partir daí, de volta para as fontes de alimentação através dos condutores PE dos transformadores em paralelo, do CEP e dos condutores PEN isolados.

Observação

Se a conexão 3 fosse considerada apenas como um terminal de ligação equipotencial local ou suplementar, o valor de referência desta conexão teria que ser dimensionado de forma idêntica ao menor condutor de proteção implementado para a carcaça de um transformador, conforme descrito no Cap. 1.2.2, Estudo de caso 1. Neste caso, aplica-se o seguinte à conexão 3:

$$I_{F,Cn.3} = I_{F,SEBT} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Conexão 5 (barramento MET – PE no LVMD)

Como esta opção de projeto não inclui uma conexão entre o EB e o MET, nenhuma corrente de falta pode fluir através da conexão 5 neste caso de falta.

Esta conexão deve, portanto, ser dimensionada como um terminal de ligação equipotencial suplementar para conexão ao MET, conforme descrito no Cap. 1.2.1.

Desde que uma conexão seja estabelecida entre o EB e o MET, seria possível que correntes de falta fluíssem através dela. De forma análoga ao exemplo "Sistema TN-S, a partir dos terminais secundários do transformador" (Cap. 2.1.1, Caso de falta 1), ambas as conexões devem ser dimensionadas para metade da corrente de falta de um transformador.

$$I_{F,Cn.5} = \frac{1}{2} I_{F,Tr}$$

2.3.2 Caso de falha 2: fase contra condutor PE

No caso de uma falha no cabo contra a conexão 4 (condutor PE), o resultado é o resultado dos fluxos de corrente de falha representados (Fig. 2/6, localização da falha F2).

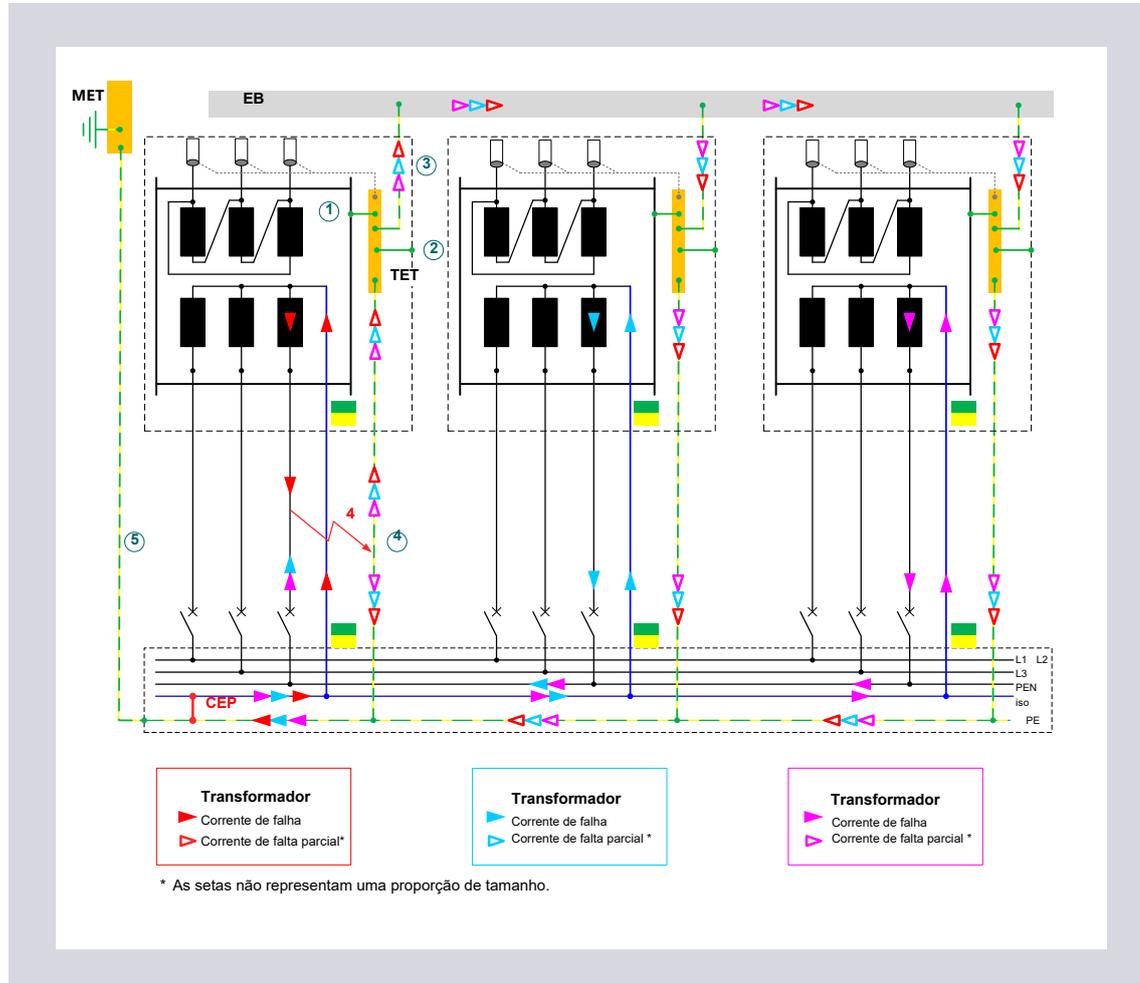


Fig. 2/6: Sistema TN-C-S, opção recomendada: Esquema para o caso de falha 2

O transformador 1 alimenta a corrente de falta $I_{F,Tr1}$ no local da falha. Os transformadores 2 e 3 alimentam as correntes de falta $I_{F,Tr2}$ e $I_{F,Tr3}$ no local da falha através dos caminhos de corrente do LVMD. Nesse ponto, elas se somam para formar a corrente de falta total $I_{F,Tr1,2,3}$.

$$I_{F,Tr1,2,3} = \sum_{x=1}^{n=3} I_{F,Trx}$$

Conexões 1 e 2 (base do transformador – TET – carcaça do transformador)

Neste caso de falha, não fluem correntes de falta através das conexões 1 e 2.

Conexões 3 e 4

(TET – EB – conexão do condutor PE transformador–LVMD)

De forma análoga à análise do pior caso no caso de falha 1 (F1), ou as correntes de falta através da conexão 3 ou as correntes de falta através da conexão 4 são ignoradas. Isso resulta em uma corrente total máxima em ambos os piores casos, ou seja:

$$I_{F,Cn.3} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

$$I_{F,Cn.4} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

Conexão 5 (MET – barramento PE no LVMD)

Aplica-se o mesmo que no caso de falta 1 (Cap. 2.3.1):

$$I_{F,Cn.5} = \frac{1}{2} I_{F,Tr}$$

2.3.3 Caso de falta 3: fase contra a carcaça do transformador

No caso de uma falta contra a carcaça do transformador, resultariam os mesmos fluxos de corrente de falta que contra a base do transformador (Cap. 1.2.1). Em vez da conexão 1, a conexão 2 é submetida a estresse aqui. Esta conexão deve ser capaz de transportar a corrente de falta total da carcaça do transformador para o TET. Isso significa que a conexão 2 deve apresentar, no mínimo, a mesma condutividade que a conexão 1.

$$I_{F,Cn.2} = I_{F,Tr1,2,3} = 3 I_{F,Tr}$$

2.3.4 Visão geral das correntes de falha

A guia 2/3 mostra um resumo das correntes de falha resultantes para todos os cabos de conexão com base nos casos analisados de falha 1 e 2.

3 Dimensionamento do condutor de proteção – lado secundário do transformador

Referindo-se ao arranjo de aterramento recomendado para a distribuição principal de baixa tensão (Cap. 2.3), as seções transversais necessárias dos condutores de proteção são determinadas a seguir.

3.1 Exemplo de aplicação do sistema TN-CS, opção recomendada

O ponto de partida para descrever o procedimento são três transformadores com potências idênticas de 1.250 kVA cada, operados em paralelo. Em caso de falha, cada transformador gera uma corrente de falta no LVMD, que corresponde à corrente de curto-circuito simétrica inicial da fase síncrona $I''_{k1max} = I_{F,Tr} = 30 \text{ kA}$.

A Fig. 3/1 mostra o conceito básico de aterramento incluindo informações sobre as condições de corrente de curto-circuito e as configurações resultantes para os relés de proteção de média tensão ou os disjuntores de baixa tensão nos transformadores.

A resistência térmica ao curto-circuito é verificada a seguir, com base nas configurações de proteção. Possíveis tolerâncias específicas do produto ou do fabricante também são levadas em consideração na verificação.

Conexões					
Localização da falha	1	2	3	4	5
	Material rodante – TET	Invólucro – TET	TET – EB	Condutor PE	TET – fonte
F1	$3 I_{F,Tr}$	–	$3 I_{F,Tr}$		Dimensionamento da seção transversal do condutor para condutor de ligação de proteção no MET (ver Cap. 1.2.1)
F2	–	$3 I_{F,Tr}$			
Resultado	$3 I_{F,Tr}$	$3 I_{F,Tr}$	$3 I_{F,Tr}$		

2/3: Sistema TN-C-S, opção recomendada: Visão geral dos casos analisados de falta e correntes de falta

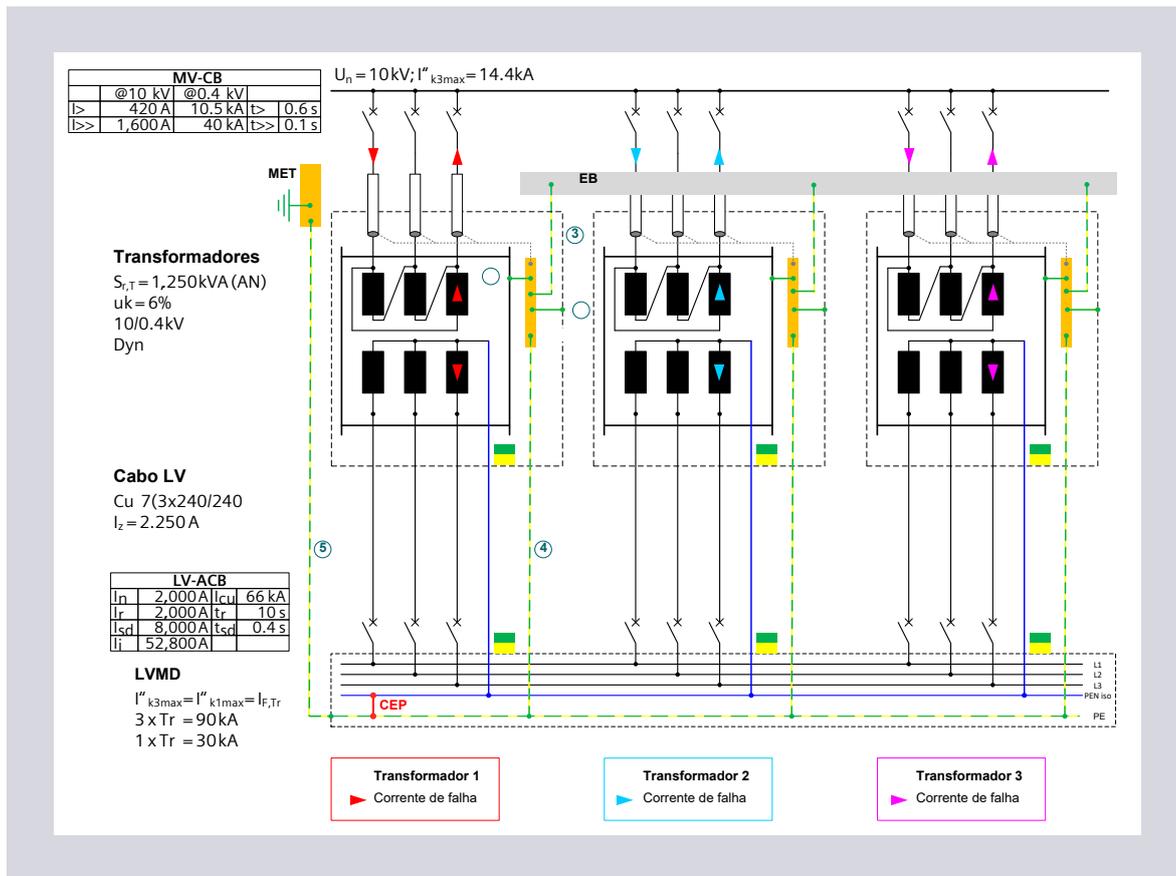


Fig. 3/1: Sistema TN-C-S, opção recomendada: Determinação das seções transversais do condutor de proteção

3.2 Conexão 1 (material rodante do transformador – TET)

The maximum fault current through connection 1 arises in case of fault 1 (phase – undercarriage).

$$I_{F,Tr} = I''_{k1max} = 30 \text{ kA}$$

$$I_{F,Cn.1} = 3 I_{F,Tr} = 3 \times 30 \text{ kA} = 90 \text{ kA}$$

Desconexão por disjuntor de média tensão

Faltas no lado secundário, ou seja, faltas que ocorrem na direção do fluxo de corrente a montante do disjuntor de baixa tensão, são geralmente desconectadas pelo disjuntor de média tensão por meio do estágio de proteção I> do relé de proteção de média tensão.

De acordo com o ajuste de proteção fornecido (Fig. 3/1), I_{F,Tr1} é desconectado dentro de um tempo máximo de desconexão de 0,7 s (t_> = 0,6 s mais um tempo de tolerância de t_{tol} = 0,1 s).

Desconexão por disjuntor de baixa tensão

O disjuntor de baixa tensão do transformador 1 deve interromper a soma das correntes de falta do transformador 2 (I_{F,Tr2}) e do transformador 3 (I_{F,Tr3}). Esta corrente de falta total atinge 60 kA e, portanto, está dentro da faixa de tolerância da unidade de disparo de curto-circuito instantâneo (unidade de disparo I ajustada para 52,8 kA, tolerância de disparo +/- 20%).

Por esta razão, o tempo de disparo com retardo de curta duração mais longo – incluindo a tolerância – deve ser levado em consideração para a unidade de disparo de curto-circuito com retardo de curta duração (unidade de disparo S); em nosso exemplo, com 0,49 s (t_{sd} = 0,4 s mais tolerância t_{tol} = 0,09 s).

Cálculo da energia termicamente efetiva

Sob as condições dadas, a energia termicamente efetiva para a conexão 1 é calculada da seguinte forma:

$$I_{F,Cn.1}^2 t = (90 \text{ kA})^2 \times 0.49 \text{ s} + (30 \text{ kA})^2 \times (0.7 - 0.49) \text{ s} = 4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$$

A primeira soma considera a corrente total de falta até a desconexão do disjuntor de baixa tensão; a segunda soma a corrente de falta até a desconexão final da falta pelo disjuntor de média tensão (Fig. 3/2).

Projeto da conexão 1

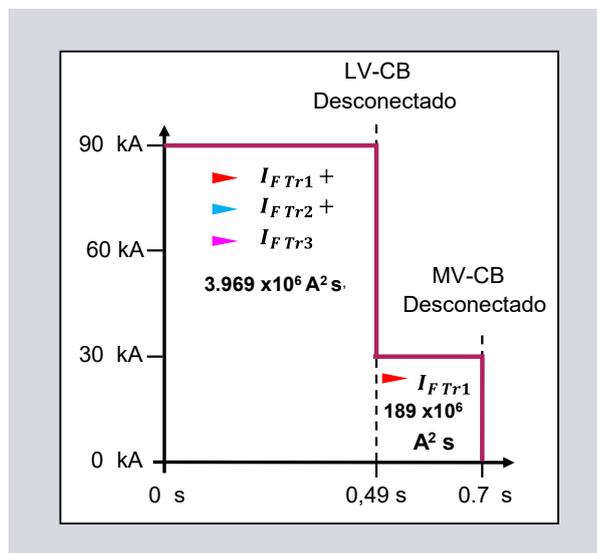


Fig. 3/2: Energia de passagem resultante até a desconexão final das correntes de falta

Neste exemplo de aplicação, a conexão 1 é implementada como um condutor de cobre unipolar isolado em PVC. Não é instalado junto com outros cabos.

De acordo com a Tabela A54.2 (Cap. 1.3), um coeficiente de material $k = 143 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ deve ser usado para esta conexão.

Cálculo da seção transversal mínima do condutor

A seção transversal mínima calculada do condutor requer dois condutores unipolares com uma seção transversal de 240 mm^2 cada, ou três condutores unipolares de 150 mm^2 cada. Considerando a resistência ao curto-circuito das conexões de aterramento no material rodante do transformador (tipo B1), são necessárias três conexões (Cap. 1.2.3).

3.3 Conexão 2 (carcaça do transformador – TET)

A corrente de falta máxima que surge no caso de falta 3 (fase contra a carcaça do transformador) flui através da conexão 2. Se a conexão 2 for implementada de forma idêntica à conexão 1, o cálculo para a conexão 2 é análogo a ele.

A energia que flui através da conexão 2 corresponde a:

$$I_{F,Cn.2}^2 t = 4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$$

A seção transversal mínima do condutor é calculada com:

$$S_{Cn.2} \geq \frac{\sqrt{I_{F,Cn.2}^2 t}}{k} = \frac{\sqrt{4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}}}{143 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \approx 451 \text{ mm}^2$$

3.4 Conexão 3 (TET – EB)

Em todos os casos de falta considerados, a corrente de falta total dos três transformadores $I_{F,Tr1,2,3}$ também pode fluir aqui no pior caso. A conexão 3, por exemplo, pode ser implementada como um condutor de proteção de cobre nu que não representa risco para quaisquer partes vizinhas.

De acordo com a IEC 60364-5-54 Tabela A.54.6 (Cap. 1.3), deve ser utilizado um coeficiente de material $k = 159 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$.

A energia que flui através da conexão 3 corresponde a:

$$I_{F,Cn.3}^2 t = 4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$$

A seção transversal mínima do condutor é calculada com:

$$S_{Cn.3,Cu} \geq \frac{\sqrt{I_{F,Cn.3}^2 t}}{k} = \frac{\sqrt{4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}}}{159 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \approx 406 \text{ mm}^2$$

3.5 Conexão 4 (barramento PE no LVMD – TES)

Em todos os casos de falta analisados, três vezes a corrente de falta de um transformador flui através do condutor PE (conexão 4) no pior caso. Assim como o condutor de fase e o condutor neutro, o condutor PE também é implementado como um cabo de cobre unipolar de PVC e instalado no mesmo caminho de cabos. A seção transversal mínima do condutor é selecionada de acordo com dois critérios:

Critério 1: Seleção da seção transversal mínima de acordo com a tabela na norma (IEC 60364-5-54 Cláusula 543.1 Tabela 54.2)

Os condutores de linha podem ser implementados com sete cabos unipolares paralelos de 240 mm² cada. Inicialmente, a seção transversal mínima do condutor PE é assumida com metade da seção transversal do condutor de linha, de acordo com a Tab 1/1 (Cap. 1.3).

$$S_{Cn.4} \geq \frac{7 \times 240 \text{ mm}^2}{2} = \frac{1,680 \text{ mm}^2}{2} = 840 \text{ mm}^2$$

Critério 2: Verificação da resistência ao curto-circuito com $S^2k^2 \geq I^2t$

Para a conexão 4, o valor da energia resultante é análogo ao da conexão 1 (Cap. 3.2 e Fig. 3/2).

De acordo com a Tabela A54.4, deve ser aplicado um coeficiente de material $k = 115 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ no caso de um cabo de PVC 70°.

A energia que flui através da conexão 4 corresponde a:

$$I_{F,Cn.4}^2 t = 4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$$

A seção transversal mínima do condutor é calculada com:

$$S_{Cn.4} \geq \frac{\sqrt{I_{F,Cn.4}^2 t}}{k} = \frac{\sqrt{4,158 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}}}{115 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \approx 561 \text{ mm}^2$$

Como a seção transversal mínima para metade do condutor de linha é maior que a seção transversal necessária conforme o cálculo acima, o dimensionamento é suficiente.

3.6 Conexão 5 (MET – barramento PE no LVMD)

Para a opção de projeto selecionada "sistema TN-C-S, opção recomendada" (Cap. 2.3), não fluem correntes de falta através da conexão 5 em nenhum dos casos de falta analisados.

Esta conexão pode, portanto, ser dimensionada com a seção transversal mínima do condutor (Cap. 1.2.1).

4 Descobertas - dimensionamento do condutor de proteção, lado secundário do transformador

Em uma subestação com transformadores operados em paralelo, os seguintes aspectos devem ser considerados para dimensionar as seções transversais do condutor de proteção:

- Em caso de falha (curto-circuito), por exemplo, condutor ativo contra o material rodante do transformador, todos os transformadores alimentam sua participação na corrente total de falta no local da falta.
- O circuito do transformador afetado pela falha deve ser desconectado pelo dispositivo de proteção do lado primário e secundário.
- A resistência ao curto-circuito das conexões do condutor é dimensionada considerando a energia térmica máxima de curto-circuito resultante da corrente de curto-circuito e a duração do curto-circuito (tempos de desconexão dos dispositivos de proteção) $\int I(t)^2t$.

O primeiro exemplo de aplicação (Cap. 2.1) mostra uma solução prática anteriormente usual, na qual um sistema TN-S é implementado a partir dos terminais secundários do transformador. Em caso de operação paralela dos transformadores, várias pontes divisórias estão disponíveis. Isso resulta nas seguintes descobertas para essa configuração de rede:

- Em operação normal, dependendo dos comprimentos do cabo de alimentação entre o transformador e o LVMD, as correntes do condutor neutro voam proporcionalmente através das pontes divisórias existentes ou através dos condutores de proteção ou condutores de ligação de proteção instalados em paralelo. Assim, as conexões do condutor de proteção transportam correntes operacionais de forma inadmissível. Quanto maiores forem essas correntes, mais desfavoráveis serão os impactos na compatibilidade eletromagnética (EMC) da rede elétrica.
- À medida que a demanda por infraestrutura de TI aumenta em um edifício, os sistemas TN com fontes de alimentação operadas em paralelo só podem ser fornecidos – de acordo com IEC 60364-4-44 – com uma conexão (central) entre os pontos neutros do transformador e o sistema de aterramento. Recomenda-se implementar este ponto de aterramento central (CEP) preferencialmente dentro do baixo voltage distribuição principal (por exemplo, como cubículo CEP em um quadro de distribuição SIVACON S8).
- Em caso de falha, por exemplo, condutor ativo contra o material rodante do transformador, correntes proporcionais de curto-circuito fluirão através de todas as conexões do arranjo de aterramento, devido aos múltiplos caminhos de corrente paralelos.

O tamanho das correntes parciais de curto-circuito não pode ser determinado com precisão suficiente, o que torna mais difícil dimensionar as seções transversais do condutor de proteção.

Para um dimensionamento correto, é necessário, portanto, realizar uma análise equivalente do pior caso que leve a um superdimensionamento das seções transversais do condutor.

- Nos circuitos do transformador, dimensionar o condutor de proteção com metade da seção transversal do condutor de linha geralmente é suficiente.

O segundo exemplo (Cap. 2.2) mostra uma solução prática frequente para a configuração de aterramento de uma subestação de transformadores múltiplos. O ponto de aterramento central (CEP) desta rede compatível com EMC está localizado no LVMD. Os transformadores são aterrados através de uma conexão ao terminal de aterramento principal (MET) sem integração do LVMD. Essa configuração de rede fornece as seguintes descobertas:

- Durante a operação, as correntes do condutor neutro fluem de volta para seus respectivos pontos neutros da fonte exclusivamente através do condutor PEN isolado.
- Em caso de curto-circuito, por exemplo, condutor ativo contra o material rodante do transformador, resulta em um caminho de corrente de falha, que flui de volta para o condutor PE no LVMD através dos condutores de proteção do arranjo de aterramento e para as fontes de alimentação através do CEP.
- A corrente de falha monofásica é difícil de determinar, pois as reatâncias de sequência zero do condutor de proteção não podem ser determinadas por cálculo devido à sua instalação separada. Como regra, a consideração exclusiva da resistência zero do condutor de proteção levará a correntes de falha mais altas.
- A determinação da resistência térmica ao curto-circuito dos condutores de proteção é, portanto, segura, enquanto a determinação das correntes mínimas de falha monofásica para avaliar a desconexão do dispositivo de proteção ("Proteção contra choque elétrico" de acordo com IEC 60364-4 41) está no lado inseguro.

Como alternativa à verificação por cálculo, a conformidade com a condição de desconexão pode ser comprovada medindo o loop de falha.

- Nos circuitos do transformador, dimensionar o condutor de proteção com metade da seção transversal do condutor de linha geralmente é suficiente.
- A conexão entre o barramento PE no LVMD ao MET deve ser dimensionada de acordo com a corrente de curto-circuito máxima de saída, pois este é um condutor de proteção.

O terceiro exemplo de aplicação (Cap. 2.3) também mostra uma configuração de rede compatível com EMC para uma subestação de transmissão múltipla com um CEP dentro do LVMD.

Como diferença para o exemplo 2 (Cap. 2.2), o material rodante do transformador é aterrado através das conexões do condutor de proteção, que são instaladas junto com os condutores ativos nos cabos de alimentação para a distribuição principal de baixa tensão. Essa configuração de rede fornece as seguintes descobertas:

- Durante a operação e em caso de falha, as correntes do condutor neutro fluem de volta para os pontos neutros da fonte exclusivamente através do condutor PEN isolado.
- As correntes de falta monofásicas mínimas e máximas podem ser determinadas com precisão suficiente por cálculo, pois as resistências de sequência zero e as reatâncias de sequência zero são conhecidas. A conformidade com a condição de desconexão ("Proteção contra choque elétrico" de acordo com IEC 60364-4 41) pode ser verificada por cálculo.
- Nos circuitos do transformador, dimensionar o condutor de proteção com metade da seção transversal do condutor de linha geralmente é suficiente.
- Não são esperadas correntes de falta consideráveis através da conexão entre o barramento PE no LVMD e o MET.

5 Arranjo de aterramento – lado primário do transformador

5.1 Requisitos normativos

As instalações de energia que excedem 1 kV são dimensionadas com base nas especificações da IEC 61936-1 ou EN 50522. De acordo com estas normas, o arranjo de aterramento é considerado parte integrante da instalação de energia.

$$S^2 k^2 \geq I^2 t ; S = \sqrt{\frac{I^2 t}{k^2}}$$

Ao dimensionar os condutores de proteção e os condutores de equipotencialidade de proteção associados, a sua suportabilidade térmica ao curto-circuito deve ser garantida. Além disso, as seções transversais mínimas para condutores de proteção (ou condutores de aterramento) e condutores de equipotencialidade de proteção especificadas pela EN 50522 devem ser levadas em conta.

- Cobre (Cu) 16 mm²
- Alumínio (Al) 35 mm²
- Aço (St) 50 mm²

Dependendo da conexão do ponto neutro da rede elétrica, diferentes tipos de curto-circuitos são decisivos para verificar a suportabilidade térmica ao curto-circuito das conexões de aterramento (Tab. 5/1). Quanto à duração do curto-circuito t , o tempo de desconexão da proteção de retaguarda deve ser considerado (pior cenário).

Informações detalhadas sobre a conexão do ponto neutro na rede de cabos de média tensão estão incluídas no manual de planejamento TIP "Planejamento da distribuição de energia elétrica – Princípios técnicos", capítulo 4.6.



As correntes de curto-circuito relevantes são determinadas com base nas especificações da IEC/EN 60909.

Em projetos de infraestrutura padrão, a subestação de transferência está frequentemente muito próxima dos transformadores de distribuição e da distribuição principal de baixa tensão. Por este motivo, as conexões de cabos e barramentos são correspondentemente curtas e, portanto, não têm influência significativa na corrente de curto-circuito máxima e mínima.

Informações sobre as correntes de curto-circuito máxima e mínima na subestação de transferência, bem como as correntes de atuação e os tempos de desconexão da proteção de transferência (análise da proteção de retaguarda para o dimensionamento dos condutores de proteção) devem ser solicitadas ao operador do sistema de distribuição.

Conexão de ponto neutro no sistema de alta tensão	Corrente de curto-circuito para carga térmica do eletrodo de aterramento e condutor de proteção (condutor de aterramento) ^{1) 2)}
Sistema isolado/compensado	$I''^{(3)}_{KEE}$
Sistema solidamente aterrado / impedância aterrado	I''_{k1}

1) Se vários caminhos de fluxo de corrente forem possíveis, a distribuição de corrente resultante pode ser considerada para dimensionar o sistema de aterramento.
 2) As seções transversais mínimas na EN 50522, Anexo C devem ser observadas.
 3) Os condutores de aterramento nas bobinas de falha de aterramento devem ser dimensionados com base na maior corrente das bobinas.

I''_{KEE} Corrente dupla de falta à terra, calculada de acordo com IEC/EN 60909
 I''_{k1} Corrente de curto-circuito simétrica inicial para um curto-circuito monofásico à terra, calculada de acordo com IEC/EN 60909

5/1: Correntes decisivas para o dimensionamento de arranjos de aterramento de acordo com EN 50522, Tabela 1

5.2 Sistema isolado/compensado

Em um sistema isolado ou compensado, apenas uma pequena corrente de falha (corrente capacitiva I_{ce} ou corrente residual wattmétrica I_{res}) geralmente flui em caso de falta à terra. A princípio, essa corrente de falha não é desconectada. A operação continua por um período definido de algumas horas até que o local da falha seja encontrado e desconectado. Se outra falha de aterramento em outra fase ocorrer dentro deste período, isso leva a uma falha de aterramento dupla (I''_{kEE}) com valores de corrente muito mais altos (curto-circuito) kEE (Fig. 5/1). Na pior das hipóteses, os dois locais de falta (Fig. 5/1, locais de falta A e B) estão nas proximidades, o que reduz a impedância de aterramento a um valor insignificante, e a corrente de falta de terra dupla pode adotar o valor de uma corrente de curto-circuito bifásica (I''_{k2}).

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3}$$

5.3 Sistema solidamente aterrado / impedância aterrado

Em um sistema solidamente aterrado ou com impedância aterrada, uma falha de fase síncrona com contato com a terra faz com que correntes de curto-circuito fluam que devem ser desconectadas o mais rápido possível para limitar os danos (Fig. 5/2). A duração do curto-circuito ou os tempos de desconexão variam abaixo de um segundo.

Em um sistema neutro aterrado de impedância, a corrente de curto-circuito com terra é geralmente limitada a valores de 2 kA. Se as cargas do motor ou os geradores estiverem diretamente conectados à rede de média tensão, os valores devem ser limitados a menos de 200 A para evitar uma possível queima do núcleo nos enrolamentos. A desconexão da falha deve ser instantânea nesses casos.

No pior caso, a corrente de curto-circuito à terra em sistemas com ponto neutro solidamente aterrado atinge um valor de 1,5 vezes a corrente de curto-circuito trifásica.

$$I''_{k1max} \leq 1.5 I''_{k3max}$$

Sistemas com ponto neutro solidamente aterrado podem ser frequentemente encontrados em países influenciados pela norma britânica (British Standard). Nesses casos, são utilizados cabos de média tensão armados com uma seção transversal do fio de blindagem reforçada.

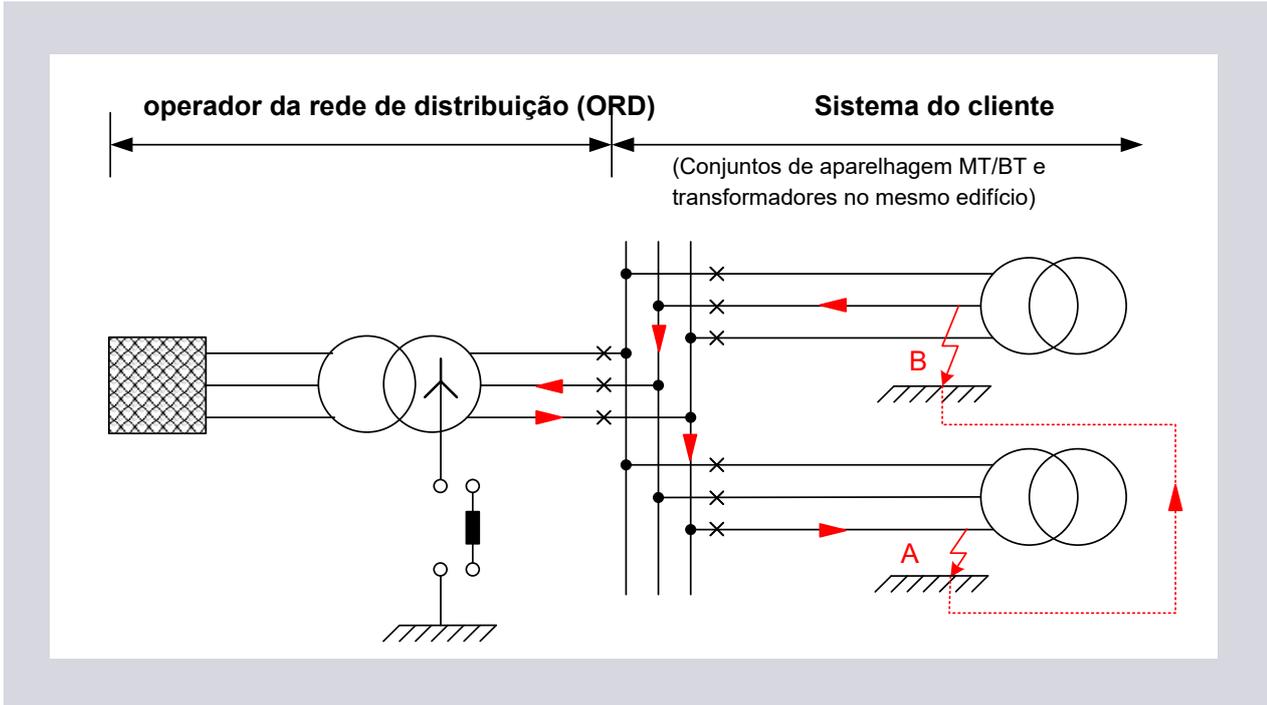


Fig. 5/1: Exemplo de um sistema isolado / compensado, representação de uma falha de aterramento dupla I''_{Kee}

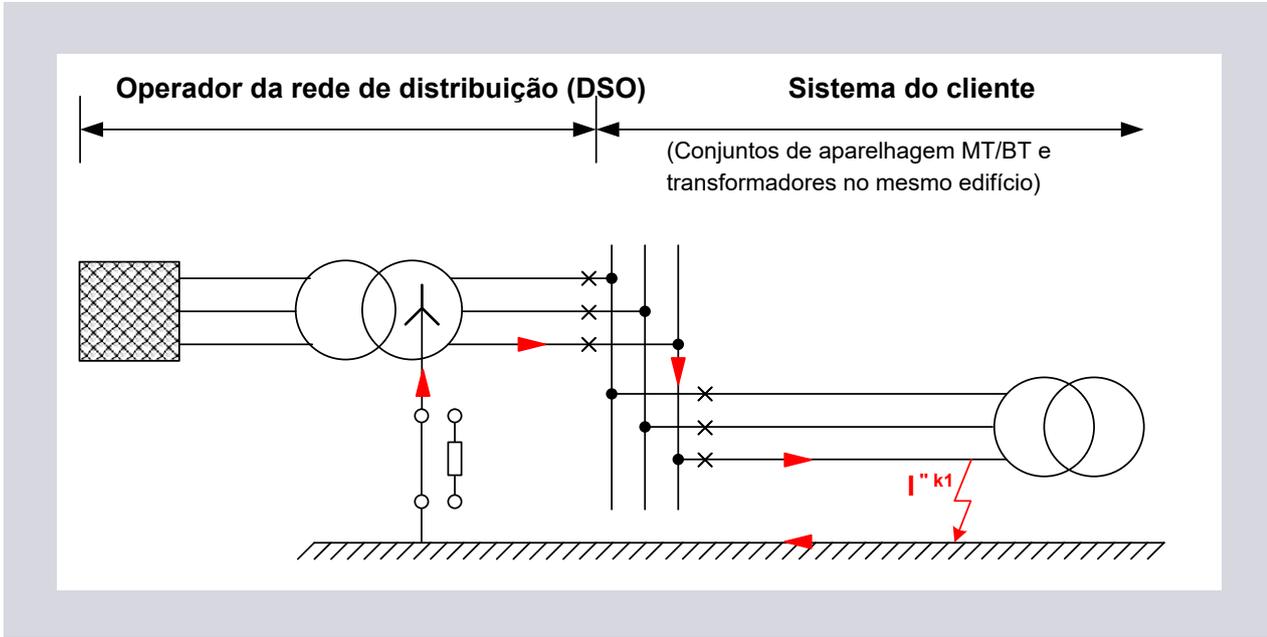


Fig. 5/2: Exemplo de um sistema solidamente aterrado / impedância aterrada, representação de um curto-circuito monofásico I''_{k1}

5.4 Configuração de aterramento - lado primário do transformador

Com relação à configuração de aterramento selecionada "sistema TN-CS, opção recomendada" do Cap. 2.3, conexões adicionais são estabelecidas no arranjo de aterramento no lado primário do transformador.

A Fig. 5/3 (esquemas à esquerda e à direita) mostra a configuração de aterramento estendido deste exemplo de sistema.

Em uma instalação de sistema centralizado (Fig. 5/3, esquerda), o painel de média tensão (subestação de transferência), os transformadores de distribuição e a distribuição principal de baixa tensão (LVMD) são instalados no mesmo edifício.

Com esta instalação, os dois conjuntos de comutação (MT e LVMD) podem ser ligados à terra através de um terminal de ligação à terra principal comum (MET).

Para fazer isso, a conexão de aterramento 6 está instalada.

As blindagens dos cabos de média tensão são conectadas ao terminal de aterramento principal (MET) diretamente ou através do terminal de aterramento do transformador (TET). A ligação equipotencial de proteção de outras partes condutoras expostas na sala do painel de distribuição é estabelecida por meio de conexões ao barramento de aterramento (EB).

Em uma instalação descentralizada (Fig. 5/3, à direita), o painel de média tensão é aterrado localmente (no local) por meio de seu próprio arranjo de aterramento devido à distância local dos transformadores de distribuição e do LVMD.

As peças condutoras, como o material rodante do transformador ou o invólucro do transformador, são conectadas ao LVMD através do terminal de aterramento do transformador (TET) e da conexão do condutor de proteção 4 em ambas as opções de instalação.

Os cabos de média tensão da subestação de transferência para o lado primário do transformador são implementados como cabos unipolares isolados em XLPE tipo N2XS2Y 3x1x 120/16 mm² (IEC 60502-2). As blindagens de cabo associadas são aterradas em ambos os lados.

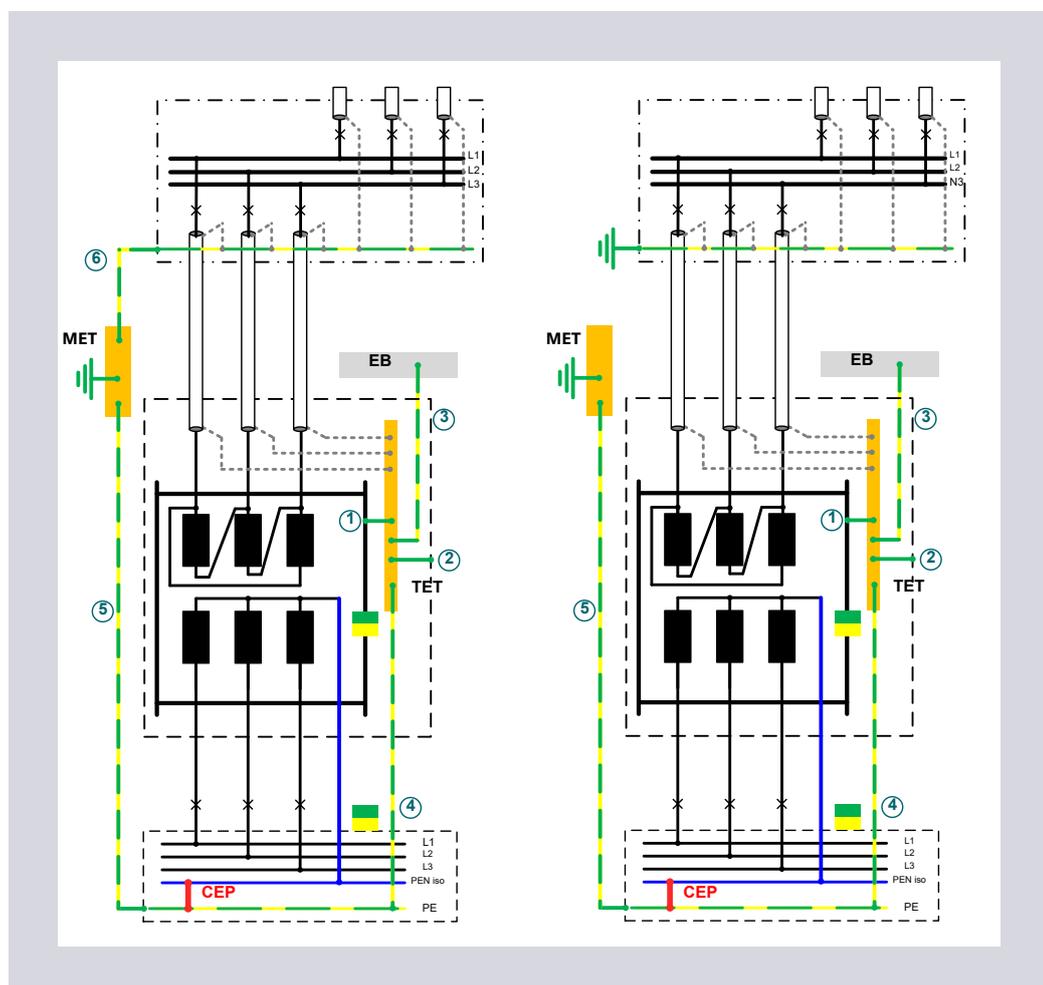


Fig. 5/3: Sistema TN-CS, configuração recomendada com um ponto de aterramento central lu2012 esquerda: configuração centralizada do sistema, direita: configuração descentralizada do sistema

No caso de cabos termoplásticos isolados com XLPE em design padrão, a atribuição da blindagem do cabo à seção transversal resulta da seção transversal do condutor selecionada. As blindagens dos cabos são geralmente feitas de cobre (Tab. 5/2).

Condutor de cobre [mm ²]	Blindagem de cobre [mm ²]
25 to 120	16
150 to 185	25 ¹⁾
240 to 300	25 ²⁾
400 to 1000	35

1) Para cabos enterrados, é permitida uma seção transversal de 16 mm².

2) Para cabos enterrados de 240 mm², é permitida uma seção transversal de 16 mm².

Levando em consideração os tipos de corrente de curto-circuito decisivos (Tab. 5/1), verifica-se a seguir quais efeitos são esperados para o dimensionamento das seções transversais dos condutores de proteção e das blindagens dos cabos de média tensão, com base na análise das correntes de falta no lado de média tensão. Isto aplica-se particularmente às conexões dos condutores de proteção 5 e 6 (Fig. 5/3).

Considerando as correntes de falta no lado de baixa tensão, foi inicialmente suficiente implementar a conexão do condutor de proteção 5 com a seção transversal mínima (Cap. 3.6).

Para a verificação das seções transversais dos condutores de proteção ou das seções transversais da blindagem dos cabos com isolamento termoplástico de XLPE, são aplicados os seguintes dados do operador do sistema de distribuição:

Especificações do OSD para a subestação de transferência de 10 kV:

$$I''_{k3max} = 14.4 \text{ kA}, I''_{k3min} = 5.8 \text{ kA}$$

Correntes de falta bifásicas resultantes:

$$I''_{k2max} = 12.5 \text{ kA}, I''_{k2min} = 5 \text{ kA}$$

Com respeito aos ajustes de proteção dos relés de proteção de sobrecorrente de tempo definido na subestação de transferência de 10 kV, o operador do sistema de distribuição apresenta os seguintes dados:

$$\text{Protection stage } I > 4 \text{ kA } t > 0.7s$$

$$\text{Protection stage } I \gg 9 \text{ kA } t \gg 0.3s$$



5.5 Dimensionamento do condutor de proteção em um sistema isolado / compensado

Para o exemplo do sistema selecionado, os gráficos na Fig. 5/4 mostram dois locais de falha como exemplo:

Localização da falha 1: no painel de alimentação de saída da subestação de transferência (aparelhagem de média tensão)

Local de falha 2: no material rodante do transformador

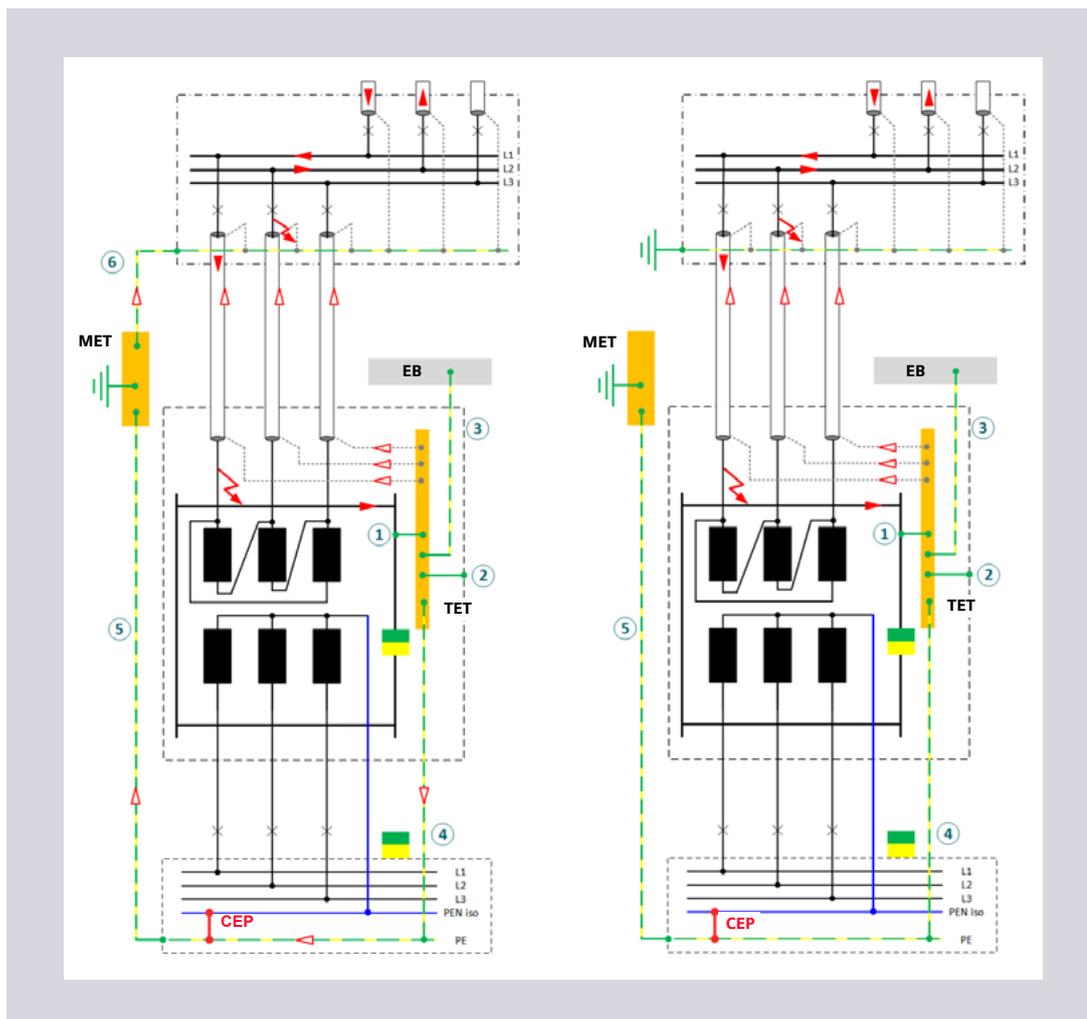


Fig. 5/4: Representação de uma dupla falta à terra I_{kEE} em um sistema isolado / compensado – à esquerda: opção de instalação centralizada; à direita: opção de instalação descentralizada.

De acordo com IEC 61936-1 e EN 50522, os condutores de proteção do arranjo de aterramento devem ser dimensionados com o tempo de desconexão da proteção de backup. No exemplo do sistema dado, estas são as configurações de proteção dos relés de proteção contra sobrecorrente em tempo definido na subestação de transferência de 10 kV (Fig. 5/5).

O estágio de proteção I> identifica a corrente mínima de dupla falta à terra I''_{kEEmin} .

O estágio de proteção I>> identifica a corrente máxima de dupla falta à terra I''_{kEEmax} .

A duração do curto-circuito t_k resulta do tempo de retardo ajustado do respectivo estágio de proteção ($t_>$, $t_>>$) mais o tempo de tolerância (relé de proteção e tempo interno do disjuntor).

Como regra, um tempo de tolerância t_{tol} de 100 ms é suficiente.

Estágio de proteção I>
Duração do curto-circuito $t_k = t_> + t_{tol} = 0,7 \text{ s} + 0,1 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$

Estágio de proteção I>>
Duração do curto-circuito $t_k = t_>> + t_{tol} = 0,3 \text{ s} + 0,1 \text{ s} = 0,4 \text{ s}$

Na Fig. 5/5, a reta decrescente k^2S^2 representa a suportabilidade térmica ao curto-circuito do condutor de proteção ou das blindagens do cabo.

A verificação da suportabilidade ao curto-circuito deve ser feita em toda a faixa de corrente de curto-circuito de I''_{kEEmin} a I''_{kEEmax} , utilizando as durações de curto-circuito correspondentes.

De acordo com a Fig. 5/5, resultam três casos individuais para a verificação:

1º caso: $I''_{kEEmin} = I''_{k2min} = 5 \text{ kA}$, $t_k = 0,8 \text{ s}$

2º caso: $I''_{kEEmax} = I''_{k2max} = 12,5 \text{ kA}$, $t_k = 0,4 \text{ s}$

3º caso: Transição do estágio de proteção I> para o estágio de proteção I>> com a duração do curto-circuito t_k do estágio de proteção I> Transição = 9 kA, $t_k = 0,8 \text{ s}$

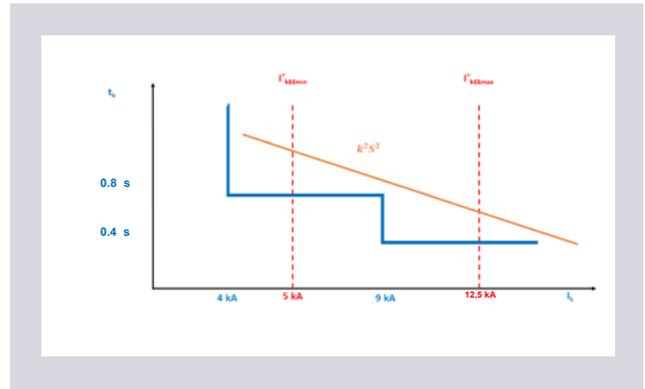


Fig. 5/5: Relé de proteção contra sobrecorrente em tempo definido em uma subestação de transferência de 10 kV– configurações de proteção I> e I>> (proteção de reserva)

Nota – configurações de proteção contra sobrecorrente em tempo definido

Se ambos os locais de falha da corrente de falha de aterramento duplo I''_{kEE} surgirem no mesmo circuito, por exemplo, no mesmo cabo de MT de saída (representado na Fig. 5/4), a corrente de falha I''_{kEE} flui através dos transformadores de corrente nos dois condutores (fases) na direção oposta.

Isso resulta em uma corrente de curto-circuito com a terra através da relação

$$I_E = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I''_{kEE} + (-I''_{kEE}) + 0 \text{ A} = 0 \text{ A}$$

Esta corrente de falha só pode ser detectada e desconectada por meio do estágio de proteção de uma fase (L_1 , L_2 ou L_3) ou uma avaliação de corrente no sistema de sequência de fase negativa.

Se os locais de falha surgirem em diferentes alimentadores de cabos de saída, por exemplo, no caso de alimentadores de transformadores paralelos, a corrente de falha flui apenas através de apenas um transformador em uma direção. Os estágios de proteção I_E nos dois alimentadores de saída irão pegar e desarmar.

O ajuste da proteção de curto-circuito à terra para metade da corrente nominal do transformador de corrente ($I_E = 0,5 * I_{transf}$) é normalmente suficiente.

As conexões dos condutores de proteção 5 e 6 são instaladas individualmente como condutores de proteção de cobre com isolamento em XLPE. Para este método de instalação do condutor de proteção, a Tab. 5/4 mostra um extrato dos coeficientes de material para diferentes tipos de isolamento de cabos e materiais de condutores.

Material do cabo	Temperatura inicial/final em °C	Valores de k para cobre (Cu) em $A\sqrt{s/mm^2}$ ¹⁾	Valores de k para alumínio (Al) em $A\sqrt{s/mm^2}$ ¹⁾
PVC 70 / 90 °C	30 / 160 ²⁾	143	95
XLPE, EPR 90°C	30 / 250	176	116

1) Valores de k para condutores de proteção isolados não incorporados em cabos e não agrupados com outros cabos.

2) Válido para seções transversais de condutores de até 300 mm²

Consequentemente, as seções transversais dos condutores de proteção das conexões 5 e 6 são dimensionadas termicamente com $k = 176 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ no que diz respeito à suportabilidade ao curto-circuito.

5.5.1 Análise do pior caso: Conexões dos condutores de proteção 5 e 6 – SEM divisão de corrente

Nas duas opções de instalação (centralizada, descentralizada), surge um pior caso para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 se não ocorrer divisão de corrente. A corrente total de curto-circuito monofásico à terra I''_{k1} através das conexões 5 e 6 ou – no caso de instalação descentralizada – através da conexão 5 e do arranjo de aterramento na terra. Nenhuma corrente parcial de curto-circuito flui através das blindagens dos cabos de MT de saída (Fig. 5/6).

Verificação da suportabilidade ao curto-circuito

De acordo com os ajustes de proteção dados (Fig. 5/5) e os três casos descritos, resulta uma seção transversal mínima necessária do condutor de 50 mm^2 para cabos de cobre com isolamento em XLPE ao usar o coeficiente de material $k = 176 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ (Tab 5/4).

1º caso – estágio de proteção $I >$ (I''_{kEmin}):

$$S_{Cn,5} = S_{Cn,6} = \frac{I''_{kEmin}}{k} \times \sqrt{t_k} = \frac{5,000 \text{ A}}{176 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0,8 \text{ s}} \approx 25,5 \text{ mm}^2$$

2º caso – estágio de proteção $I >>$ (I''_{kEmax}):

$$S_{Cn,5} = S_{Cn,6} = \frac{I''_{kEmax}}{k} \times \sqrt{t_k} = \frac{12,500 \text{ A}}{176 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0,4 \text{ s}} \approx 46 \text{ mm}^2$$

3º caso – transição entre os estágios de proteção $I >$ e $I >>$:

$$S_{Cn,5} = S_{Cn,6} = \frac{I''_{kEmax}}{k} \times \sqrt{t_k} = \frac{12,500 \text{ A}}{176 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0,4 \text{ s}} \approx 46 \text{ mm}^2$$

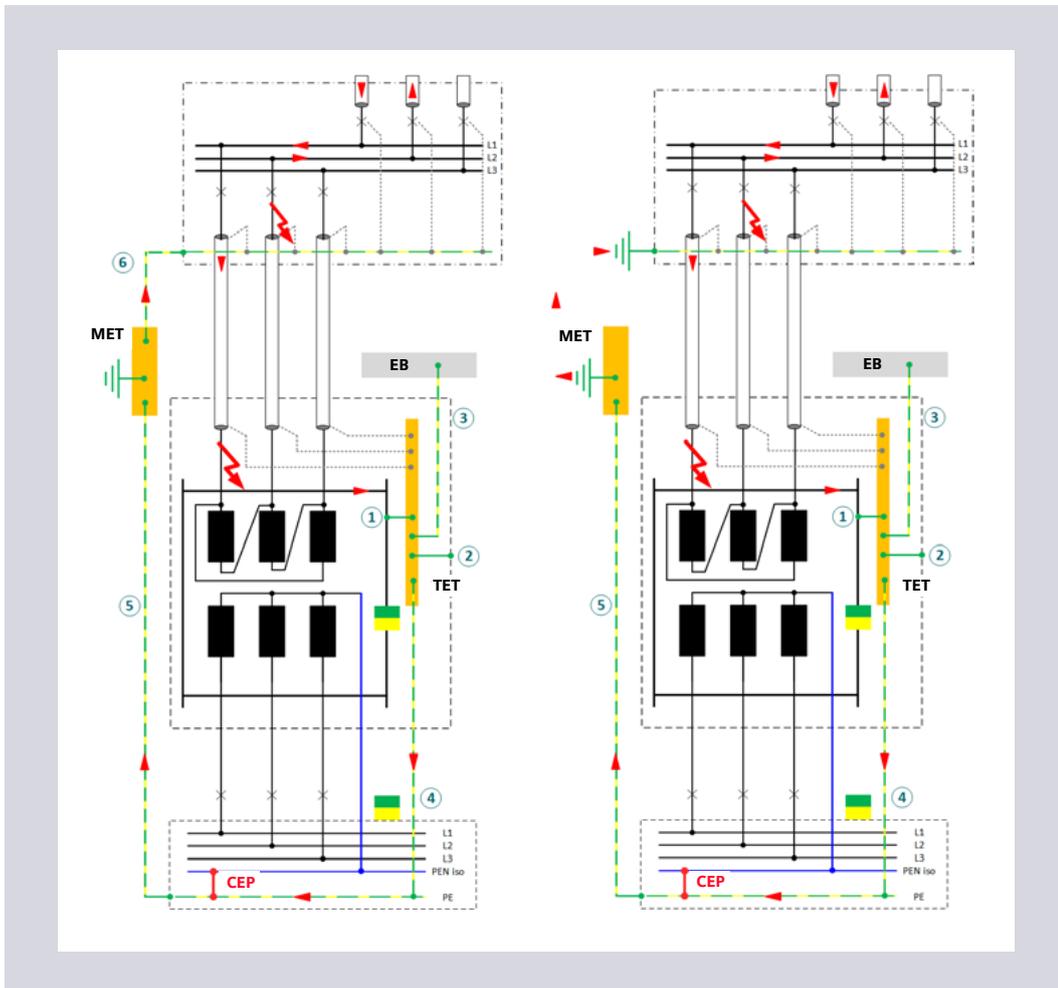


Fig. 5/6: Sistema isolado / compensado:

Análise do pior caso para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 – SEM divisão de corrente (à esquerda: opção de instalação centralizada, à direita: opção de instalação descentralizada)

5.5.2 Análise do pior caso: blindagens de cabos de MT – SEM divisão de corrente

O pior caso também resulta para os cabos de MT de saída se não ocorrer divisão de corrente e a corrente de falha de aterramento dupla I''_{KEE} fluir exclusivamente através das blindagens do cabo. Nesta análise de pior caso, nenhuma corrente de curto-circuito parcial surge nas conexões do condutor de proteção 4, 5 e 6 (Fig. 5/7).

Verificação da resistência ao curto-circuito

No circuito de alimentação de saída entre a chave de transferência e os terminais primários do transformador, são instalados três cabos unipolares isolados em XLPE com uma seção transversal de blindagem de cabo de 16 mm² de cobre. Para verificar a resistência ao curto-circuito térmico da blindagem de cobre por cálculo, seu coeficiente de material k deve ser determinado primeiro.

Observação 1

De acordo com IEC 60502-1/-2, uma temperatura final máxima de curto-circuito de 250°C é especificada para condutores internos e uma duração de curto-circuito de até 5 segundos. Temperaturas finais de curto-circuito mais altas levam a danos no isolamento e aumentam o risco de curto-circuito (condutor interno contra blindagem do cabo). Fabricantes de cabos como EUPEN ou também ERICSSON Network Technologies AB Energy especificam uma temperatura final máxima de curto-circuito de 350 °C para a blindagem do cabo com uma duração de curto-circuito de até 5 segundos. Portanto, outro coeficiente de material k_{Sh} resulta para a blindagem do cabo devido às diferentes temperaturas finais máximas de curto-circuito.

Observação 2

No caso dos cabos de alimentação da Nexans, por exemplo, o fabricante do cabo fornece a capacidade de transporte de curto-circuito para as blindagens de cobre de seus cabos isolados em XLPE como resultado da corrente de curto-circuito e da duração do curto-circuito em

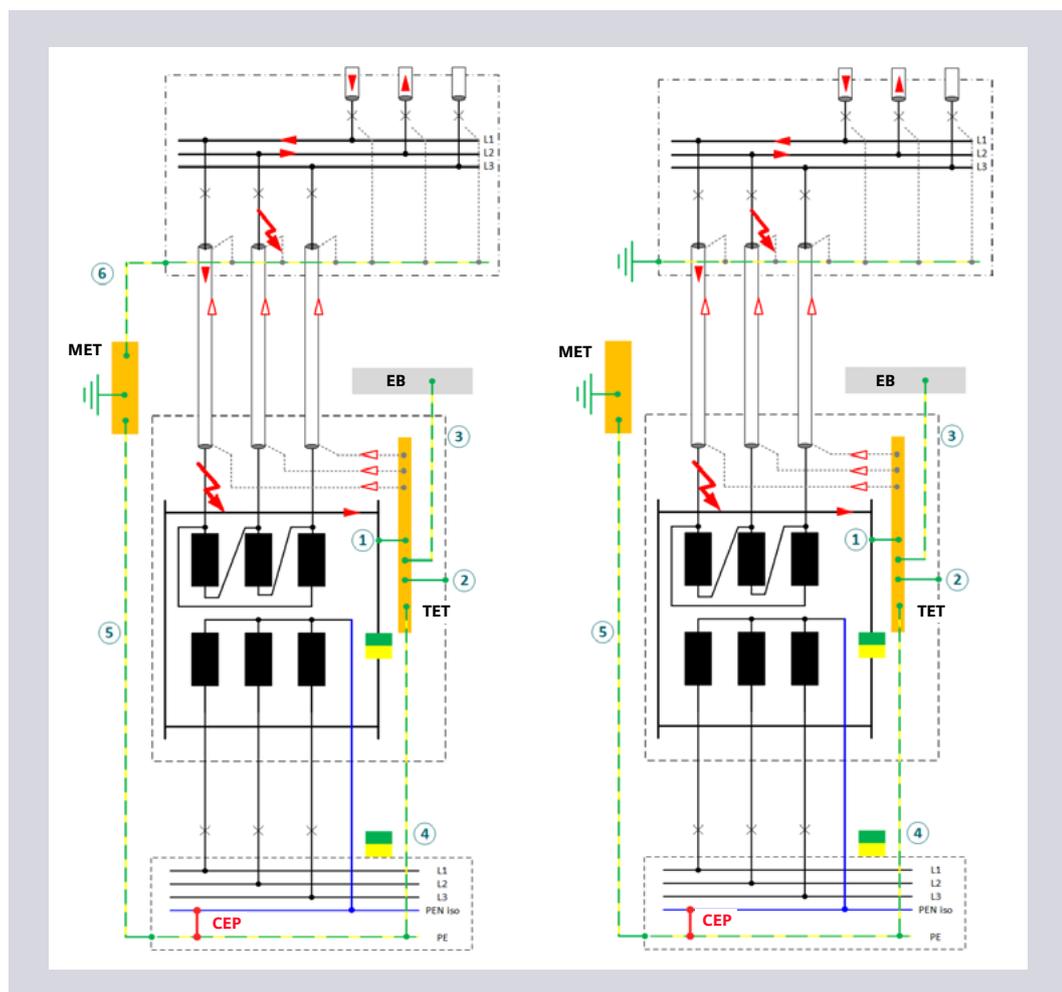


Fig. 5/7: Sistema isolado/compensado: Análise do pior caso para as blindagens dos cabos de saída de MT – SEM divisão de corrente (esquerda: opção de instalação centralizada, direita: opção de instalação descentralizada)

por meio de uma curva característica. A corrente de curto-circuito ou a duração do curto-circuito pode ser lida diretamente do diagrama para a seção transversal do condutor de blindagem correspondente (Fig. 5/8).

Observação 3

Outros fabricantes de cabos (EUPEN, ERICSSON) fazem especificações sobre a capacidade de condução de curto-circuito de uma blindagem de cobre de 16 mm², a partir da qual um coeficiente de material k_{Sh} de ~ 190 A√s/mm² pode ser determinado. No exemplo de aplicação dado, este valor é usado para a verificação calculada da suportabilidade térmica ao curto-circuito das blindagens dos cabos de MT.

1º caso – estágio de proteção I > (I^{''}_{kEEmin}):

$$S_{Sh} = \frac{I''_{kEEmin}}{n_{Sh} \times k_{Sh}} \times \sqrt{t_k} = \frac{5,000 A}{3 \times 190 A\sqrt{s}/mm^2} \times \sqrt{0.8 s} \approx 7.9 mm^2$$

2º caso – estágio de proteção I >> (I^{''}_{kEEmax}):

$$S_{Sh} = \frac{I''_{kEEmax}}{n_{Sh} \times k_{Sh}} \times \sqrt{t_k} = \frac{12,500 A}{3 \times 190 A\sqrt{s}/mm^2} \times \sqrt{0.4 s} \approx 13.9 mm^2$$

3º caso – transição entre os estágios de proteção I > e I >>:

$$S_{Sh} = \frac{I >>}{n_{Sh} \times k_{Sh}} \times \sqrt{t_k} = \frac{9,000 A}{3 \times 190 A\sqrt{s}/mm^2} \times \sqrt{0.8 s} \approx 14.2 mm^2$$

De acordo com os cálculos, as blindagens de cobre de 16 mm² estão suficientemente dimensionadas.

Em comparação com a Fig. 5/8, uma única blindagem de cabo de 16 mm² da Nexans pode suportar as seguintes correntes de curto-circuito e durações de curto-circuito:

$$I''_k \approx 5.0 \text{ kA} \text{ até } t_k \leq 0.4 \text{ s e } I''_k$$

$$\approx 3.5 \text{ kA} \text{ até } t_k \leq 0.8 \text{ s}$$

Consequentemente, as blindagens de cobre de 16 mm² também estão suficientemente dimensionadas ao usar cabos da Nexans.

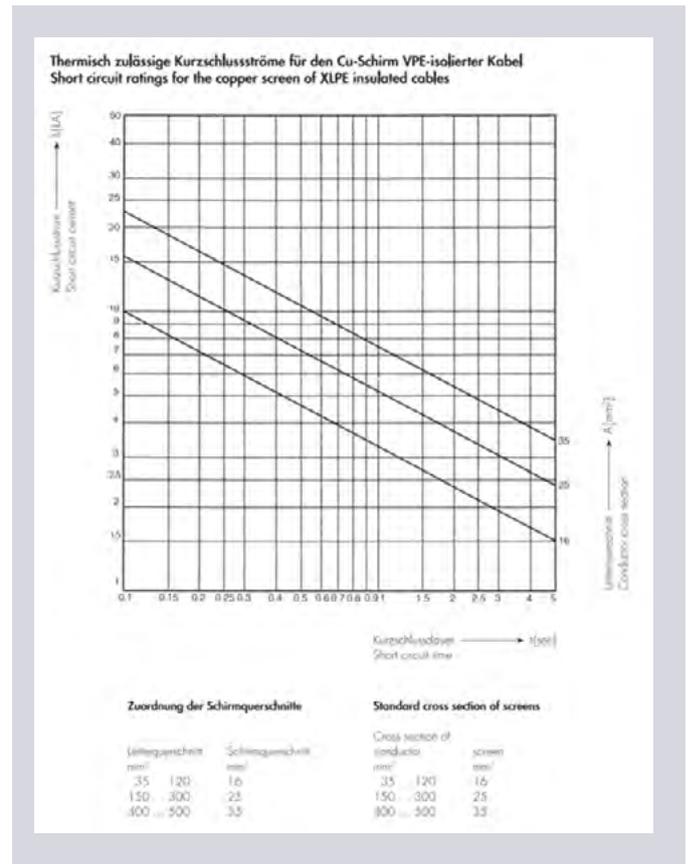


Fig. 5/8: Suportabilidade térmica ao curto-circuito de blindagens de cobre de cabos com isolamento em XLPE – fonte: Nexans Power Cables 1-30 kV, 2012

5.5.3 Análise do pior caso: Conexões dos condutores de proteção 5 e 6 – COM divisão de corrente

Na opção de instalação centralizada, correntes parciais de curto-circuito fluem tanto através das blindagens dos cabos de MT de saída quanto através do caminho de corrente paralelo das conexões dos condutores de proteção 4 a 6 (Fig. 5/4, à esquerda).

Na opção de instalação descentralizada, a impedância entre o aterramento do lado de média tensão e o lado de baixa tensão não pode ser calculada. Portanto, este caso não é levado em consideração para o exemplo de aplicação dado.

Verificação da suportabilidade ao curto-circuito

Conforme apontado no capítulo anterior "Análise do pior caso: blindagens de cabos de MT – sem divisão de corrente", a seção transversal do condutor estipulada pelo projeto está suficientemente dimensionada para as blindagens dos cabos de MT.

É fornecida uma verificação simplificada para mostrar que a seção transversal do condutor determinada para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 a partir do capítulo "Análise do pior caso – sem divisão de corrente" pode ser reduzida.

Primeiramente, assume-se uma seção transversal mínima de 6 mm² de cobre para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6.

O comprimento das conexões dos condutores de proteção 5 e 6 será geralmente maior ou igual ao comprimento dos cabos de MT de saída. A impedância da conexão do condutor de proteção 4 é muito pequena devido à grande seção transversal do condutor (pelo menos metade da seção transversal do condutor de linha) e, portanto, é ignorada para esta análise.

A divisão das correntes parciais de curto-circuito pode ser determinada da seguinte forma, por meio da razão das seções transversais dos condutores:

Observação

$$\frac{S_{cn.5}}{S_{sh}} = \frac{6 \text{ mm}^2}{3 \times 16 \text{ mm}^2} = \frac{1}{8}$$

Ao dimensionar as conexões dos condutores de proteção 5 e 6, comprimentos maiores em comparação com os comprimentos dos cabos de MT de saída levam a condições mais favoráveis.

Devido ao caminho de corrente paralelo existente, 1/9 da corrente de dupla falta à terra I''_{kEE} flui através das conexões dos condutores de proteção 5 e 6, e 8/9 através das três blindagens dos cabos de MT.

$$I''_{k,Cn.5,6} = \frac{1}{9} \times I''_{kEE} \quad \text{and} \quad I''_{k,Sh} = \frac{8}{9} \times I''_{kEE}$$

As seguintes seções transversais mínimas do condutor resultam analogamente às análises dos piores casos anteriores:

1º caso – estágio de proteção $I >$ (I''_{kEEmin}):

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I''_{kEEmin}}{9 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{5,000 \text{ A}}{9 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.8 \text{ s}} \approx 2.9 \text{ mm}^2$$

2º caso – estágio de proteção $I >>$ (I''_{kEEmax}):

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I''_{kEEmax}}{9 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{12,500 \text{ A}}{9 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.4 \text{ s}} \approx 5 \text{ mm}^2$$

3º caso – transição entre os estágios de proteção $I >$ and $I >>$:

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I >>}{9 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{9,000 \text{ A}}{9 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.8 \text{ s}} \approx 5.1 \text{ mm}^2$$

Devido à divisão de corrente existente, as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 estão fisicamente dimensionadas de forma suficiente com 6 mm² de cobre.

No entanto, como a conexão 6 não está sujeita à IEC 60364-5-54, mas sim à EN 50522 (definição de condutor de proteção), esta conexão deve ser dimensionada com uma seção transversal mínima de 16 mm² de cobre.

Isso leva a uma maior parcela da corrente de curto-circuito fluindo através das conexões 5 e 6. Dependendo dos comprimentos das conexões 5 e 6, isso teria que ser verificado novamente para essas conexões.

Para simplificar a verificação, recomenda-se implementar as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 com seções transversais de condutor idênticas (mínimas), ou seja, com 16 mm² de cobre.

Depois disso, as correntes se dividem novamente da seguinte forma:

$$\frac{S_{Cn.5}}{S_{Sh}} = \frac{16 \text{ mm}^2}{3 \times 16 \text{ mm}^2} = \frac{1}{3}$$

$$I''_{k,Cn.5,6} = \frac{1}{4} \times I''_{kEE} \quad \text{e} \quad I''_{k,Sh} = \frac{3}{4} \times I''_{kEE}$$

1º caso – estágio de proteção $I > (I''_{kEEmin})$:

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I''_{kEEmin}}{4 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{5,000 \text{ A}}{4 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.8 \text{ s}} \\ \approx 6.4 \text{ mm}^2$$

2º caso – estágio de proteção $I >> (I''_{kEEmax})$:

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I''_{kEEmax}}{4 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{12,500 \text{ A}}{4 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.4 \text{ s}} \\ \approx 11.3 \text{ mm}^2$$

3º caso – transição entre os estágios de proteção $I >$ e $I >>$:

$$S_{Cn.5} = S_{Cn.6} = \frac{I >>}{4 \times k} \times \sqrt{t_k} = \frac{9,000 \text{ A}}{4 \times 176 \text{ A}\sqrt{s}/\text{mm}^2} \times \sqrt{0.8 \text{ s}} \\ \approx 11.5 \text{ mm}^2$$

5.6 Dimensionamento do condutor de proteção em um sistema solidamente aterrado / impedância aterrado

Em um sistema solidamente aterrado ou com impedância, um fluxo de corrente de curto-circuito de acordo com a Fig. 5/9 resulta para o sistema dadoampex.

A localização do curto-circuito é na extremidade do cabo de saída de MT no lado primário do transformador, entre um condutor ativo (fase) e o material rodante do transformador.

Neste caso de falta, flui a corrente de curto-circuito monofásico à terra I''_{k1} .

Nota:

A corrente de curto-circuito monofásico à terra I''_{k1} flui apenas para o local do curto-circuito na fase afetada pelo curto-circuito (falta).

A relação

$$I_E = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I''_{k1} + 0 A + 0 A = I''_{k1}$$

também fornece a magnitude da corrente de curto-circuito para terra I_E .

Assim, o curto-circuito monofásico pode ser detectado no relé de proteção de sobrecorrente em tempo definido por meio do estágio de proteção para a(s) fase(s) ativa(s) e por meio do estágio de proteção I_E , e o alimentador de carga afetado pode ser desconectado.

Definir a proteção de curto-circuito para terra I_E para metade da corrente nominal do transformador de corrente ($I_E = 0.5 * I_{n, transf}$) é normalmente suficiente.

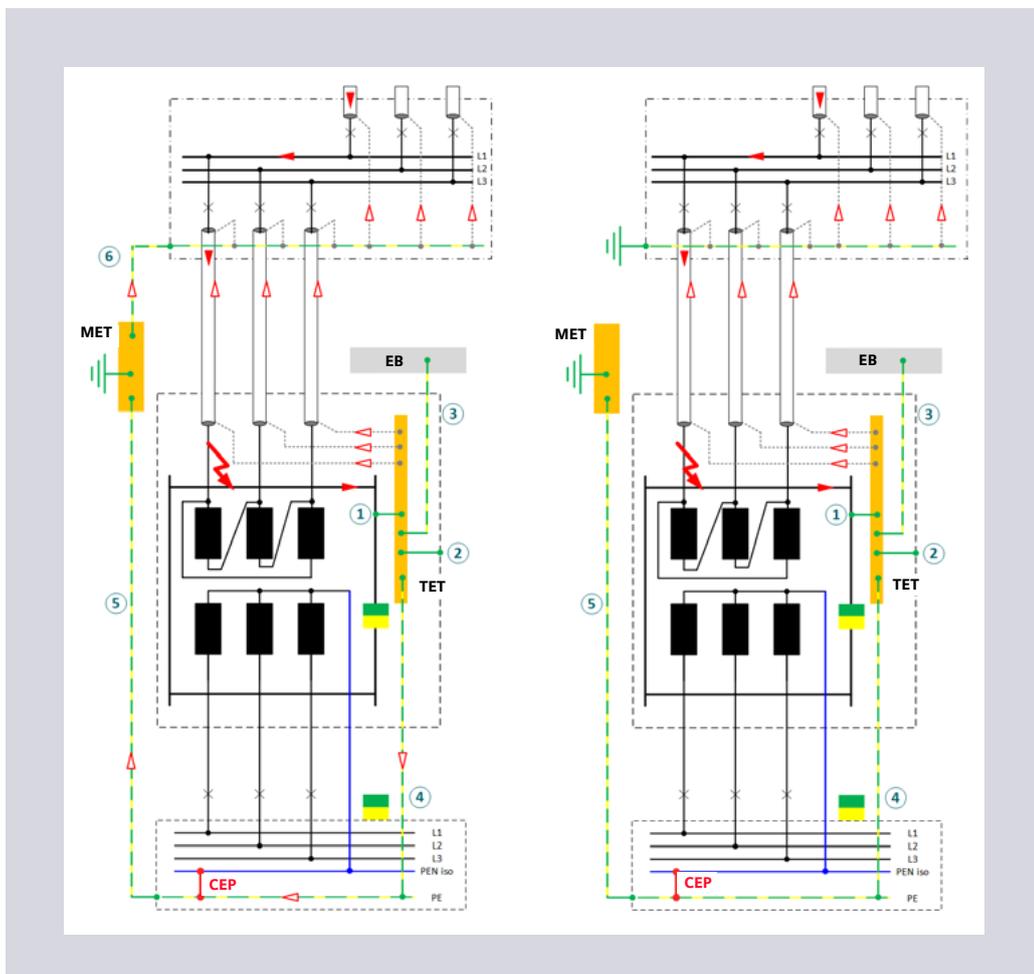


Fig. 5/9: Representação de um curto-circuito monofásico I'' em um sistema solidamente aterrado / impedância aterrada – k_1 esquerda: opção de instalação centralizada direita: opção de instalação descentralizada

O dimensionamento das seções transversais do condutor de proteção é descrito a seguir por meio de um exemplo de cálculo para um sistema de impedância aterrado com uma corrente máxima de curto-circuito monofásico para terra de $I''_{k1max} = 2 \text{ kA}$. Um sistema solidamente aterrado com correntes de curto-circuito para terra mais altas é dimensionado de forma análoga.

As correntes monofásicas de curto-circuito para terra são desconectadas pela avaliação dos estágios de proteção de sobrecorrente em tempo definido para as fases ativas ou o estágio de proteção IE .

De acordo com IEC 61936-1 e EN 50522, os condutores de proteção do arranjo de aterramento (média tensão) devem ser dimensionados com o tempo de desconexão da proteção de backup (no exemplo dado, o disjuntor de transferência). O tempo de desconexão ou a duração do ciclo curto t_k resultam do tempo de atraso definido mais o tempo de tolerância (relé de proteção e tempo interno do disjuntor). Como regra, um tempo de tolerância de 100 ms é suficiente.

As análises de pior caso são realizadas com os valores:

$$I''_{k1max} = 2 \text{ kA e } t_k = 0,4 \text{ s}$$

Possíveis correntes parciais de curto-circuito através do eletrodo de aterramento estrutural e da terra são ignoradas.

As conexões do condutor de proteção 5 e 6 são instaladas individualmente como condutores de cobre de proteção isolados em XLPE. Para o dimensionamento térmico deste método de instalação, o coeficiente de material $k = 176 \text{ A}\sqrt{\text{s/mm}^2}$ deve ser aplicado a essas conexões ([Guia 5/4](#)).



5.6.1 Análise do pior caso: Conexões do condutor de proteção 5 e 6 – SEM divisão de corrente

Nas duas opções de instalação (centralizada, descentralizada), surge um pior caso para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 se não ocorrer divisão de corrente (Fig. 5/10).

A corrente total de curto-circuito monofásico à terra I''_{k1} flui exclusivamente através das conexões 5 e 6 ou – em caso de instalação descentralizada – através da conexão 5 e do sistema de aterramento no solo.

Nesta análise de pior caso, nenhuma corrente parcial de curto-circuito flui através das blindagens dos cabos de MT de saída.

Verificação da suportabilidade ao curto-circuito

A seção transversal mínima do condutor necessária para as conexões dos condutores de proteção 5 e 6 é calculada da seguinte forma:

$$S_{Cn,5} = S_{Cn,6} = \frac{I''_{k1max}}{k} \times \sqrt{t_k} = \frac{2,000 \text{ A}}{176 \text{ A}\sqrt{s/mm^2}} \times \sqrt{0.4 \text{ s}} \approx 7.2 \text{ mm}^2$$

De acordo com a EN 50522, uma seção transversal mínima do condutor de 16 mm² de cobre é suficiente para a conexão do condutor de proteção 6. Se a mesma seção transversal for usada para a conexão do condutor de proteção 5, isso oferece uma reserva térmica adicional e reduz a variância de diferentes seções transversais do condutor.

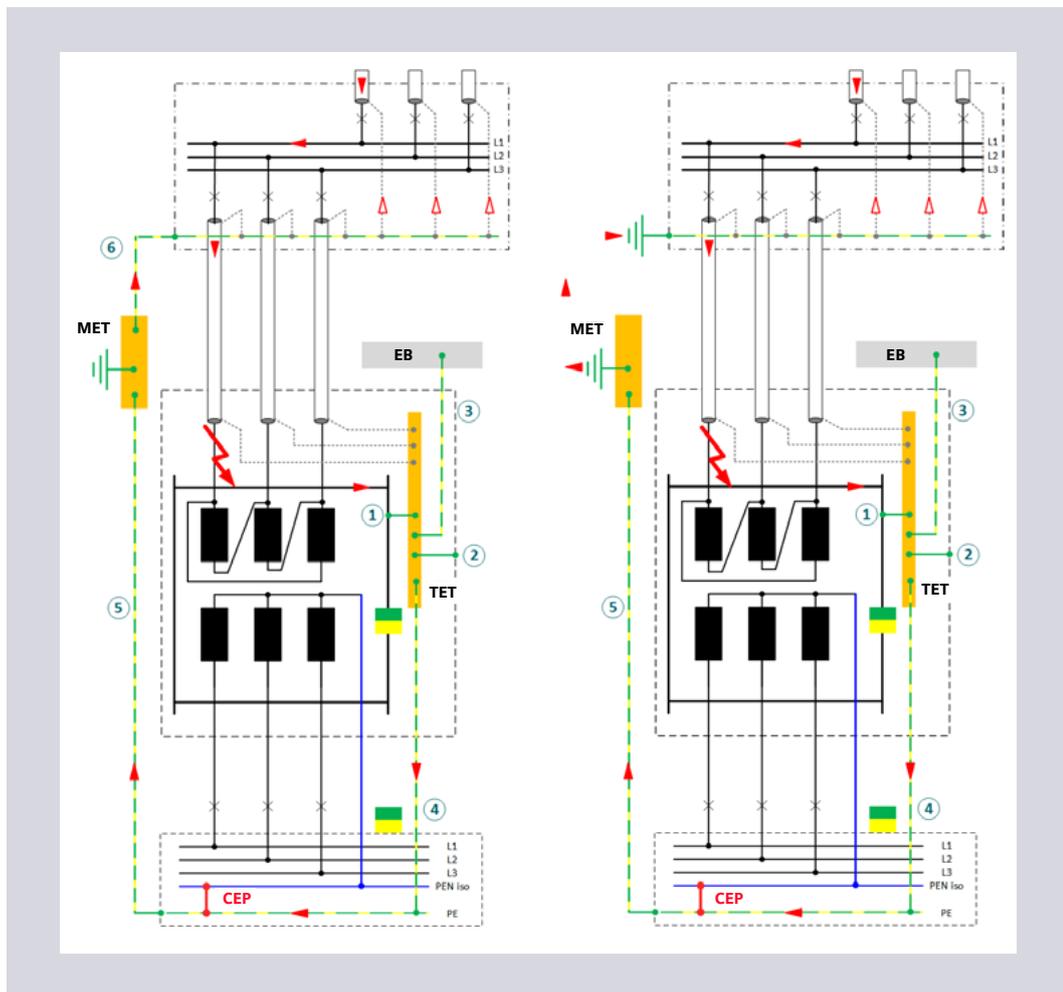


Fig. 5/10: Sistema de ligação à terra solidamente / impedância: Análise do pior caso para as conexões do condutor de proteção 5 e 6 – SEM divisão de corrente (esquerda: opção de instalação centralizada, direita: opção de instalação descentralizada)

5.6.2 Análise do pior caso: blindagens de cabos de MT - SEM divisão de corrente

Nas duas opções de instalação (centralizada, descentralizada), surge o pior caso para as três blindagens dos cabos de saída se não ocorrer divisão de corrente.

A corrente total de curto-circuito monofásico para a terra I["]K1 flui exclusivamente através das blindagens do cabo. Nenhuma corrente parcial de curto-circuito flui através do caminho de corrente paralela das conexões do condutor de proteção 4 a 6 (Fig. 5/11).

Verificação da resistência ao curto-circuito

No circuito de alimentação de saída entre a engrenagem da chave de transferência e os terminais primários do transformador, são instalados três cabos unipolares isolados em XLPE com uma seção transversal de blindagem de cabo de 16 mm² de cobre.

Para a verificação calculada da resistência térmica a curto-circuito da blindagem de cobre, o coeficiente de material determinado $k_{sh} = 190 A \sqrt{s/mm^2}$ do capítulo com o mesmo título (Análise do pior caso: blindagens de cabo de MT

sem divisão de corrente para o sistema isolado / compensado) é utilizada.

Com uma distribuição regular sobre as três blindagens dos cabos, a seção transversal do condutor necessária resulta da seguinte forma:

$$S_{sh} = \frac{I''_{k1max}}{n_{sh} \times k_{sh}} \times \sqrt{t_k} = \frac{2,000 A}{3 \times 190 A \sqrt{s/mm^2}} \times \sqrt{0.4 s} \approx 2.3 mm^2$$

Verificação cruzada: Consultando a Fig. 5/8 e a Nexans Power Cables, uma única blindagem de cabo de 16 mm² pode suportar um curto-circuito de I["]_k ≈ 5,0 kA por até t_k ≤ 0,4 s.

5.6.3 Análise do pior caso: Conexões do condutor de proteção 5 e 6 – COM divisão de corrente

Os capítulos anteriores mostraram que a seção transversal mínima do condutor de 16 mm² é suficientemente dimensionada para a conexão do condutor de proteção 6.

Se esta seção transversal também for usada para a conexão do condutor de proteção 5 (embora 6 mm² sejam suficientes de acordo com os cálculos), nenhuma verificação adicional é necessária para isso.

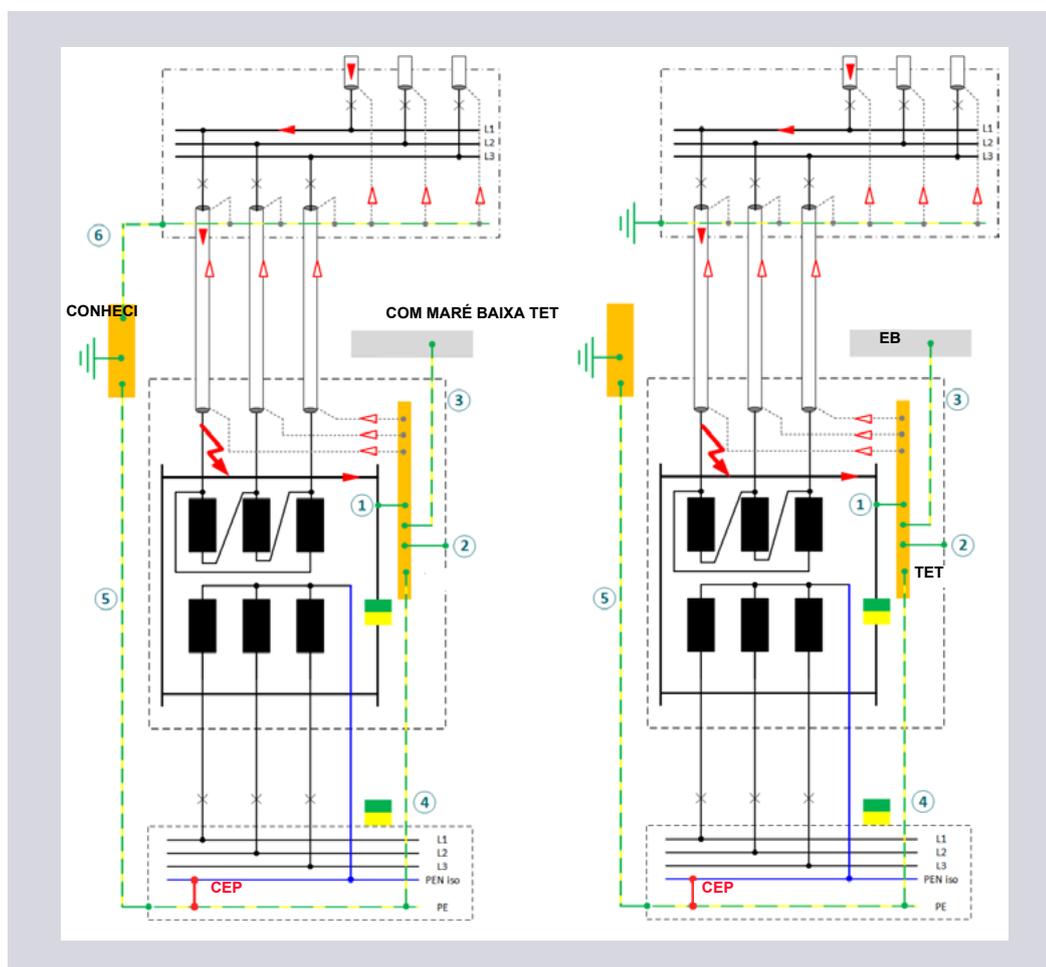


Fig. 5/11: Sistema solidamente aterrado / impedância aterrada: Análise do pior caso para as blindagens dos cabos de saída - SEM divisão de corrente (esquerda: opção de instalação centralizada, direita: opção de instalação descentralizada)

5.7 Opção de dimensionamento – desconexão da disposição de ligação à terra no lado primário e secundário

A Fig. 5/12 mostra uma opção para desconectar os dois arranjos de aterramento no lado primário do transformador do lado secundário.

As blindagens dos cabos de saída MT no painel de transferência são conectadas ao MET através do barramento PE e da conexão do condutor de proteção 6. No lado do transformador, eles são conduzidos diretamente - separadamente do TET - ao MET (arranjo de aterramento no lado de baixa tensão).

Uma corrente de curto-circuito causada por uma falha no lado secundário não flui, portanto, através do arranjo de aterramento no lado de média tensão (blindagens de cabos, conexão do condutor de proteção 6 e barramento PE no painel de transferência).

No caso de uma falha no lado primário entre um condutor (fase) e o material rodante do transformador, a corrente de curto-circuito flui exclusivamente através do arranjo de aterramento no lado de baixa tensão (conexões 1, 4, 5, TET e MET).

Se houver uma falha em um dos cabos de saída de MT, nenhuma corrente de curto-circuito flui através do arranjo de aterramento no lado de baixa tensão.

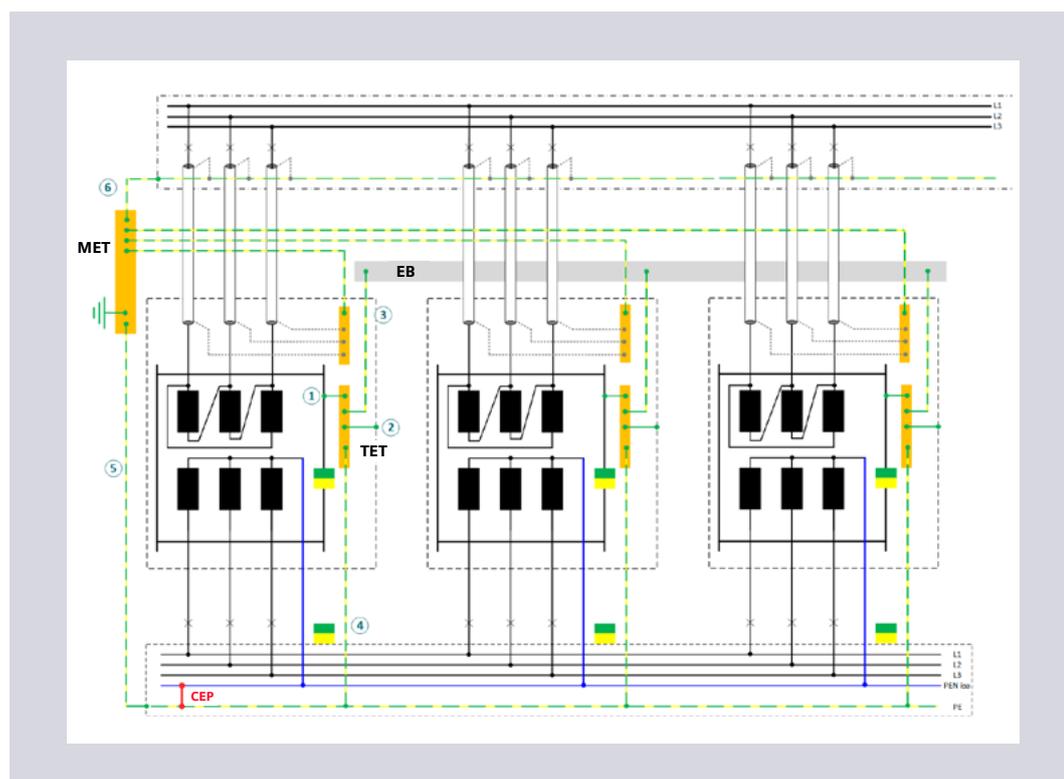


Fig. 5/12: Opção de dimensionamento para desconexão do arranjo de ligação à terra: lado primário e secundário do transformador

6 Descobertas - arranjo de aterramento, lado primário do transformador

Em uma subestação de transformador, os seguintes aspectos devem ser considerados para dimensionar as conexões do condutor de proteção em caso de curto-circuito no lado primário do transformador:

- O dimensionamento das conexões do condutor de proteção depende da conexão do ponto neutro. Isto tem de ser solicitado ao operador da rede de distribuição.
 - Em sistemas solidamente aterrados / aterrados por impedância, a corrente máxima de curto-circuito à terra I''_{kmax} deve ser consultada.
 - Normativamente, a duração do curto-circuito a ser considerada corresponde ao tempo de desconexão da proteção de reserva, que geralmente é o relé de proteção no disjuntor de transferência. As configurações de proteção reais, incluindo possíveis tempos de tolerância, devem ser solicitadas ao operador da rede de distribuição.
 - Para dimensionar as seções transversais do condutor de proteção, uma possível divisão de corrente pode ser levada em consideração. As seções transversais mínimas do condutor resultam do estresse térmico máximo em caso de curto-circuito e/ou de especificações normativas.
- Em subestações com transformadores em operação paralela, deve-se verificar se a maior tensão térmica de curto-circuito surge no lado secundário ou no lado primário.
 - Para sistemas de clientes nos quais a corrente de curto-circuito para terra é conduzida de volta à rede de distribuição através do eletrodo de aterramento estrutural e do aterramento, as tensões de passo e toque devem ser consideradas.
 - A configuração das subestações transformadoras e dos arranjos de aterramento pode diferir dependendo da prática de instalação regional. Isso deve ser levado em consideração nas análises mais pessimistas.

7 Potência Totalmente Integrada – suporte individualizado para projetos

Para suporte individual a projetos no planejamento e dimensionamento de arranjos de aterramento para infraestrutura e edifícios industriais, o Suporte de Consultor TIP da Siemens está à sua disposição com experiência profissional.

A Totally Integrated Power fornece suporte abrangente para planejadores elétricos nas diferentes fases de planejamento com

- Ferramentas de software SIMARIS
- Arquivos do Revit para Building Information Modeling (BIM)
- Textos de especificação da licitação
- Manuais de planejamento e aplicação.

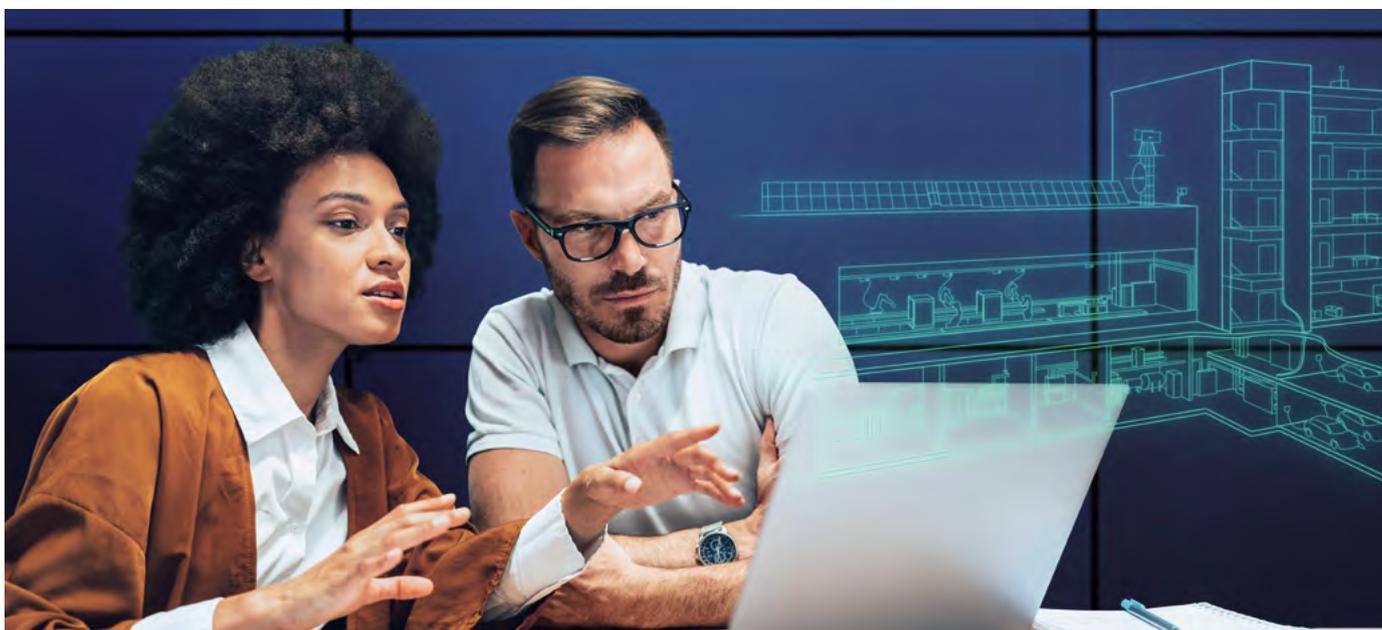
Consultoria profissional, bem como [ofertas de treinamento](#), realizadas por especialistas técnicos de diferentes países, completam os serviços de suporte do TIP.

O planejamento integrado aumenta a sustentabilidade, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia.

A Totally Integrated Power oferece assistência para a concepção de soluções consistentes de fornecimento de energia para aplicações em infraestrutura, edifícios e indústria - também para fontes de alimentação críticas, conforme necessário, por exemplo, em hospitais e data centers.

Considerações de eficiência e gerenciamento de energia completam o portfólio de consultoria.

[siemens.com/tip](https://www.siemens.com/tip)





Siemens AG

Eletrificação e Automação de
Infraestrutura Inteligente
Mozartstr. 31c 91052
Erlangen, Alemanha

Para mais informações, consulte
[siemens.com/tip](https://www.siemens.com/tip)

E-mail: sistemas-ep.br@siemens.com

Sujeito a alterações e erros

08.2024

As informações fornecidas neste documento contêm apenas descrições gerais e/ou características de desempenho que nem sempre refletem especificamente as descritas, ou que podem sofrer modificações no decorrer do desenvolvimento dos produtos. As características de desempenho solicitadas são vinculativas somente quando expressamente acordadas no contrato celebrado. Todos os designs de produtos podem ser marcas comerciais ou outros direitos da Siemens AG, suas empresas afiliadas ou outras empresas cujo uso por terceiros para seus próprios fins possa violar os direitos do respectivo proprietário.