

Capítulo VI

Sistemas aterrados por resistência de baixo e de alto valores

Por Cláudio Mardegan*

Em continuidade ao capítulo anterior, o objetivo deste tópico é auxiliar o(s) engenheiro(s) a decidir se terra ou não um sistema ou a melhor forma de aterrar o sistema, sob análise, e, para tanto, são necessários alguns conceitos.

Será revisto onde aterrar, a fonte ou carga, e ainda, neste tópico, serão tratados os seguintes tipos de aterramento de sistemas:

- ▶ Sistema aterrado por resistência de baixo valor
- ▶ Sistema aterrado por resistência de alto valor

SISTEMAS ATERRADOS POR RESISTÊNCIA DE BAIXO VALOR

Para algumas aplicações, os sistemas solidamente aterrados apresentavam limitações:

- ▶ Elevada corrente de falta causando danos expressivos aos equipamentos a ponto de danificar as chapas de circuito magnético, principalmente de máquinas girantes;
- ▶ Erroneamente as proteções de terra podem ficar por conta da proteção de fase ($I_{CC3\phi} \sim I_{CC1\phi}$), imaginando-se que todos os curtos circuitos podem ser francos, o que não são;
- ▶ Os tempos de eliminação de falta ficam extremamente elevados no caso de faltas por arco.

O sistema de aterramento por resistência de baixo valor normalmente limita a corrente entre 100 A e 1000 A, sendo o valor mais comumente encontrado de 400 A. Veja Figura 1.

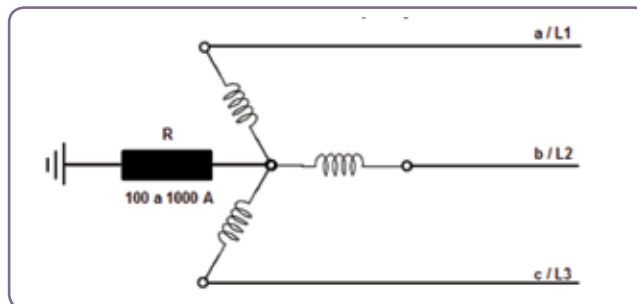


Figura 1 – Representação de um sistema aterrado por resistência de baixo valor.

Recomendações importantes ao se aplicar resistores de aterramento no sistema elétrico

- a) Ao especificar um sistema aterrado por resistência de baixo valor é primordial para o bom funcionamento da proteção de terra que sejam especificados TCs “ground sensors” para as saídas dos painéis, visto que, se os relés de terra estiverem na conexão residual, erros de TCs de fase poderão causar a operação indevida da proteção de terra, principalmente na energização de transformadores e motores.
- b) O monitoramento da integridade da resistência de aterramento é assaz importante devido ao fato de que tanto no que tange ao curto-circuito dos elementos resistores quanto à ruptura dos mesmos impõe severo preço ao sistema, desde sobretensões indesejáveis que podem se tornar sobretensões transitórias até a explosão de contadores devido ao desligamento pela unidade de terra.

Vantagens

- ▶ Não existem danos térmicos e dinâmicos devido à corrente de falta à terra;
- ▶ Isola automaticamente as faltas;
- ▶ Elimina o risco de sobretensões transitórias, se $I_{Resistor} > 3 I_{Co}$;
- ▶ Reduz o risco às pessoas comparado com o sistema solidamente aterrado;
- ▶ Não há perda da chaparia de máquinas girantes em caso de falta à terra;
- ▶ Se devidamente calculado, verificado e especificado, promove a proteção da blindagem, na ocorrência de um curto-circuito fase-terra.

Desvantagens

- ▶ Aumento do custo devido à isolação (devem ter isolação entre fases ao invés de fase-terra);
- ▶ Aumento da tensão nas duas fases sãs quando da ocorrência de uma falta à terra;
- ▶ Aumento do custo de equipamentos (acresce: o próprio resistor, cabo, TC, relé, etc.);
- ▶ Podem ocorrer pequenos afundamentos de tensão na fase sob falta a terra.

Exemplo 1

Calcular o valor da resistência de aterramento de 400 A – 10s instalado no secundário de um transformador cuja tensão é 13800 V.

$$R = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{400} = 19,92\Omega$$

Especificação básica do resistor de aterramento

As especificações seguintes são extremamente importantes para definir o resistor de aterramento de baixo valor: a tensão nominal do sistema (entre fases), tensão fase-terra, corrente de curta duração / resistência, tempo desta corrente, corrente admissível continuamente, nível de isolamento, aumento de temperatura, coeficiente de temperatura da resistência (TCR – Temperature Coefficient of Resistance), tipo de elemento, terminais, grau de proteção, material do invólucro, segurança e os acessórios.

Tensão nominal

É importante definir a tensão nominal entre fases e fase-terra que deve ser compatível com a tensão do sistema.

Corrente de curta duração (IR) / Resistência (R)

O valor desta corrente (IR) define o valor para o qual a corrente de curto-circuito será limitada ao passar por este resistor. Ao definir este valor praticamente está se definindo o valor da resistência (R) em Ohms do resistor. Em outras palavras:

$$R = \frac{\frac{V_{FF}}{\sqrt{3}}}{IR [A]} [\Omega]$$

Como pode ser observado, ao especificar o valor da resistência, as impedâncias do sistema não são levadas em conta. É importante ressaltar também que o valor especificado para a resistência, por norma, tem uma tolerância de 10%.

A escolha do valor da resistência deve ser feita por especialista em proteção visto que implica em:

- Aspectos de segurança;
- Aspectos de proteção de equipamentos;
- Aspectos de sensibilidade dos dispositivos de proteção.

Na falta de informações específicas, a corrente de curta duração é escolhida para ser menor ou igual à corrente nominal do transformador ou gerador. No caso do gerador, não se deve exceder 150% da corrente nominal do gerador.

Os valores mais usuais são: 100 A, 150 A, 200 A, 400 A, 500 A, 600 A e 1000 A.

Tempo

O tempo mais comumente escolhido é o de 10s. Uma vez escolhido o valor da corrente e do tempo, definiu-se o Limite Térmico da Resistência (LTR), que é dado pelo I²t.

Este tempo é mais do que suficiente para que o sistema de proteção opere adequadamente, mesmo que as proteções de backup tenham que operar. Alguns equipamentos que utilizavam tecnologia mais antiga encontram-se valores de até 30 s, o que atualmente é desnecessário.

Corrente admissível continuamente

Como os resistores de aterramento são especificados para exercerem a sua limitação de corrente em condições esporádicas (curto-circuito), os mesmos apresentam uma capacidade de condução de corrente continuamente (ampacidade) limitada a valores que se situam tipicamente entre 5% e 10% do valor da corrente de 10s de curta duração. Deve-se explicitar claramente na folha de dados da especificação de aquisição do resistor o valor mínimo desejado: 5% ou 10%, de outra forma você poderá receber um resistor que suporte até 0%.

Na necessidade de se ter esta ampacidade ampliada pode-se especificá-la, lembrando que poderá haver um aumento considerável em tamanho, peso e preço e que se forem especificados graus de proteção

25 ANOS

MILHÕES DE PRODUTOS VENDIDOS

Com 25 anos, a Clamper conquistou uma marca histórica.

Mais de 25 milhões de produtos vendidos.

Assim, a empresa se mantém atualizada e na vanguarda, presente nos diversos segmentos do mercado nacional e internacional, melhorando a vida das pessoas através de soluções de proteção cada vez mais inovadoras, que garantem a integridade e longevidade de bens residenciais, comerciais, industriais e públicos.

Proteção é o nosso negócio.

0800 7030 555

clamper.com.br

acima de IP 54, devido à dissipação de calor, estes requisitos terão sérias dificuldades de serem obtidos.

Segundo informações obtidas junto ao maior fabricante de resistores do Brasil, o valor por ele utilizado em seus projetos limitam a corrente permanente no resistor a 5% do valor da corrente de curta duração (de 10 s).

Nível de isolamento

Visto que a tensão neutro terra não varia além da tensão fase neutro para sistemas aterrados por resistor de baixo valor, o nível de isolamento deve ser escolhido com base na tensão do sistema. Assim, esta especificação tem baixo impacto no tamanho, peso e preço.

Aumento de temperatura

Segundo a norma ANSI/IEEE Std 32 de 1972, o aumento de temperatura deve ser limitado ao máximo de 760 °C, valor este baseado na tecnologia que era empregada na liga e na isolação disponível em 1972. Atualmente, com as tecnologias atuais, o aumento de temperatura permitido chega a um máximo de 1000 °C, o que reduz sobremaneira o tamanho, o peso e o custo do resistor.

TCR (Temperature Coefficient of Resistance) – Coeficiente de Temperatura da Resistência

Os resistores metálicos possuem um TCR positivo, o que significa que a corrente que irá circular pelo resistor não irá exceder o valor especificado, pois a corrente diminui se a temperatura aumentar. Normalmente, o valor de TCR é limitado a 3,5% para cada 100 °C de aumento.

Quando se encontram valores elevados de TCR é por que o preço do aço inoxidável que compõem os elementos resistivos está baixo ou se está utilizando resistores líquidos.

Tipos de elementos

Os resistores compostos por elementos metálicos têm sido preferidos aos resistores líquidos devido a: evaporação, congelamento e vazamentos, não contêm elementos líquidos e necessitam de uma menor manutenção, além de não necessitar de aquecimento quando instalados em locais de baixa temperatura.

Terminais

O resistor de aterramento tem basicamente três terminais:

- a) O terminal que interliga o neutro do transformador ao gerador ao resistor, o qual é realizado normalmente através de uma bucha que é especificada para a tensão do sistema;
- b) O terminal que interliga a outra extremidade dos elementos resistivos ao terra, o qual é composto por uma bucha que é especificada para uma tensão de 1,2 kV;
- c) O terminal para aterramento da estrutura normalmente é realizado por um parafuso M12, podendo haver um segundo terminal localizado diagonalmente oposto ao primeiro.

Cuidados com a segurança

Durante a condução há o aquecimento do resistor de aterramento. Assim, deve-se tomar cuidado ao tocar as suas partes metálicas.

Outro aspecto importante é que, durante a condução, aparece uma tensão igual à tensão fase-terra entre o neutro e o terra. Assim, devem-se ter procedimentos claros de operação e manutenção que incluam estes detalhes.

Deve-se também identificar e se estudar uma localização adequada no lay-out da subestação para o resistor.

Grau de proteção do invólucro

O grau de proteção mais usual para os resistores de aterramento de neutro é o IP 23. Os materiais utilizados para os elementos resistivos, tais como ligas especiais, aço inoxidável, elementos cerâmicos, aço galvanizado e cobre, são materiais duráveis, mesmo nos ambientes mais agressivos e assim, não há a necessidade de se aumentar o grau de proteção.

Algumas partes, tais como a caixa de terminais, são normalmente especificadas para um grau de proteção maior, por exemplo, IP 54.

Material do invólucro

O material normalmente utilizado para os invólucros é composto por aço tratado com zinco aluminizado, sendo adequado para a maior parte dos ambientes. Em algumas circunstâncias pode haver a necessidade de se utilizar invólucros com chapa de aço inoxidável 304. Para ambientes marinhos, costeiros ou offshore, aço inoxidável 316 é utilizado. Outros ambientes internos ou externos moderados, a simples utilização de chapas de aço pré-galvanizados é adequada. A pintura dos invólucros pode ser especificada, entretanto, pode necessitar de manutenção após o resistor entrar em condução, devido ao seu aquecimento.

Acessórios

Entre os acessórios, podem ser citados:

- Contatores
- Disjuntores
- TCS
- Monitores de integridade do aterramento para circuito aberto e curto-circuito dos elementos
- Etc.

SISTEMAS ATERRADOS POR RESISTÊNCIA DE ALTO VALOR (RAV)

(a) Definição

O IEEE Std 142 define sistema aterrado por resistência de alto valor (RAV), em inglês conhecido como HRG, como todo sistema que possui a maior resistência possível conectada no neutro do sistema, de forma que:

$$R \leq \frac{X_{C0}}{3}$$

X_{C0} = é a reatância capacitiva própria equivalente do sistema, entre fase e terra.

Em outras palavras, isto significa que:

$$I_R \geq 3 \times I_{C0}$$

Em que:

I_R = É a corrente que circula na resistência de aterramento;

I_{C0} = É a corrente de charging do sistema. Define-se corrente de charging como sendo a corrente de fuga que circula nas capacitâncias próprias dos equipamentos para a terra.

A Figura 2 ilustra o exposto.

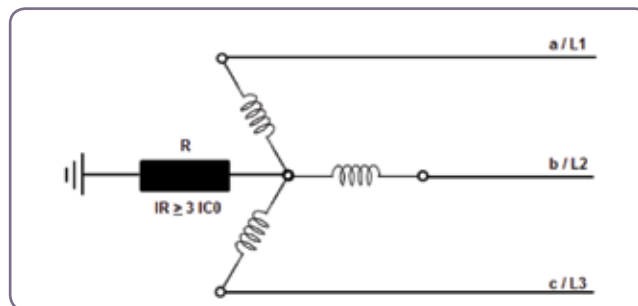


Figura 2 - Aterramento por resistor de alto valor (HRG).

(b) Por que 3.IC0?

Porque se descobriu que é o limiar entre um sistema ser considerado aterrado ou isolado e, se especificado um resistor com uma corrente maior que esta, elimina-se a possibilidade de ocorrência de sobretensões transitória.

É importante observar que o número 3 que multiplica a corrente aparece devido ao fato de a tensão aumentar três vezes quando de uma falta à terra.

O valor 3.IC0 é o valor total da corrente de charging sob falta.

Vantagens

- ▶ Não se faz necessário o desligamento na ocorrência da primeira falta à terra, minimizando as perdas de produção;
- ▶ Elimina as sobretensões transitórias e assim os danos à isolamento dos equipamentos, se $I_{RESISTOR} > 3I_{C0}$;
- ▶ Eliminação ou redução de incêndios devido às correntes de falta por arco;
- ▶ Facilidade e rapidez de localização das faltas;
- ▶ Reduz os riscos às pessoas se comparado com os demais sistemas;
- ▶ Não há perda de chapa magnética em caso de faltas à terra em máquina girantes;
- ▶ Promove a proteção da blindagem em caso de curto-circuito fase-terra;
- ▶ Menor tempo para recolocar o sistema em marcha após uma falta (\downarrow MTTR);

- ▶ Praticamente elimina a possibilidade de evolução de $I_{CC1\varphi}$ em $I_{CC2\varphi}$ e $I_{CC3\varphi}$;
- ▶ Não ocorrem afundamentos de tensão sob falta à terra.

Desvantagens

- ▶ Aumento do custo dos equipamentos (devem ter isolamento entre fases ao invés de fase-terra);
- ▶ Aumento da tensão nas duas fases sãs quando da ocorrência de uma falta à terra;
- ▶ Acresce mais equipamentos (resistor e sistema de localização de faltas);
- ▶ Não permite alimentação de cargas monofásicas.

(c) Cálculo da corrente de charging

Quando não se dispõe do valor da corrente de charging, ou mesmo em etapas de projeto, se faz necessário determinar o valor destas correntes, cujas intensidades são calculadas a partir de valores típicos de capacitâncias e/ou correntes de charging (3Ico) para cada tipo de equipamento, obtidos de normas e artigos tais como os descritos a seguir.

(c1) Transformadores

As Tabelas 1 a 8 apresentam as capacitâncias para a terra de transformadores, tomando-se como base a norma ANSI C37.011-1979. Deve-se entrar com as potências monofásicas nas tabelas.

TABELA 1

CLASSE 15 kV
BIL = 110 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
1	1700	3200
1.5	2100	4000
2	2800	4200
2.5	3200	4800
3	3800	5000
3.5	4000	5200
4	4200	5700
5	5000	6000
7.5	6500	7000
10	8000	8100

ANSI C37.011-1979 (Fig 28A)

TABELA 2

CLASSE 25 kV
BIL = 150 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
1	1300	3000
1.5	1700	3500
2	2000	4000
2.5	2300	4100
3	2700	4500
3.5	2900	4800
4	3000	5000
5	3600	5200
7.5	4500	6000
10	5300	6800

ANSI C37.011-1979 (Fig 28B)

TABELA 3

CLASSE 36,2 kV
BIL = 200 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
1	1700	3050
1.5	2000	3600
2	2500	4000
2.5	2800	4500
3	3000	4800
3.5	3500	4950
4	3800	5000
5	4200	5400
7.5	5300	6000
10	6500	7000

ANSI C37.011-1979 (Fig 28C)

TABELA 4

CLASSE 45 kV
BIL = 250 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
1	1200	2600
2	1900	3200
3	2400	3900
3.5	2500	4000
5	3100	4600
6	3500	4950
7.5	4950	5200
10	4600	6000
15	5500	7000
20	6950	-
30	8100	-

ANSI C37.011-1979 (Fig 28D)

TABELA 5

CLASSE 72,5 kV
BIL = 350 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
4	2700	4000
5	2950	4100
6	3100	4500
7	3400	4900
7.5	3500	5000
8	3800	5050
9	4000	5100
10	4100	5200
15	5000	6000
20	6000	7200
30	-	8800

ANSI C37.011-1979 (Fig 28E)

TABELA 6

CLASSE 92,4 kV
BIL = 450 kV

Trafo MVA	C _{min} [pF]	C _{máx} [pF]
5	1950	3700
6	2100	3900
7.5	2400	4000
10	2800	4300
12.5	3000	4600
15	3200	5000
20	3900	5200
30	4500	6000
40	-	6900
50	-	7800
60	-	8000

ANSI C37.011-1979 (Fig 28F)

TABELA 7

 CLASSE 145 kV
 BIL = 550 kV

Trafo MVA	Cmin [pF]	Cmáx [pF]
5	2300	3900
6	2700	4000
7	2800	4100
7.5	2900	4200
8	3000	4300
10	3200	4800
12.5	3500	5000
15	4000	5100
20	4500	6000
30	5100	7500
40	-	8900

ANSI C37.011-1979 (Fig 28G)

TABELA 8

 CLASSE 145 kV
 BIL = 650 kV

Trafo MVA	Cmin [pF]	Cmáx [pF]
5	1700	3000
6	1800	3050
7	1900	3100
7.5	1950	3150
8	2000	3200
9	2100	3400
10	2200	3500
20	3000	4200
30	3600	5000
40	-	5500
50	-	6000

ANSI C37.011-1979 (Fig 28H)

(c2) Geradores

As tabelas 9 e 10, apresentadas a seguir, mostram as capacitâncias de charging de geradores, utilizando como referência a norma ANSI C37.011-1979. A tabela 11 mostra as correntes de charging de turbo-geradores baseado no artigo "Charging Current Data for Guesswork-Free Design of High-Resistance Ground Systems", de David S. Baker, publicado no IEEE Transaction on Industry Applications IA, Vol 15, Mar/Apr 1979, PG 136 A 140.

Tabela 9 – Turbo gerador

Turbo Gerador

Potência MVA	Resfriamento	RPM	Fase-Terra Total 3 enrolamentos	
			Cmin [μF]	Cmáx [μF]
15 a 30	Convencional	3600	0.17	0.36
30 a 50	Convencional	3600	0.22	0.44
50 a 70	Convencional	3600	0.27	0.52
70 a 225	Convencional	3600	0.34	0.87
225 a 275	Convencional	3600	1.49	1.49
125 a 225	Convencional	1800	0.04	1.41
100 a 300	Condutor à gás	3600	0.33	0.47
190 a 300	Condutor: Líquido	3600	0.27	0.67
300 a 850	Condutor: Líquido	3600	0.49	0.68
250 a 300	Condutor: Líquido	1800	0.37	0.38
300 a 850	Condutor: Líquido	1800	0.71	0.94
> 850	Condutor: Líquido	1800	1.47	1.47

ANSI C37.011-1979 (Tabela 3)

TABELA 10 – Turbo gerador

Turbo Gerador

Potência MVA	Resfriamento	RPM	Fase-Terra Total 3 enrolamentos	
			Cmin [μF]	Cmáx [μF]
10 a 30	-	720 a 360	0.26	0.53
25 a 100	-	225 a 85	0.9	1.64

ANSI C37.011-1979 (Tabela 3)

Tabela 11 – Turbo gerador

Turbo Gerador

Potência MVA	Resfriamento	RPM	Tensão [V]	Fase-Terra Total 3 enrolamentos	
				3Ico Min [mA/MVA]	3Ico Máx [mA/MVA]
10 a 60	A ar	1800	480	-	-
11 a 60	A ar	1800	2400	12	16
12 a 60	A ar	1800	4160	18	25
13 a 60	A ar	1800	6900	25	35
14 a 60	A ar	1800	13800	36	60

(c3) Motores

As tabelas 12 e 13 trazem as correntes de charging típicas para motores.

Tabela 12 - Motores

Motores

Tensão [V]	3Ico [A / 1000 HP]	Potência [HP]	Co [μF]
480	0.01	150	0.004785841
2400	0.03	500	0.009571682
4160	0.05	800	0.014725665
13800	0.15	1000	0.016646404

Tabela 13 - Motores

Motores

Tensão [V]	3Ico Min mA/1000HP	3Ico Máx mA/1000HP
480	5	10
2400	20	40
4160	35	70
6900	60	115
13800	115	230

*Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro electricista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia, com experiência de mais de 35 anos nesta área. É autor do livro "Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais", patrocinado pela Schneider, e coautor do "Guia O Setor Elétrico de Normas Brasileiras". É membro sênior do IEEE e participa também dos Working Groups do IEEE que elaboram os "Color Books". É Chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Fault Protection e também participa de Forensics.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br